

Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias

Pedro Luis Pérez de Paz · Carlos Sangil · Natacha Aguilar de Soto et al.
José Carlos Hernández & Sabrina Clemente · Pedro A. Hernández

El Hierro

Nacimiento de un volcán



Actas VIII Semana Científica Telesforo Bravo

El Hierro

Nacimiento de un volcán

Editado
por
Julio Afonso-Carrillo

Actas VIII Semana Científica Telesforo Bravo
INSTITUTO DE ESTUDIOS HISPÁNICOS DE CANARIAS
2013

© Los autores
© De esta edición: 2013, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias,
C/. Quintana, 18. Puerto de la Cruz, Tenerife,
Islas Canarias, E-38400.

Diseño de la cubierta:
:rec retoque estudio creativo
www.retoqueec.com

Imagen de cubierta:
INVOLCAN

Primera edición: septiembre 2013

Imprime:
Producciones Gráficas, S.L.
Pol. Ind. Los Majuelos
C/Tijarafe, Nave II, Puerta 2
Tlf: 922 821 517

Depósito Legal: TF 613-2013

ISBN: 978-84-616-5651-6

En el año que se cumplen cien del nacimiento del insigne naturalista y geólogo Telesforo Bravo, el mejor homenaje que le puede hacer su Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias es continuar celebrando en noviembre la Semana Científica que lleva su nombre. Sería ya la IX.

Este esfuerzo continuado de la realización de las semanas científicas y las ediciones correspondientes se deben, en primer lugar, a la dedicación y el buen hacer del Vicepresidente de Asuntos Científicos del IEHC y Catedrático de Botánica de la ULL, Julio Afonso Carrillo.

La buena acogida que han tenido estas actividades del IEHC se debe también, de una manera muy especial, a la familia de don Telesforo Bravo, a Jesús Bravo y a Jaime y Juan Jesús Coello, que a través de su Fundación, vienen dedicando tiempo y esfuerzo para mantener viva la memoria de su ilustre antepasado.

No menos importante, en estos tiempos que corren, ha sido la fidelidad y el apoyo mostrado por la Fundación Mapfre Guanarteme, a cuyo Presidente y Patronos les agradecemos que desde un primer momento hayan venido respaldando esta iniciativa.

Hoy damos a conocer la cuidadosa edición correspondiente a las Actas de la VIII Semana Científica Telesforo Bravo de 2012: *El Hierro. Nacimiento de un volcán*. Deseamos que la presente publicación, entre otros objetivos, sea una suerte de homenaje del IEHC a la isla de El Hierro, y a todos los herreños y herreñas, en el recordatorio del fenómeno eruptivo que conmovió a toda su población y a todos los que nos sentimos solidarios con ella.

Nicolás Rodríguez Münzenmaier
Presidente del IEHC

Presentación

A principios de octubre de 2011 y después de varios meses en los que se había producido un incremento significativo de la actividad sísmica de baja magnitud iniciada en el mes de julio, en la población de la isla de El Hierro se había extendido un cierto grado de alarma ante el acúmulo de evidencias que presagiaban la inminencia de una erupción volcánica. La actividad sísmica comenzó localizada hacia el norte de la isla en la zona de El Golfo, pero a medida que aumentaron los sismos sus focos se desplazaron hacia el sur a la zona de El Julan y el Mar de Las Calmas. El 10 de octubre de 2011 los científicos detectaron la señal del tremor armónico producido por el flujo de magma. Eran los primeros indicios del comienzo de la primera erupción volcánica de las islas Canarias en el siglo XXI, cuarenta años después de que en 1971 tuviera lugar la erupción del Teneguía en La Palma. Dos días más tarde, a unos 5 kilómetros de la costa al sur de La Restinga, se observaron en la superficie gases y materiales finos constituyendo las primeras muestras del proceso eruptivo. La llegada a la superficie de los primeros piroclastos humeantes ocurrió el 15 de octubre.

A los pocos días aparecieron en la superficie del mar unos materiales flotantes con unas características muy particulares que no habían sido documentados previamente en otras erupciones y que fueron denominados “restingolitas”. Consistían en una parte central blanca y porosa recubierta por una capa delgada de material negro y vítreo. Las restingolitas fueron desapareciendo en el transcurso de la erupción y sustituidas por bombas huecas similares a las ya conocidas de otras erupciones submarinas en las Azores. El cono volcánico se originó en la cabecera de un valle submarino, a unos 400 metros de profundidad, y la mayor parte de los materiales emitidos se canalizaron por ese valle submarino hacia las profundidades. El cono aumentó de volumen y altura hasta llegar a unos 80 metros de profundidad. El 5 de marzo de 2012, y tras casi cinco meses de actividad, las autoridades anunciaron el final de la erupción.

La erupción convirtió a El Hierro en información de primera página en la prensa escrita y noticia de apertura en los informativos de radio y televisión. Sirvió para que nos familiarizáramos con un vocabulario técnico que llegamos a utilizar durante semanas de forma coloquial (sismos de baja intensidad, temblor, piroclastos, restringolitas, erupción fisural, etc.), y permitió que algunas páginas web (Instituto Geográfico Nacional, Instituto Volcanológico de Canarias, Actualidad Volcánica de Canarias, etc.) fueran puntos de información regularmente visitados por una población que ansiaba estar bien informada. Pudimos conocer las dificultades y las deficiencias en la puesta en funcionamiento de un plan de emergencia por fenómeno volcánico. Convivimos durante semanas con multitud de acrónimos: CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), IGN (Instituto Geográfico Nacional), INVOLCAN (Instituto Volcanológico de Canarias), PEVOLCA (Plan de Emergencia Volcánica del Gobierno de Canarias), UME (Unidad Militar de Emergencias), etc.

La erupción también dejó un amplio espacio para la polémica. La gestión del Comité Científico del PEVOLCA (constituido por científicos del IGN -responsables de la vigilancia volcánica- y del CSIC -como asesores de los anteriores-; al que el INVOLCAN asistió simplemente como invitado) generó críticas en muchos ámbitos. Se les criticó que las evaluaciones del riesgo estuvieron llenas de incertidumbres y con errores en la predicción a corto y medio plazo, lo que condicionó las decisiones del PEVOLCA. Estos fallos fueron relacionados con la competencia en exclusiva de la vigilancia volcánica concedida al IGN, institución responsable de la sismología en España, pero sin especialistas en vulcanología, oceanografía o geología marina. También se detectó la falta de cooperación entre las distintas instituciones que en España investigan en los campos de las ciencias de la Tierra y de los océanos, y la escasa integración de los recursos científicos y técnicos disponibles. Llamó la atención que no se hubiera contado con la cooperación de instituciones de países con amplia experiencia en el seguimiento de erupciones como Italia, Islandia o Japón. Y resultaron poco edificantes las declaraciones, descalificaciones, desprecios y ninguneos vertidas en los medios de comunicación que pusieron de relieve las más que evidentes diferencias entre los grupos de investigación que siguieron, tanto la actividad sísmica previa, como el proceso eruptivo.

La erupción también dejó un regusto amargo en los habitantes de El Hierro. Los herreños habían soportado, con inquietud y expectación, las incomodidades y sobresaltos de la etapa sísmica previa a la erupción que había transformado el placentero ritmo de vida de la isla. Confiaban en que una erupción volcánica tranquila, similar a las del vulcanismo reciente de La Palma y Tenerife, se convertiría en un singular espectáculo de la naturaleza y en un reclamo turístico valioso. El atractivo de una erupción

volcánica y su gestión podían significar un nuevo aval para El Hierro, en su apuesta decidida por la sostenibilidad. Un nuevo recurso de valiosas connotaciones culturales, paisajísticas, ecológicas y turísticas, que se podría sumar al que puede ser considerado el espacio marino más impresionante de Canarias: El Mar de Las Calmas.

El esfuerzo de los herreños por proteger y conservar su patrimonio natural es evidente en este espacio marino de elevada calidad medioambiental en el que, a petición del sector pesquero, se creó la Reserva Marina La Restinga – Mar de Las Calmas. Esta zona también constituye un lugar único para el estudio de los zifios debido a la abrupta pendiente de sus fondos submarinos y a la presencia de poblaciones residentes a lo largo del año. Y además, en este entorno se ha desarrollado un sector turístico que ha apostado por la calidad en el buceo y las actividades subacuáticas.

Sin embargo, la erupción volcánica, poco violenta, aconteció en el fondo del mar, ocultando a los ojos de los herreños y de los potenciales visitantes, la belleza salvaje de un espectáculo de estas características. Pero además, la erupción afectó de lleno al Mar de Las Calmas y a todas las actividades pesqueras, comerciales y turísticas de La Restinga. La crisis volcánica provocó que se procediera a la evacuación de La Restinga y a la prohibición de las actividades pesqueras y subacuáticas. Una extensa mancha verdosa, debida a las emanaciones sulfúreas, se extendió por el mar al sur de la isla, con fragmentos de lava humeante en suspensión y miles de peces muertos arrojados a la costa. Lo que inicialmente se presagiaba como un incentivo de atracción turística se fue transformado en una verdadera pesadilla, ocasionando pérdidas económicas elevadas debido a la paralización de la actividad económica. La erupción había afectado a su patrimonio natural máspreciado. Afortunadamente, todo el proceso eruptivo se cerró sin tener que lamentar daños personales.

Un año después, en el otoño de 2012, con la perspectiva de análisis que aporta el paso del tiempo, el IEHC convocó el octavo ciclo de conferencias instaurado para recordar y homenajear al profesor Telesforo Bravo, bajo el lema *‘El Hierro: nacimiento de un volcán’*, con el propósito de reflexionar y discutir sobre esta erupción volcánica, sobre los ecosistemas marinos afectados y documentar los efectos que en esos momentos ya habían sido valorados. El programa se inició el lunes 26 de noviembre con la presentación por el Presidente del IEHC, Nicolás Rodríguez Muzenmaier, y los organizadores del ciclo, Jaime Coello Bravo y Julio Afonso Carrillo, tanto del programa de la semana científica, como del libro de actas del ciclo anterior, *‘Agricultura en Canarias: conciliando tradición y ciencia’*.

El programa de la Semana Científica se desarrolló en el salón de actos de nuestra sede entre el lunes 26 y el viernes 30 de noviembre, con conferencias diarias en horario de 19:30 a 21:00 horas. Las conferencias impartidas fueron las siguientes:

Lunes, 26 noviembre 2012.

Pedro Luis Pérez de Paz: “El Hierro: volcán de naturaleza y melancolía”.

Martes, 27 noviembre 2012.

Carlos Sangil: “Cambios en la biodiversidad vegetal submarina del Mar de Las Calmas tras la erupción volcánica de La Restinga: una oportunidad para profundizar en el conocimiento de los ecosistemas marinos de las islas Canarias”.

Miércoles, 28 noviembre 2012.

Natacha Aguilar: “Volcanes, zifios y otras maravillas de las aguas profundas de El Hierro”.

Jueves, 29 noviembre 2012.

José Carlos Hernández: “Reservas marinas, cambio climático y catástrofes naturales: el caso del Mar de Las Calmas en la isla de El Hierro”.

Viernes, 30 noviembre 2012.

Pedro Hernández: “La erupción volcánica de El Hierro: la importancia de vigilar los volcanes”.

En este libro se reúnen los contenidos de las conferencias científicas impartidas en el IEHC en las sucesivas sesiones la Semana Científica.

En la primera sesión, Pedro Luis Pérez de Paz nos habló de El Hierro sumando a los datos cuantificables, las sensaciones que brotan del alma, sin desprenderse del cariño que profesa a su tierra y a sus gentes. Esta isla le ha regalado una familia y la morriña cuando ha tocado dejar atrás en el recuerdo tantos y tantos rincones inolvidables de la geografía herreña y sentir la melancolía de los que faltan en El Mentidero. En ese variado abanico de vivencias, el profesor Pérez de Paz enmarca la singularidad paisajística de un territorio que resulta definida por las características de los factores físicos (relieve y forma del terreno, consecuencia de la joven naturaleza volcánica del paisaje) y factores bióticos (cubierta vegetal). Declarada por la UNESCO Reserva de la Biosfera, El Hierro es la isla que cuenta con más superficie protegida de todo el archipiélago canario.

En la segunda sesión, Carlos Sangil nos explicó los profundos cambios que la erupción volcánica provocó en la biodiversidad y organización de las comunidades marinas del Mar de Las Calmas. La liberación de elevadas cantidades de CO₂ durante la erupción modificó la química del agua y originó un ambiente de acidez extrema que afectó a todas las poblaciones de organismos presentes en la zona. Sangil nos presenta una evaluación de los cambios detectados en las poblaciones de macroalgas de los fondos rocosos en lugares situados a diferentes distancias del lugar de la erupción.

En ellos se detectó un gradiente desde las zonas más cercanas a las más alejadas de la erupción y se comprobó que, tras una pérdida significativa de organismos perennes dominantes, tuvo lugar un incremento importante de especies de vida efímera que ocuparon temporalmente los fondos antes de que se iniciara la recolonización por la vegetación submarina original.

En la tercera sesión, Natacha Aguilar nos explicó que El Hierro es uno de los pocos lugares del mundo donde se conoce la existencia de poblaciones costeras de zifios durante todo el año. La cercanía de las aguas profundas a la costa permite realizar muestreos desde tierra y la larga serie temporal de seguimiento ha permitido extraer datos sobre aspectos fundamentales de la biología de estos cetáceos. Utilizan el sonido para funciones vitales tan variadas como comunicación, navegación y detección de presas y depredadores. Los chasquidos de los zifios son únicos y su seguimiento permite saber de sus inmersiones profundas de larga duración. Aguilar, que ha contado con todo su equipo de colaboradores en la preparación de su artículo, señala que durante la erupción los zifios residentes no entraron en la zona de “mancha volcánica”, y pasado un año, no se ha observado un impacto evidente en su densidad.

José Carlos Hernández intervino en la cuarta jornada y nos expuso sus reflexiones sobre las reservas marinas, el cambio climático y las catástrofes naturales, vinculándolas con la mejora del conocimiento de cómo funcionan los ecosistemas litorales de nuestras islas. La protección que ofrecen las reservas marinas salvaguarda los hábitats, la diversidad de peces y la potencialidad reproductiva de los mismos, y la Reserva Marina del Mar de Las Calmas ha sido una solución sin precedentes en este sentido. Por otra parte, el calentamiento significativo del agua de mar está favoreciendo la reducción de las poblaciones de algas perennes y la expansión de los erizos, salvo en las reservas marinas donde los depredadores del erizo frenan su expansión. Además, la erupción submarina ha sido una oportunidad única para valorar las respuestas del ecosistema marino a una severa reducción de especies. En la preparación del artículo aquí publicado, José Carlos Hernández ha querido contar con la participación de Sabrina Clemente, con la que ha realizado sus investigaciones en el Mar de Las Calmas, y que de este modo, se une también al homenaje a Telesforo Bravo.

En la quinta sesión, Pedro Hernández nos mostró, que desde el punto de vista científico, la reciente crisis sismo-volcánica de El Hierro ha supuesto una gran oportunidad para avanzar en el conocimiento sobre procesos de reactivación magmática y eruptivos en islas volcánicas oceánicas, y demostrar la importancia de los gases volcánicos como herramienta para vigilar los volcanes. El INVOLCAN materializó un programa geoquímico de vigilancia volcánica mediante campañas de medida de gases en el ambiente superficial de la isla, muestreo y análisis de aguas en pozos y galerías, y seguimiento termográfico de la superficie del

mar sobre el foco eruptivo al sur de La Restinga. Para Hernández, los resultados obtenidos demuestran su gran utilidad en la vigilancia volcánica, con claras señales precursoras de cambios y pulsos en la energía del sistema volcánico y su relación con la dinámica eruptiva.

Ahora, al redactar estas líneas cuando está a punto de cumplirse el segundo aniversario del inicio de la erupción, tengo que reconocer la satisfacción personal por haber tenido la oportunidad de haber sido testigo de un fenómeno geológico excepcional, si lo ubicamos en una escala humana, aunque muy frecuente a escala geológica. Erupciones como la del Mar de Las Calmas han sido habituales en la historia de este archipiélago, surgido del fondo oceánico por sucesivas erupciones, y los fondos insulares están salpicados de cientos de volcanes submarinos similares al originado en El Hierro. Las transformaciones temporales ocurridas en el Mar de Las Calmas y la elevada mortalidad que afectó a la biota marina pueden contemplarse ahora como una breve catástrofe que ya había ocurrido miles de veces en el pasado. La biota marina de nuestro entorno ha soportado repetidamente situaciones similares, y a pesar de ello, es caracterizada en la actualidad por su elevada riqueza y singularidad. Los datos aportados en este libro apuntan hacia una rápida recuperación de los ecosistemas marinos afectados por la erupción. Aunque no habíamos tenido la oportunidad de investigarlo con anterioridad, ahora nos resulta evidente que no podía ser de otra manera en un lugar, como el Hierro, donde los procesos ecológicos naturales se encuentran tan bien conservados.

Como en ciclos anteriores, tanto las jornadas como esta publicación, han contado con el patrocinio de la FUNDACIÓN MAPFRE GUANARTEME. Nuestro agradecimiento a nuestros patrocinadores, cuya sensibilidad es fundamental para mantener este continuado proyecto de homenaje a Telesforo Bravo. También queremos agradecer a todos los conferenciantes, no solo que aceptaran la invitación para participar en la semana científica, sino que además se prestaran a preparar, desinteresadamente, los artículos que aparecen publicados en estas páginas. Por último, señalar que en la organización del ciclo de conferencias participaron Jaime Coello Bravo, Juan Jesús Coello Bravo, Jerónimo de Francisco Navarro, Iris Barbuzano Delgado y el autor de estas líneas, y contó también con la colaboración de la Fundación Telesforo Bravo–Juan Coello.

El cariño con que cada año es acogida esta iniciativa de recuerdo al profesor Bravo quedó reflejada en la asistencia de público a las jornadas. A todos, el agradecimiento del IEHC. Esta publicación es un homenaje de reconocimiento y de recuerdo por parte del IEHC hacia el profesor Telesforo Bravo.

Julio Afonso Carrillo
Vicepresidente de Asuntos Científicos del IEHC

ÍNDICE

Págs.

-
1. **El Hierro: volcán de naturaleza y melancolía,**
por PEDRO LUIS PÉREZ DE PAZ 13 – 53
 2. **Cambios en la biodiversidad vegetal submarina del Mar
de Las Calmas tras la erupción volcánica de La Restinga:
una oportunidad para profundizar en el conocimiento de
los ecosistemas marinos de Canarias,**
por CARLOS SANGIL 55 – 82
 3. **Volcanes, zifios y otros valores naturales de las aguas
profundas de El Hierro,**
por NATACHA AGUILAR DE SOTO, MARK JOHNSON,
PATRICIA ARRANZ, ALEJANDRO ESCÁNEZ, CRISTINA REYES,
AGUSTINA SCHIAVI, PETER MADSEN Y ALBERTO BRITO 83 – 112
 4. **Reservas marinas, cambio climático y catástrofes naturales:
el caso del Mar de Las Calmas en la isla de El Hierro,**
por JOSÉ CARLOS HERNÁNDEZ Y SABRINA CLEMENTE..... 113 – 132
 5. **La erupción volcánica de El Hierro: la importancia
de vigilar los volcanes,**
por PEDRO A. HERNÁNDEZ 133 – 176

1. El Hierro: volcán de naturaleza y melancolía

Pedro Luis Pérez de Paz

*Departamento de Biología Vegetal (Botánica),
Universidad de La Laguna
pperez@ull.es*

El impacto de la naturaleza herreña nadie lo discute. Su objetividad paisajística resulta evidente, más cuando se conoce el dato cuantitativo de que la superficie insular afectada por las diferentes figuras de “espacios naturales protegidos” ronda el 58 %. No es tan fácil encontrar un calificativo adecuado para describir el sentimiento anímico que despierta la contemplación integral del paisaje herreño, es decir, cuando a la componente natural se suma la cultural y la valoración íntima o subjetiva del que contempla.

Admito que el término de “melancolía”, puede parecer excesivamente personal, pero es “mi sentimiento”, y aquí nos hemos propuesto hablar de El Hierro, más que con datos cuantificables, que también, con sensaciones que brotan del alma, sin desprendernos del cariño que profesamos a su tierra y a sus gentes. Esta isla, pequeña y hermosa, me ha regalado una familia a la que quiero, y con la que he compartido momentos de satisfacción y bienestar imposibles de reproducir en ninguna otra parte. También muchas veces sufrir la morriña, cuando ha tocado dejar atrás la silueta de sus jóvenes volcanes; sus lajiales o lavas; las tardes plateadas del mar de Las Calmas; los destellos sugerentes del faro de La Orchilla al anochecer; las noches increíblemente estrelladas de El Pinar; la silueta atormentada de las sabinas en La Dehesa; la soledad eremítica de la Virgen de Los Reyes; las intimistas calles de Valverde, grises y brumosas; el encanto vespertino de los Roques de Salmor; las calzadas gastadas de La Peña o Jinama; la pintoresca soledad de

Sabinosa; la magia del Tagoror del Julan; los espectaculares desplomes de Las Playas; la silueta del pastor con su rebaño, que se difumina entre la neblina de Nizdafe; el lamento sonoro del pito y el tambor en La Bajada; y, sobre todo, sentir la melancolía de los que faltan en El Mentidero.

En ese variado abanico de vivencias, enmarcamos el grueso de nuestra intervención, que no quisimos concluir sin lanzar un reto al futuro, convencidos de que El Hierro no es sólo un paraíso de naturaleza y melancolía. Es un lugar para vivir sus gentes, que no renuncian al progreso, acordes con las corrientes económicas y tecnológicas del siglo XXI, rastreando tierra, mar y aire para intentar mantenerse fieles a los principios de la sostenibilidad medioambiental. No es poco.

Preámbulo

Participar en la “Semana Científica” que desde hace varios años el Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias dedica al ilustre profesor portuense Telesforo Bravo, nos motiva anhelo y responsabilidad. Los discípulos deseamos enaltecer y emular a los maestros, con la misma fuerza que tememos no estar a la altura para elogiar su trayectoria.

Tuve la suerte de recibir el magisterio de don Telesforo, desde las primeras clases universitarias hasta el día de la defensa de mi tesis doctoral y, posteriormente, jamás se interrumpió nuestra relación, fortalecida en expediciones científicas, en actos académicos o en cursos como el que aquí nos trae. Especialmente enriquecedoras, tanto en lo científico como en lo humano, fueron las vivencias compartidas en la visita a las islas Salvajes (1976) y, sobre todo, durante los plenos del Patronato del Parque Nacional de Garajonay (La Gomera), organismo en el que, tras su fallecimiento en 2002, tuve el honor de sustituirlo en representación de nuestra Universidad de La Laguna.

Resulta fácil de comprender la satisfacción que sentimos cuando el compañero profesor Julio Afonso Carrillo, cuerpo y alma de estas Semanas, me invitó a participar en la presente edición. Craso error, ha debido pensar a la altura de cuando escribo estos párrafos, pues si bien es verdad que asistimos puntuales a nuestra intervención oral, pese al temporal de viento y lluvia que asolaba a Tenerife el día de la fecha, tampoco es mentira que la entrega de este manuscrito, una variante posible de mi intervención, se ha prolongado más allá de la confianza que siempre depositó en mí. Vayan, por tanto, adelantadas mis disculpas, revestidas de la profunda gratitud y admiración que le profeso.

Tras comunicarnos la intención de dedicar la “Semana de 2012” a la isla de El Hierro, como atención indisoluble al protagonismo y sufrimiento

marcado por el volcán submarino de La Restinga, y advertirnos de que se nos había reservado la jornada inaugural de carácter introductorio, no fue difícil buscar un título de amplio espectro, que reflejara los valores naturales y destacara la singularidad volcánica y cultural de la isla.

Resulta evidente, pero no es lo mismo hablar en un ambiente determinado, desgranando nuestras reflexiones orales sobre imágenes que se proyectan e incitan al comentario directo y sinérgico con el auditorio, que describir ahora las mismas ante la pantalla fría del ordenador. Ni la motivación, ni el estado de ánimo, ni las palabras pueden ser los mismos. La divergencia se acentúa aún más cuando el tema de la intervención original tuvo diversas connotaciones generalistas, ajenas al estilo cartesiano del método científico.

Nos encontramos ahora ante la necesidad de acotar nuestra comunicación, tratando de encontrar un hilo conductor, que permita vertebrar las diversas consideraciones que entonces expusimos relacionadas con la naturaleza y el devenir cultural herreño. Para ello hemos elegido al “paisaje”, atendiendo a sus componentes “espacial” y “visual”, lo que permite delimitar y caracterizar las principales “unidades paisajísticas” insulares, de acuerdo con su distribución territorial y grado de naturalidad, así como otros aspectos relacionados con la dinámica de su transformación cultural.

Pensamos que, entre los diferentes aspectos ambientales del territorio, tal vez sea el paisaje el que responda a una visión más holística del mismo, por cuanto funde el “cuerpo observado” con el “alma del observador”, el objeto con el sujeto, lo tangible con lo intangible. No todo el mundo ve lo mismo, ni lo mismo es visto por todo el mundo. Fue esa visión personal e intimista la que potenciamos en nuestra intervención oral. Cuando hablamos, los conceptos y las palabras se matizan con el tono y forma de expresarlas y hasta con eso que ha dado en llamarse “lenguaje gestual o corporal”. Conscientes de que no reunimos cualidades literarias para relatar todo eso por escrito, recurrimos ahora a la socorrida “ficha descriptiva”, más técnica y esquemática, para describir las 15 *unidades* reconocidas para el paisaje herreño, con algunas *subunidades*.

Introducción

El Hierro, que no alcanza los 270 km² de superficie, es la más pequeña de las islas mayores del Archipiélago Canario. También es la más joven, habiéndose construido la práctica totalidad del edificio insular en el último millón de años, circunstancia que determina el que gran parte de su territorio se encuentra salpicado por más de un centenar de conos volcánicos, que han derramado su lava en extensos malpaíses, siendo incontables los *volcanes* que han participado hasta la fecha en la

construcción del edificio insular. El último el de La Restinga (octubre, 2011), submarino, que los herreños no han visto, pero sí sentido y sufrido.



Fig. 1. Detalle de una joven “sanjora” (*Aeonium hierrense*) plena de vitalidad; y de una provecita vecina de El Pinar, que desde la ventana de su casa nos inspira ternura y melancolía. Exponer una visión combinada y equilibrada entre la “natura y cultura” de El Hierro, apoyándonos en la riqueza natural y cultural de su paisaje, fue nuestro principal objetivo en la intervención oral.

Resultado de la juventud insular es el motivo por el cual los barrancos son relativamente escasos y poco profundos, circunstancia que además de determinar la geomorfología insular, ha repercutido históricamente tanto en la escasez insular de agua como en la rentabilidad de los suelos aptos para el cultivo.

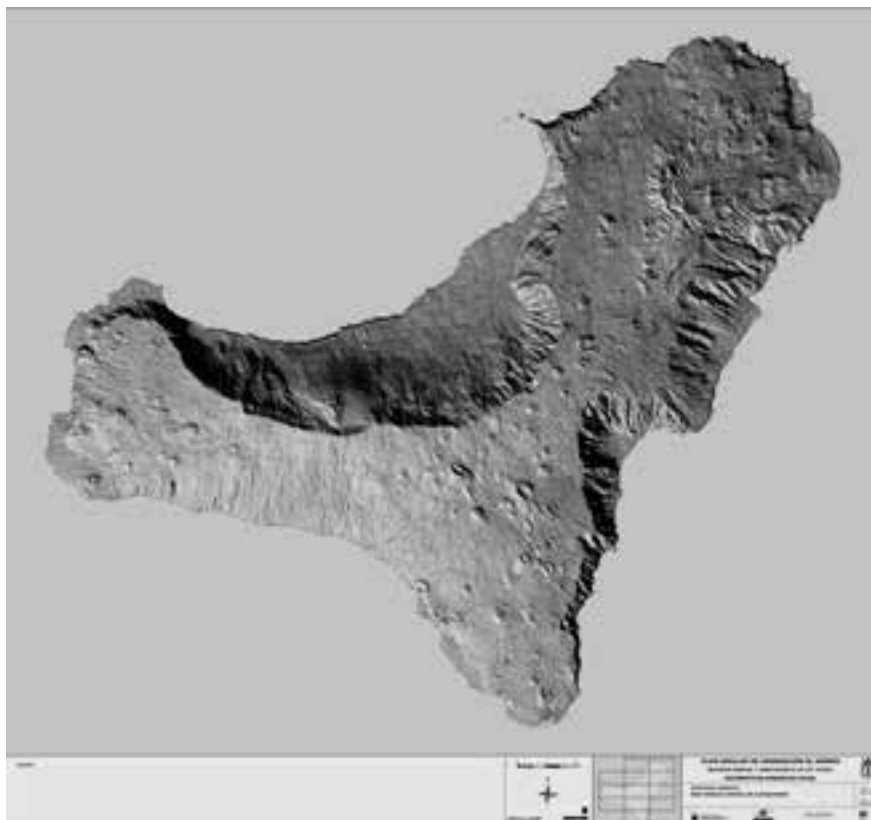


Fig. 2. El Hierro, tal como se observa en la imagen del modelo de elevación digital insular, bien podría definirse como un volcán de volcanes. Más de un centenar de conos volcánicos, perfectamente definidos, salpican la superficie insular, que aparece estrangulada por los espectaculares deslizamientos del arco de El Golfo, mirando al noroeste, y el de Las Playas al sudeste. Fuente: documento inédito PIOH (Cabildo Insular de El Hierro, 2008).

La población insular, que no supera los 10.500 habitantes según el padrón de 2005, se reparte en los municipios de Valverde (capital insular), La Frontera y El Pinar. Globalmente representa una densidad poblacional de 39 habitantes por km^2 , inferior a la tradicionalmente “despoblada” Fuerteventura, y muy por debajo de la media regional, que ya supera los 260 habitantes por km^2 . Pese a ello, la demografía herreña ha experimen-

tado una apreciable recuperación a partir de 1970, cuando con apenas 5.500 habitantes de hecho, se registran los valores más bajos del pasado siglo XX, debido a la emigración de la postguerra. Sin embargo, el incremento poblacional de los últimos años ha ido aparejado a la mayor proporción de viejos, a causa de la caída de la natalidad y del regreso de muchos emigrantes de etapas anteriores, lo que ha convertido a El Hierro en la isla más envejecida de la región. Dato que con toda seguridad también contribuye a incrementar la aludida percepción de *melancolía*.

Acerca del paisaje herreño

En buena medida, la singularidad paisajística de un territorio viene definida por las características y el grado de armonía entre los factores físicos y bióticos que lo integran. Entre los primeros destacan el relieve o forma del terreno; entre los segundos resulta determinante la cubierta vegetal.

En relación con El Hierro, cabe destacar el gran protagonismo que en el aspecto físico imprime la joven naturaleza volcánica al paisaje y a la geomorfología insular, que condiciona las formas y amplitud de las cuencas visuales.



Fig. 3. Hornito en los malpaíses de Montaña Quemada, al sur de la isla, sobre Tacorón. En la imagen se percibe toda la fuerza que imprime el volcanismo reciente a la geomorfología y al paisaje insular.

Entre los parámetros bióticos, es la vegetación la que determina con mayor notoriedad la percepción del paisaje, no solo en los ecosistemas forestales o arbóreos (sabinar, monteverde o pinar), sino también en los arbustivos o herbáceos (tabaibales, cardonales, iramales, cerrillares, pastizales, etc.). La presencia del mar, siempre permanente en el horizonte visual, es también un factor determinante, como el grado de desarrollo del mar de nieblas en el arco de El Golfo, donde tamiza la luz y atempera su clima.

El sol y la luminosidad característica de la vertiente meridional insular son elementos naturales consustanciales al paisaje de la zona. La ausencia o escaso desarrollo de mar de nubes, la humedad ambiental relativamente baja, la suave fragancia de los pinos, y los largos atardeceres con el sol sobre el mar plateado de Las Calmas, iluminando las despobladas laderas del Julan, configuran un paisaje de singular belleza, cuando se contempla desde los promontorios de las medianías. Desde El Pinito, en Los Jables, el panorama es realmente espectacular: no pudo encontrar el abuelo y cronista insular, José Padrón Machín, otra atalaya mejor para inspirarse y escribir sus memorables crónicas, mezcla de realidad y fantasía. Es además, una de las contadas panorámicas del Archipiélago que nos permiten observar un territorio de tan vasta amplitud sin el impacto visual de edificaciones. Desde la distancia, el emblemático Faro de la Orquilla se integra en la inmensidad del paisaje, y hay que esperar la caída de la noche, para que sus evocadores destellos denuncien su presencia en los confines del mundo precolombino.



Fig. 4. Los Jables desde El Pinito, con el Mar de Las Calmas al fondo. Pese a ser un territorio que ha sufrido la presión secular del pastoreo y la agricultura de secano, la sensación de aplacerada naturalidad resulta innegable.

En la percepción del paisaje, resulta determinante el grado de antropización del territorio, especialmente cuando su uso ha sido intensivo, con actuaciones de carácter difícilmente reversible, tales como deforestaciones y roturaciones, asociadas a los usos agrícolas o ganaderos; construcción de infraestructuras (carreteras, puertos, aeropuerto, embalses, invernaderos, etc.); o la servidumbre urbana de los pueblos. No en vano, el paisaje es uno de los factores ambientales más afectados por los cambios y modos de uso del suelo, y en la medida que esos cambios se perciben o impactan sobre los potenciales observadores, suele determinarse la fragilidad del paisaje que observamos o evaluamos.



Fig. 5. Invernadero en la costa de Tacorón. Las características, tanto ambientales (elevada naturalidad y baja capacidad para absorber impactos) como de la infraestructura (materiales, tipología y envergadura), desvelan la fragilidad visual del paisaje e incrementan el impacto de la construcción.

Desde la perspectiva antrópica uno de los aspectos que imprime carácter al paisaje rural herreño son las paredes o muros de piedra, utilizados para delimitar las fincas, proteger del viento y de los animales a las higueras, cercar al ganado, etc. Están presentes de mar a cumbre y sin duda constituyen un rasgo que, aunque compartido con otras islas, adquieren en El Hierro especial relevancia. Su contemplación incita a valorar el esfuerzo titánico de nuestros antepasados, pues en la actualidad han pasado a engrosar la lista de lo que se ha dado llamar “paisajes del abandono”, que a la vez que despiertan nostalgia, invitan a la melancolía. No se añora volver a ese pasado, sin duda mucho más duro que el presente,

pero resulta inevitable que tanto esfuerzo abandonado escape a la sensación de tristeza o pesadumbre. Tanto si son las paredes de la cerca derrumbadas, como las higueras moribundas que antaño se protegían del ganado. El mismo sentimiento se despierta cuando en nuestro deambular por el campo tropezamos con una era, un aljibe o un pajero en ruinas. Es como si tomásemos conciencia repentina de la finitud de las obras humanas, de la fugacidad de la cultura, frente al potencial de la naturaleza.



Fig. 6. Pajero abandonado cerca del poblado de Guinea, en La Frontera. Los rastreles desnudos, sin colmo ni tejas, y las paredes semiderruidas invadidas por la vegetación natural, evocan tristeza.

Esta pincelada introductoria acerca del paisaje herreño, no puede concluir sin resaltar el rico patrimonio natural insular, que conjuntamente con el cultural motivó que El Hierro fuese declarado por la UNESCO *Reserva de la Biosfera*, el 20 de enero de 2000. En su ámbito, la protección ambiental se concreta en las *Zonas de Especial Conservación* (ZECs) de la *Red Natura 2000* y en las figuras de la *Red Canaria de Espacios Naturales Protegidos* (ENPs).

En proporción a su tamaño, El Hierro es la isla que posee más superficie protegida de todo el Archipiélago: el 58,1 %. Gran parte de esta extensión está ocupada por el Parque Rural de Frontera, espacio en el que confluyen actividades agrarias, ganaderas y forestales con aspectos de elevado interés paisajístico, cultural y científico.



Fig. 7. El Hierro es la isla que, en proporción al tamaño, posee más superficie protegida de todo el Archipiélago: el 58,1 %. En esta panorámica desde el filo de la cumbre, con La Palma sobre el horizonte, pueden contemplarse los brezales de El Golfo en el Parque Rural de Frontera (H-4), en primer término; además de la Reserva Natural Especial de Tibataje (H-3) y la Reserva Natural Integral de los Roques de Salmor (H-2), en segundo plano.

En los demás espacios protegidos priman los valores ecológicos (Reservas de Mencáfete y Tibataje) o paisajísticos (Monumento Natural de Las Playas y Paisaje Protegido de Ventejís), pero ninguno de ellos es tan grande ni diverso como el Parque Rural de Frontera que ocupa casi la mitad del territorio insular (46,4 %). En estos espacios se encuentran representados todos los hábitats de la isla, desde los halófilos y xerófilos costeros a los bosquetes termófilos de sabinar, el monteverde de El Golfo, que desborda la cumbre, o los pinares que coronan por la vertiente meridional. Especies muy populares son el lagarto gigante (*Gallotia simonyi machadoi*) o la sabina (*Juniperus turbinata* ssp. *canariensis*), respectivos símbolos animal y vegetal de la isla, entre otras menos conocidas aunque también de alto interés científico como la extremadamente rara haya o faya herreña (*Myrica / Morella rivas-martinezii*) descubierta en el monte de El Pinar. Lo mismo que el lagarto, es especie prioritaria de la *Directiva Hábitats*.

A escala insular, tal como ya se adelantó, se han reconocido 15 *unidades paisajísticas*, que en unos casos se delimitan claramente por la geomorfología y, en otros, su deslinde resulta más difuso, al ser la vegetación, los usos del suelo u otras especificidades ambientales las características que las perfilan (Tabla 1).



Fig. 8. Los sabinares herreños son la mejor representación en el Archipiélago de este hábitat prioritario de la *Red Natura-2000*. Pocos lugares como el Sabinar de La Dehesa consiguen sobrecogernos tanto el espíritu, sobre todo cuando el observador sufre el tormento incesante del viento, que modela las formas caprichosas y esculturales de los troncos seculares de estos árboles.

Tabla 1. Unidades y subunidades paisajísticas de El Hierro

1.- Tenesedra-Echedo:	8.- El Verodal.
1.1.- Acantilado de Agache.	9.- Las Playas.
1.2.- Meseta de Tenesedra.	10.- Bintó-La Dehesa.
2.- Tamaduste.	11.- El Julán:
3.- Lomos de Vetejís – Valverde.	11.1.- Zona forestal.
4.- Nizdafe.	11.2.- Costa y medianía.
5.- Ajones-Temijiraque-La Caleta.	12.- El Pinar-Tembárgena:
6.- Laderas de Azofa.	12.1.- El Monte.
7.- El Golfo:	12.2.- La Costa.
7.1.- Arco de El Golfo.	13.- La Orquilla.
7.2.- El Matorral.	14.- El Lajjal-La Restinga.
7.3.- Sabinosa.	15.- Las Esperillas-Icota.

Las unidades paisajísticas encuentran respaldo cartográfico en el mapa adjunto (Fig. 9), en el que se han agrupado en 4 macrounidades, que hemos denominado: A. Azofa / B. El Golfo / C. Las Playas / y D. El Julán.

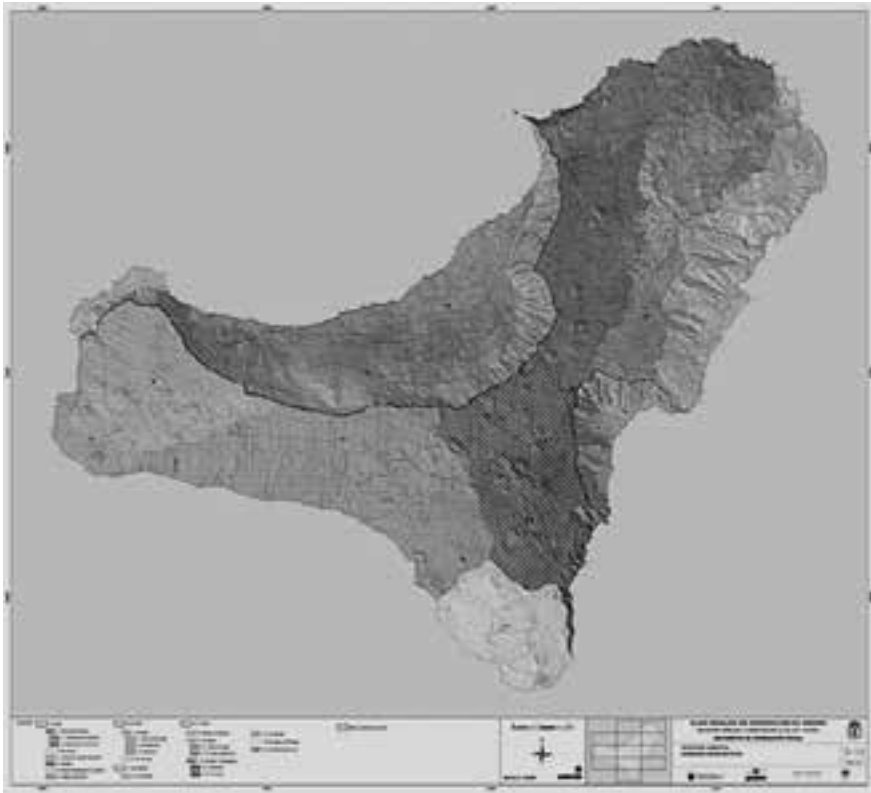


Fig. 9. Mapa de las 15 *unidades paisajísticas* reconocidas. En su caso, con trama, las *subunidades* diferenciadas. Fuente: documento inédito PIOH (Cabildo Insular de El Hierro, 2008).

A continuación se hace una descripción sinóptica, a modo de ficha, para cada una de las unidades, destacando aquellos aspectos que en mayor o menor grado contribuyen a configurar el paisaje, así como sus aptitudes y limitaciones. El texto se ilustra al menos con una foto, que ayuda a formarse una idea mejor de la unidad comentada, aunque a veces solo nos aporte una visión parcial.

UNIDAD 1.- TENESEDRA-ECHEDO

Visualización: Territorio muy antropizado por el pastoreo y los intensos cultivos de antaño. En la actualidad, predominantemente abandonado, excepto en la zona de Echedo, está tramado por paredes que delimitan pequeñas parcelas en las que crecen viñedos, pastizales áridos y matorrales. Se trata de un paisaje abierto sobre el mar, muy expuesto y, según el lugar, se observa o no el acantilado costero, que en la parte más desarrollada se ha diferenciado como una subunidad independiente.

Geografía: Comprende la meseta baja y el acantilado costero del extremo norte insular, desde el nivel del mar hasta los 400 m de cota media superior. Pendiente moderada, predominantemente del 5-25 %, excepto en conos volcánicos, barranqueras y acantilado costero, donde a menudo supera el 50 %.



Fig. 10. Valle de Arelmo o costa de Tancajote, bajo Erese y Guarazoca. Resaltan las paredes sobre un paisaje antropizado, que sin embargo se percibe como armónico y seminatural, debido a la ausencia de elementos discordantes.

Geomorfología: Relativamente homogénea, salpicada por algunos conos volcánicos y cruzada de sur a norte por una trama de barrancos incipientes, colgados sobre el acantilado costero, que alcanza su mayor desarrollo en el tercio más occidental. La costa es en general muy recortada, con algunas plataformas (Pozo de Las Calcosas) y pié de derrubios.

Vegetación: Predominantemente herbácea (pastizales áridos con gramíneas anuales o perennes) o matorrales de moderado desarrollo con predominio de irama (*Schizogyne sericea*), calcosa (*Rumex lunaria*), verode (*Kleinia neriifolia*) y tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*). En cotas más altas destaca la presencia de granadillo (*Hypericum canariense*) y espinero (*Rhamnus crenulata*). Esporádicamente resaltan en el paisaje individuos aislados o rodales de sabina (*Juniperus turbinata* ssp. *canariensis*). El entorno de Echedo está muy marcado por la fenología de los viñedos, según las estaciones.

Valoración: Paisaje rural, que a pesar de su elevada antropización se percibe como seminatural por la ausencia de caseríos en la mayor parte del territorio. La zona tiene escaso interés botánico y moderado interés faunístico, excepto el área afectada por la *Reserva Natural Especial de Tibataje*, H-3 (ZEC+ZEPA). Al margen del área protegida, y de los hitos de mayor interés natural (conos volcánicos, barranquillos y promontorios con relictos de vegetación, etc.), la unidad ofrece aptitud para los usos tradicionales (ganadería y agricultura). La proliferación en los últimos años de edificaciones aisladas debe ser controlada, regulando la tipología y evitando su dispersión excesiva.

UNIDAD 2.- TAMADUSTE

Visualización: Pequeña unidad diferenciada por el volcanismo reciente, con predominio visual de conos de lapilli y malpaíses. Cautivo entre el mar y el acantilado se asienta el núcleo urbano de Tamaduste, ubicado junto a la caleta marina del mismo nombre. A parte del núcleo principal, resaltan algunas viviendas dispersas en los alrededores, así como la huella de extracción de áridos, entre parcelas de viñedo y el matorral laxo de vegetación natural costera.



Fig. 11. Vista parcial de la caleta y núcleo urbano de El Tamaduste sobre el malpaís litoral, respaldado por el antiguo acantilado insular sepultado por lapillis y lavas más recientes.

Geografía: Ubicada en el extremo nororiental de la isla, entre Punta Amacas y la caleta de Tamaduste. El desnivel altimétrico es de unos 200 m, desde el mar hasta el filo superior del acantilado. La escasa pendiente en su parte litoral, donde no supera el 10 %, aumenta progresivamente a medida que nos aproximamos al acantilado, donde adquiere valores muy elevados, por encima del 50 %.

Geomorfología: Malpaís que conforma una pequeña isla baja, delimitada hacia el interior por un acantilado de coladas y piroclastos basálticos. El acantilado alcanza los 200 m. en su parte meridional y desciende hasta los 100 según se avanza hacia el norte en Punta de Amacas. En la costa destaca la caleta que, abrigada al oleaje frecuente de la zona, sirve de embarcadero y zona de recreo.

Vegetación: Sobre el malpaís crece un matorral abierto de irama (*Schizogyne sericea*) con algunas tabaibas (*Euphorbia balsamifera*) y verodes (*Kleinia neriifolia*). Fuera del ángulo visual de la foto, a la izquierda, se interna el antiguo acantilado poblado por un tabaibal halófilo, salpicado de cardones (*Euphorbia canariensis*). Sobre las lomas y laderas de lapilli destaca la vinagrera o calcosa (*Rumex lunaria*), muy abundante en esta parte de la geografía insular.

Valoración: La diferencia esencial de la unidad la aporta la juventud volcánica del territorio, que se enmarca en un contexto general más antiguo. El núcleo poblacional de Tamaduste combina el carácter de residencial fijo con el de veraneo temporal, sumado a la incipiente pretensión turística. Otros usos son la caza y pesca esporádicas. En resumen, aptitud paisajística y cultural: existen interesantes yacimientos arqueológicos en la zona, circunstancia a tener presente en la delimitación del futuro suelo urbanizable.

UNIDAD 3.- LOMOS DE VENTEJÍS – VALVERDE

Visualización: Unidad en la que se combina el carácter rústico-montano del territorio con el asentamiento urbano de Valverde, capital insular, estratégicamente situada fuera del alcance visual desde la costa. Además de este núcleo urbano incluye otros menores, que se apoyan en la carretera de El Mocanal. La orografía, deforestada y con cárcavas de erosión, se ve afectada con frecuencia por las nieblas y vientos alisios, que convierten la estancia en desapacible, pero también benefician la agricultura y promueven la regeneración de la vegetación.

Geografía: Área comprendida entre Tenesdra, Echedo y Nizdafa, volcándose al sureste sobre las laderas de Tiñor y la comarca de Azofa. Abarca desde los 400 m, en sus partes septentrionales más bajas, hasta los 1.137 m del macizo de Ventejís (Ventijís, dicen otros), con pendientes

medias comprendidas entre el 20-40 %, que se acentúan hasta el 50 % en las laderas de las montañas de Ventejís y Pedraje.

Geomorfología: Desde las montañas más elevadas de Ventejís y Pedraje, irradian una serie de barranquillos poco profundos, pero notables en una isla joven y sin grandes barrancos. Ocasionalmente con pendientes acentuadas, el territorio está modelado por algunos conos de cinder, más o menos afectados por la erosión.



Fig. 12. A la izquierda, estribación nordeste del macizo de Ventejís, parcialmente recolonizada por brezales. A la derecha, el casco urbano de Valverde, capital insular.

Vegetación: Muy alterada por roturaciones relacionadas con la agricultura y la ganadería. No obstante, en el macizo de Ventejís permanecen algunos relictos de fayal brezal, en su mayoría secundarios, que atestiguan el dominio potencial del monteverde en la zona y sus posibilidades de regeneración. Son muy aparentes las plantaciones exóticas de pinos y cipreses. El resto son matorrales ralos de tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*) y calcosa (*Rumex lunaria*), intercalados con tomillares, hinojales y herbazales propios de las medianías frescas.

Valoración: Paisaje eminentemente rural, pese a incluir el núcleo urbano de la capital insular, y otros de menor entidad como El Mocanal o Tiñor. El conjunto conforman un paisaje rural, insistimos, con restos testimoniales de agricultura y ganadería. Desde una perspectiva forestal y ambiental, es importante resaltar la óptima aptitud del macizo de Ventejís para llevar a cabo un proyecto de repoblación con monteverde. Aptitud paisajística, forestal y agropecuaria. De excepcional importancia para el proyecto hidroeléctrico “Gorona del Viento”, es la La Caldera de Tiñor, o de La Gorona como ya aparece referenciada en algunos mapas. La unidad está

parcialmente afectada por el *Paisaje Protegido de Ventejís*, H-6 (Garoé: ZEC+ZEPA).

UNIDAD 4.- NIZDAFE

Visualización: Nizdafe (o Nisdafe) es una meseta, inclinada al norte, salpicada de conos volcánicos, que incluye como principal núcleo poblacional al pueblo de San Andrés. Destacan las fincas mayoritariamente dedicadas al pastoreo, delimitadas por muros de piedra seca, donde todavía se ven pastar vacas, ovejas e incluso burros y caballos. Son notables las plantaciones de tagasaste, más cuando los cubre su floración nívea. Muy aparentes son también las plantaciones de pino y los pequeños enclaves de fayal-brezal. El conjunto conforma un paisaje rural abierto, con marcada fenología estacional y clara vocación agropecuaria.



Fig. 13. El Hierro hasta fechas recientes ha sido un territorio eminentemente pastoril y ganadero. La imagen del pastor con su rebaño al pie de Montaña Timbarombo, evoca un pasado que se difumina entre la niebla del presente. Los feraces pastos de Nizdafe en invierno, se complementan con las plantaciones de tagasaste, que se explota sobre todo en verano.

Geografía: Altiplanicie de forma trapezoidal situada en el sector central del NE insular. Presidida por el pueblo de San Andrés, queda delimitada por las laderas de Azofá, al sureste, y la depresión de El Golfo al noroeste. Registra altitudes desde los 600 m en el extremo norte, hasta los 1.300 m de La Mareta, en la cabecera sureste. Pendiente relativamente baja, entre el 5-10 %, salvo en el sector norte donde aumenta al 15-20 %, al caer hacia la costa

de Tenesedra. Una excepción constituyen las laderas de los conos de cinder, donde se alcanzan valores próximos al 50 %.

Geomorfología: Meseta aplanada con ligera pendiente hacia el norte, salpicada por una decena de conos volcánicos. Hacia el oeste se corta en el acantilado que cierra la depresión de El Golfo por naciente. En toda el área se advierten fenómenos de erosión, cárcavas y regueros, minimizados por las cercas de paredes que delimitan las fincas.

Vegetación: Eriales colonizados por herbazales y tomillares, ocupando terrenos con pasado agrícola, sobre todo para la siembra de cereales y leguminosas. En las inmediaciones de San Andrés, lo mismo que sobre algunos conos volcánicos, se han plantado pinos, sobre todo el pino insigne o de Monterrey (*Pinus radiata*). Las plantaciones de tagasastes (*Chamaecytisus proliferus* var. *palmensis*) son muy importantes, tanto por su uso forrajero como por su benefactor papel bio-ecológico al fijar nitrógeno y evitar la erosión. Más esporádicos son algunos rodales de fayal-brezal.

Valoración: Espacio de reconocida tradición agrícola y ganadera, actualmente en franca regresión, ofreciendo como contrapartida la posibilidad de llevar a cabo una operación integral de adhesionamiento mediante la plantación de especies autóctonas, sobre todo fayas, brezos y algunas otras especies del monteverde. Interés didáctico y turístico (captación de nieblas, “Garóé”). Aptitud paisajística, agropecuaria, forestal y cultural. Marginalmente la unidad está afectada por el *Paisaje Protegido de Ventejís*, H-6 (*Garóé*: ZEC+ZEPA).

UNIDAD 5.- AJONES-TEMIJIRAQUE-LA CALETA

Visualización: Paisaje modelado por la topografía pendiente de las laderas embarrancadas, que se desploman, a veces de forma acantilada, sobre el mar, ocultando la vista para el observador desde tierra, y abriéndola para los que miran desde el mar o el aire, pues no debe olvidarse que la zona queda en el aérea de influencia del puerto y aeropuerto. En su ámbito se alterna la naturalidad de los acantilados, con la antropización presente en las zonas del aeropuerto, puerto de La Estaca y la de los pequeños rellanos costeros, con núcleos poblacionales más o menos dispersos: La Caleta, La Estaca, Temijiraque (también llamado Timijiraque o Tijimiraque), y Las Playecitas, curiosidad nomenclatural en Canarias, donde habitualmente se dice “playitas”, para referirse a pequeñas calas o caletas con arena.

Geografía: Faja de la vertiente oriental insular, entre El Tamaduste y el acantilado que cierra Las Playas en Punta de la Bonanza, llegando por el interior hasta la cima de las laderas que culminan desde Isora hasta Valverde. La topografía, a veces acantilada, va desde el nivel del mar hasta los 700 – 800 m de altitud. Acorde con el desnivel es la pendiente, que si se

exceptúa la explanada de Los Cangrejos, ocupada por el aeropuerto, y los sectores de La Mareta y Las Playecitas, oscila entre el 25-50 %, cuando no la supera en los acantilados.

Geomorfología: Acantilados, riscos y laderas con abundantes derrumbes o pie de risco de origen erosivo. Entre cortas y encajadas barranqueras, destacan algunos barrancos sobre Temijiraque como los de mayor desarrollo en la isla. Aunque escasos aparecen algunos conos de cinder, siendo notables los malpaíses, “islas bajas”, de Los Cangrejos (aeropuerto) y Temijiraque. En el litoral alternan escarpes, junto a pequeños acantilados y diminutas playas de arena o callaos.



Fig. 14. Panorámica del litoral de La Estaca-Temijiraque. Aunque la unidad concentra algunas de las principales infraestructuras insulares (aeropuerto, puerto, central eléctrica, etc.), conserva comunidades halófilas y barrancos con enclaves de gran interés natural.

Vegetación: En general muy alterada, tanto por los usos tradicionales como por las infraestructuras que encuentran asiento en la unidad. Pese a ello, conserva algunos de los mejores enclaves con comunidades de cinturón halófilo costero (espectacular en Punta de Ajones e inmediaciones), así como las de tabaibal (*Euphorbia balsamifera*) y cardonal (*Euphorbia canariensis*), desde Tamaduste a Temijiraque. En cotas más superiores, aparecen sabinas (*Juniperus turbinata* ssp. *canariensis*) dispersas, sin llegar a conformar sabinares en la actualidad, siendo dominantes los matorrales de sustitución con: tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*), jara (*Cistus monspeliensis*), calcosa (*Rumex lunaria*), incienso (*Artemisia thuscula*) y,

en cotas inferiores, irama (*Schizogyne sericea*), entre otras. Junto a los citados matorrales adquiere gran presencia el cerrillar (*Hyparrhenia sinaica*), que imprime color al paisaje con su tono pajizo. En cuanto a singularidades florísticas, es notable la presencia del cabezón herreño (*Cheirolophus duranii*) sobre Temijiraque.

Valoración: En la unidad se concentran varias de las infraestructuras insulares de mayor envergadura (puerto, aeropuerto, central eléctrica, carreteras y túneles -Temijiraque y La Bonanza- y, la última, el novedoso proyecto integral hidro-eólico de Gorona del Viento); algunos núcleos poblacionales tradicionales (La Caleta, La Estaca) o emergentes (Temijiraque y Las Playecitas); junto a notables valores naturales (cardonales, tabaibales) y culturales. Aptitud natural y paisajística, compatible con las infraestructuras existentes, necesarias en una isla habitada. La unidad engloba al *Paisaje Protegido de Temijiraque*, H-7 (ZEC).

UNIDAD 6.- LADERAS DE AZOFA

Visualización: Paisaje rural en el que se mezclan los núcleos de los asentamientos poblacionales (Isora, La Cuesta, Las Rosas) con pequeñas huertas cultivadas y eriales. Dentro de la unidad destaca el enclave industrial de El Majano, en cuyas inmediaciones existe también un vertedero de residuos no orgánicos (punto limpio y chatarra, etc.). Se trata de un paisaje bastante abierto, que desde la meseta de Nizdafe se descuelga en ladera suave hacia el sureste.

Geografía: Unidad intercalada entre la meseta de Nizdafe (otros escriben Nisdafe) y las laderas sobre Temijiraque, descritas anteriormente. Limita al norte con las montañas de Ventejís sobre los 1000 m de altitud y al sur con los impresionantes acantilados que dibujan el filo occidental del arco de Las Playas, alrededor de los 600 m de cota. En conjunto forma una meseta de pendiente media moderada, que no suele rebasar el 15 %, salvo en hitos locales como los conos volcánicos.

Geomorfología: Unidad de transición entre la meseta de Nizdafe y las laderas o escarpes de Temijiraque y Las Playas. En su contexto destacan algunos conos de cinder de escasa elevación; la colada del Majano, que alcanza el mar por Temijiraque; y la presencia de una fuerte ruptura de pendiente en su límite oriental, para caer sobre Las Playas.

Vegetación: Muy alterada por el secular uso agropecuario. Eriales ocupados por pastizales de medianías, solapados con parcelas de tagasaste (*Chamaecytisus proliferus* var. *palmensis*) y fragmentos de matorrales banales con calcosa (*Rumex lunaria*), tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*) y, en laderas más estabilizadas, sobre leptosoles, jarales de *Cistus monspeliensis*. Mayor naturalidad presentan las comunidades

desarrolladas sobre el malpaís subreciente de El Majano con distintas especies de crasuláceas (*Aeonium* y *Greenovia*) y cerrajas (*Sonchus hierrensis*). Localmente es significativa la población de poleo herreño (*Bystropogon origanifolius* var. *ferrensis*) que se aprecia en el primer plano de la foto. Como en el resto de la meseta de Nizdafe, destacan las plantaciones de pinos en pequeños rodales aislados.



Fig. 15. Laderas de Azofa. En primer término, malpaís de Montaña Chamuscada cerca de San Andrés. Caserío de Las Rosas, junto a la montaña del mismo nombre y, al fondo a la derecha, la Montaña de Timbarombo.

Valoración: Territorio muy antropizado, con aptitud paisajística rural, en la que cabe la delimitación geoestratégica del polígono industrial de El Majano, muy vinculado a la tradición agropecuaria de la zona. Más impactantes resultan la cantera de áridos de Entremontañas y la chatarra del Punto Limpio del Dar.

UNIDAD 7.- EL GOLFO

Visualización: Arco topográfico que conforma la mitad septentrional de la isla, con desigual grado de naturalidad: casi óptima en la mitad superior, disminuye progresivamente a medida que avanzamos hacia la costa. Es en la plataforma más baja donde aparecen los núcleos poblacionales, además de concentrar la mayor actividad agrícola insular, con sus correspondientes infraestructuras asociadas: balsas, almacenes, invernaderos, carreteras,

canales, etc. En el sector central, menos abrupto, la topografía es disimulada por la vegetación. No ocurre lo mismo en los dos extremos del arco, cerrado por las fugas de Tibataje-Gorreta, al este, y los cantiles del Risco de Bascos, al oeste. Consustancial al Valle de El Golfo es el mar de nubes, que condiciona su clima, agricultura, visibilidad, luminosidad, y hasta el modo de ser y vivir sus gentes.

Geografía: En la práctica, abarca toda la vertiente septentrional insular, delimitada por el filo de la cumbre y la línea de costa, desde la Puta de Salmor, al este, hasta la Playa de La Madera, al oeste. Recorre todo el gradiente altitudinal, desde el mar a la cima insular en Malpaso: 1.500 m. La pendiente es muy desigual, casi imperceptible en la plataforma litoral, aumenta suavemente en el sector central, a medida que nos alejamos de la costa, no así en ambos extremos de El Golfo, en los que los acantilados verticales se desploman directamente sobre el mar. Los poblados de la zona, antaño aislados, se han ido fundiendo progresivamente en los últimos tiempos, conformando una matriz dispersa, desde Las Lapas a Tigaday, y desde Frontera a Las Puntas. No ocurre lo mismo hacia el oeste, donde el pueblito de Sabinosa mantiene su tradicional imagen e idiosincrasia.



Fig. 16. Vista panorámica del valle de El Golfo, desde Jinama. Refugio de naturaleza en las zonas más escarpadas, concentra en las medianías y parte baja la agricultura y la maraña de núcleos poblacionales del municipio de La Frontera. Aislado, al fondo de la imagen, se vislumbra el pintoresco pueblo de Sabinosa.

Geomorfología: Determinada por el gran deslizamiento gravitacional o derrumbes del sector central insular. Se diferencian bien las dos zonas comentadas: una llana en el sector central litoral del valle; y otra acantilada,

con algunos conos de cinder, en el S de la unidad, uniéndose ambas por escarpes de pendientes suavizadas por apósitos de dinámica de ladera y coladas o lapillis. La costa se reparte entre alta con pie de derrubios, en los dos extremos; y el resto baja, recortada, escarpada y sin playas. Cabe destacar la existencia de los emblemáticos Roques de Salmor, en el extremo oriental de la unidad.

Vegetación: No cabe en este formato de esquema, a menos que lo hagamos con el detalle que se observa en la foto, desde el panorámico Mirador de Jinama. En ella se adivina la típica zonación altitudinal de la vegetación canaria: basal, mediana y montana, o xerófila, termófila y subhúmeda, desde el litoral a la cumbre. En relación con la xerófila (muy alterada por la acción antrópica), es notable la ausencia de tabaibales y cardonales, lo que se relaciona con la génesis del territorio, marcada por el deslizamiento gravitacional y la relativa juventud de los malpaíses. Las especies más comunes son las primocolonizadoras anemócoras, como la irama (*Schizogyne sericea*), el verdode (*Kleinia neriifolia*) o el cornical (*Periploca laevigata*), entre otras. Mejor se conservan las comunidades de medianías, tanto las arbóreas con sabina (*Juniperus turbinata* ssp. *canariensis*), como las orlas arbustivas con granadillo (*Hypericum canariense*) y espinero (*Rhamnus crenulata*). En esta banda es muy significativa la presencia de algunos castañeros (*Castanea sativa*) y sobre todo viñedos, que en primavera y verano imprimen su singular verdor al territorio. Finalmente, aún mejor conservadas, están las comunidades de monteverde, en el que destaca la significativa presencia de sus especies más termófilas: mocanera (*Visnea mocanera*), palo blanco (*Picconia excelsa*) y barbusano (*Apollonias barbujana*), dentro de la matriz más extendida de brezales con haya (*Myrica* / *Morella faya*), acebiño (*Ilex canariensis*) y laurel (*Laurus novocanariensis*). No se relacionan los múltiples endemismos, de gran valor florístico, refugiados en el sotobosque y enclaves rupícolas.

Valoración: Geomorfológicamente es una de las unidades más características de la isla. De gran singularidad paisajística, conjuga los valores naturales, de su medianía y cumbres, con áreas explotadas para la agricultura intensiva (sorribas e invernaderos) o extensiva, en torno a los principales núcleos poblacionales y El Matorral. En relación con ese grado de naturalidad y la singularidad territorial de los usos del suelo, se han distinguido tres sectores o subunidades. El conjunto encierra gran valor natural (geomorfología, flora, fauna, vegetación y paisaje) y cultural, tanto por su pasado arqueológico como histórico, y también por su pujanza presente. Compromete cuatro espacios naturales: el más extenso, H-4: *Parque Rural de Frontera*; las *Reservas Integrales de Mencáfete* (H-1) y *Roques de Salmor* (H-2); y la *Especial de Tibataje* (H-3). También

declarados ZEC, además de ZEPA. Destacan, además, la presencia de varias *especies y hábitats prioritarios de la Red Natura-2000*.

UNIDAD 8.- EL VERODAL

Visualización: Pequeña unidad paisajística, separada del accidente de El Golfo por la quilla del Risco de Bascos, que cae vertiginosamente sobre la playa de la Madera. Predomina la naturaleza visual oscura de sus basaltos, sobre los que contrasta el gris-plateado de la irama, con su característica tonalidad grisácea. Por tierra, el paisaje se cierra sobre el acantilado, en el que se apilan materiales diversos, que aportan formas y tonalidades policromas, relacionadas con su composición y naturaleza volcánica. Muy llamativo por el color, resulta el promontorio de Tosca Amarilla, que se aprecia parcialmente en la foto.

Geografía: Situada en el extremo noroccidental de la isla, ocupa una pequeña faja costera (isla baja) al pie del antiguo acantilado muerto, que alcanza en su filo superior los 400 m de altitud. Las pendientes bajas o moderadas (5-10 %) del malpaís y base del acantilado, se acentúan en el mismo, más del 50 %.

Geomorfología: Presenta dos partes bien diferenciadas: el litoral relativamente llano conformado por un malpaís encrespado de lavas recientes; y el antiguo acantilado costero, en el que se apilan materiales de diferentes etapas eruptivas y por el que discurren coladas y conos de derrubios. La costa, un bajo y recortado acantilado, en el que la erosión marina ha separado roques y labrado caprichos (Puentes de Gutiérrez), está enmarcada por las pequeñas playas de El Verodal, al suroeste, y de Arenas Blancas, al nordeste.

Vegetación: Reducida al cinturón halófilo costero, en el tramo más oriental expuesto al alisio; y matorrales de irama (*Schizogyne sericea*) con otras especies más ocasionales como calcosa (*Rumex lunaria*), verode (*Kleinia neriifolia*) o tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*) entre otras. De cerca, resulta llamativo el colorido que, en las lavas expuestas al hálito marino, proporciona los líquenes (diferentes especies de los géneros *Xanthoria*, *Caloplaca*, *Ramalina*, *Dimelaena*, etc.) En los malpaíses sorribados y fincas abandonadas, crecen comunidades banales de terófitos halo-nitrófilos.

Valoración: Pese a la presencia frustrada de las sorribas de Hoya del Verodal, el conjunto desprende naturalidad, con la geomorfología como protagonista principal. Desde la perspectiva del uso actual del territorio, cabe señalar la pequeña playa del Verodal (o Bahía de Los Reyes), que en una isla con tan pocas playas es bastante utilizada por bañistas, atraídos por su arena rojiza y el sol de poniente, pese a su fama traicionera por las fuertes corrientes. Aptitud paisajística y natural. Los ensayos agrícolas han sido fallidos y, por el momento, se ha descartado su uso turístico, al margen

del baño. Es zona tradicional de pesca. La Unidad se enmarca dentro del *Parque Rural de Frontera* (H-4) y está reconocida como ZEC.



Fig. 17. Costa de El Verodal y promontorio freatomagmático de Tosca Amarilla. Sobre los malpaíses oscuros, resalta el gris plateado de la irama, muy abundante en la zona.

UNIDAD 9.- LAS PLAYAS

Visualización: Paisaje cerrado de gran fuerza natural, que tiene dos visiones características, la lateral, en la fotografía, y la cenital, desde el “Mirador de Las Playas” ubicado en lo alto del acantilado. Ambas de gran calidad visual y con el contrapunto del mar y el acantilado. Cabe destacar la presencia del singular Roque de La Bonanza, símbolo de identidad insular. Con escasa presencia humana, en su ámbito se localiza el Parador de Turismo, lo que contribuye a la afluencia excepcional de visitantes y resaltar su interés.

Geografía: Contrapuesto al valle de El Golfo, el arco de Las Playas, estrangula la vertiente oriental insular, entre las puntas de La Bonanza y de Miguel. Conforman un impresionante farallón, que se levanta desde el nivel del mar hasta los 900 m de altitud, rozando en muchos casos la verticalidad y, por tanto, con desniveles superiores al 50 %.

Geomorfología: Espectacular ejemplo de deslizamiento gravitacional, que dejando al descubierto las entrañas geológicas de la isla, conforma un acantilado abarrancado con conos de derrubios a sus pies. El litoral, escarpado en los extremos, resulta más suave en el tramo central, donde la

plataforma sedimentaria se aplacera y recorta el arco de la playa más extensa de la isla con callaos, grava y arena estacional.



Fig. 18. Arco de Las Playas: paisaje de espectacular geomorfología, que atrajo la atención para construir el Parador de Turismo. La decisión ha sido muy controvertida por el aislamiento estratégico del resto de la isla, y también por el elevado coste de la carretera de acceso.



Fig. 19. Roque de La Bonanza, “el oso frente al elefante”. Situado en el espléndido marco de Las Playas, se ha convertido en un referente insular de notable curiosidad turística.

Vegetación: El cinturón halófilo del litoral, siempre con la omnipresente irama (*Schizogyne sericea*) donde se respira el hálito marino, da paso a un complejo de comunidades que se agolpan en el acantilado. Destaca el matorral de cornical (*Periploca laevigata*), que evidencia el dominio potencial de antiguos cardonales arrastrados por el deslizamiento y que ahora vuelven a recuperarse testimonialmente sobre los acantilados. Junto a ellos, se reconocen retazos de retamar (*Retama rhodorhizoides*), solapados con cerrillares de *Hyparrhenia sinaica*. En los cantiles y espolones de medianía gana presencia la sabina (*Juniperus turbinata* ssp. *canariensis*), que progresivamente deja paso al pinar canario, dominante en la faja superior del acantilado. La flora rupícola se enriquece con algunos endemismos insulares o regionales, pero sin protagonismo en el paisaje.

Valoración: Unidad de elevado atractivo paisajístico, por la fuerza de la geomorfología y su componente natural (H-5: *Monumento Natural de Las Playas*). Las únicas trazas de antropización vienen dadas, en la faja costera, por la presencia de la carretera que da acceso al Parador de Turismo, así como por algunas construcciones dispersas, cuya proliferación debe ser cuidada y limitada, tanto el aspecto residencial como turístico. Aptitud paisajística y natural.

UNIDAD 10.- BINTO-LA DEHESA

Visualización: Paisaje rural que rezuma aislamiento y soledad por la ausencia de caseríos u otras infraestructuras notables. En medio de este panorama ventoso y desolado, se levanta la ermita de la Virgen de Los Reyes, patrona insular, que actúa como centro de peregrinación. La antropización viene determinada por la existencia de algunas pistas agroforestales y las vallas o paredes que encierran al ganado pastando o acotan la entrada del mismo. Sobresalen algunos conos volcánicos y el emblema de las sabinas abanderadas de La Dehesa, símbolo vegetal insular.

Geografía: Cuña territorial del centro-occidental insular, que se abre al mar entre los malpaíses del El Verodal, al norte, y de La Orchilla, al sur. Se levanta desde la costa, en acantilado primero y meseta después, hasta la cumbre de Binto rozando los 1.200 m. de altitud. La pendiente es muy variable según la topografía local: supera el 50 % en el acantilado costero, y oscila entre el 10-20 % de media en el resto.

Geomorfología: Meseta con acentuada caída hacia un acantilado costero. Aparece surcada por una profusa red de barranqueras en medio de una decena de conos volcánicos de desigual tamaño: Montañas de Tembárgena, de La Virgen, Tenaca, Escobar, entre las más sobresalientes.

Vegetación: Sobresale el famoso sabinar de La Dehesa, con vetustos ejemplares retorcidos por la acción casi constante del viento, y que puede ser calificado como una de las mejores y más espectaculares joyas vegetales



Fig. 20. En Binto y La Dehesa se reforestaron muchas zonas. Las plantaciones de mayor entidad fueron de pino canario, como las de la imagen en la hoya entre las Montañas de Tembárgena y de La Virgen.



Fig. 21. Ermita de la Virgen de Los Reyes, patrona insular, que cada cuatro años “baja” desde la soledad de La Dehesa a la capital insular, en una romería cargada de significado etnográfico.

del Archipiélago. Asociado a las sabinas (*Juniperus turbinata* ssp. *canariensis*), aparecen jarales (*Cistus monspeliensis*), con tabaiba amarga (*Euphorbia lamarekii*), así como otros matorrales ralos: de tomillo (*Micromeria hyssopifolia*) con ajinajo (*Echium aculeatum*); cerrillares (*Hyparrhenia sinaica*) y, cuando la humedad y características del suelo lo permiten, abundantes pastizales pastoreados que se agostan en verano. Muy notables son las plantaciones de pino canario (*Pinus canariensis*) y pino de Monterrey (*Pinus radiata*), separadas o mixtas. Más testimoniales son las de otras especies, también exóticas, como la acacia mayorera (*Acacia ciclops*), o el ciprés de Monterrey (*Cupressus macrocarpa*).

Valoración: En la zona coinciden tres valores que definen su interés y aptitud: el santuario de la Virgen y la Cueva de Caracol (cultural); los pastos y el pastoreo (uso tradicional); el relicto del magnífico sabinar (natural). Las repoblaciones o plantaciones de pino, también son un aspecto a valorar, por haberse realizado en terrenos muy inhóspitos con mucho esfuerzo. La unidad se enmarca en el *Parque Rural de Frontera* (H-4); en parte es ZEC y, en general, ZEPA. Los sabinares, además, son *hábitat prioritario de la Red Natura-2000*.

UNIDAD 11.- EL JULAN

Visualización: Paisaje abierto sobre el Mar de Las Calmas, muy expuesto por su acusada pendiente y el carácter ralo de la vegetación arbórea, ausente en sus partes bajas, y que va incrementándose progresivamente a medida que se avanza a la cumbre con la presencia de sabinas, primero, y pinos después. Los elementos antrópicos, muchos seculares en su origen, apenas son perceptibles, al diluirse en la grandiosidad del paisaje. Sólo fijando mucho la atención, se advierte el rasguño de algunas pistas, el cerco de las higueras o el ramoneo de las cabras sobre la vegetación. Tal vez por eso, resulte más llamativo el canto del gran invernadero en la costa de Tacorón (antaño se decía Tecorón), que rompe el éxtasis del encanto y apeándonos del Tagoror de la imaginación nos devuelve a la realidad. Es entonces cuando se advierte que observar la apacible imagen de los cuervos volando o posados en su oteadero, tal vez sembrando sin saberlo una sabina, resulta una experiencia difícil de repetir en nuestro tiempo.

Geografía: Abarca la mayor parte de la vertiente suroccidental insular, desde el litoral hasta la cumbre y desde Los Jables hasta Binto. Como en el caso de El Golfo por el norte, la altimetría va desde el nivel del mar hasta los 1.500 m. del alto de Malpaso. Desnivel que resulta aún más espectacular porque se alcanza en menos de 4 km de distancia sobre el plano, en una ladera relativamente regular con una pendiente media sostenida en torno al 25 %.

Geomorfología: Al margen de la pendiente, ya resaltada, la orografía es relativamente suave, interrumpida solamente por algunas barranqueras de moderado desarrollo, que en una visión panorámica, ajena al enfoque local, pasan desapercibidas y terminan empastadas en una resultante de aparente continuidad. La costa, salvo en el malpaís bajo de Tacorón, es escarpada con pequeñas playas de callao al pie de los cantiles o conos de derrubios. Los conos volcánicos son marginales, en la frontera del límite con otras unidades.



Fig. 22. Laderas del Julan pobladas de sabinar y, en cotas más altas, pinar. Paisaje que a su singular imagen de naturalidad suma notables valores culturales. En el contexto ambiental, impacta la presencia del invernadero en la costa de Tacorón.

Vegetación: En la zona baja, muy rala y camuflada con el paisaje, se vuelve progresivamente aparente al ganar altura, destacando la buena salud de los jóvenes sabinars (*Juniperus turbinata* ssp. *canariensis*), que se recuperan lentamente; y el progreso más acelerado del pinar (*Pinus canariensis*), beneficiado por las repoblaciones y la mayor pluviometría de la cumbre. Entre las especies del matorral de la zona baja, son frecuentes: irama (*Schizogine sericea*), verode (*Kleinia neriifolia*) y tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*). Pese a su porte herbáceo resultan muy llamativos, por el tono pajizo que imprimen al paisaje durante la mayor parte del año, los cerrillares de *Hyparrhenia sinaica*. Sobre los jables terrosos labrados de las medianías, los cerrillos se mezclan con la comunidad pionera de ajinajo y tomillo (*Echio-Micromerietum hyssopifoliae*), que corona el sur de la cumbre de Malpaso.



Fig. 23. Tagoror del Julan. Conjuntamente con Los Letreros y Los Números conforman un conjunto arqueológico de interés primordial.

Valoración: Es uno de los paisajes emblemáticos de la isla, y hasta de Canarias, en el que a sus valores visuales debe añadirse la importancia histórica del lugar. Aquí se encuentra una de las zonas más ricas en grabados rupestres: Los Letreros, Los Números, El Tagoror, cuevas de habitación, concheros, etc., conformando uno de los conjuntos arqueológicos más completos del Archipiélago. En función, sobre todo, del protagonismo de la vegetación, se han diferenciado dos subunidades paisajísticas (zona forestal / costa-medianías). Aptitud paisajística, natural, cultural y de ocio (pesca, baño, senderismo). Salvo el área excluida de la Hoya y costa de Tacorón, de pretendido valor agrícola y futuro turístico, el resto está íntegramente afectado por el *Parque Rural de Frontera* (H-4), parte del cual es ZEC y en otras sólo ZEPA.

UNIDAD 12.- EL PINAR-TEMBÁRGENA

Visualización: Unidad de la vertiente meridional insular, en la que se diferencian dos claras subunidades: la zona forestal con buenas muestras de pinar y fayal brezal, de clara vocación natural, aunque alberga algunos enclaves con frutales (higueras y almendreros); y otra de neto matiz rural, con los núcleos de Taibique y Las Casas, en general mucho más antropizada, tradicionalmente cultivada con frutales (almendreros, damasqueros, cirueleros, durazneros, higueras, tuneras, etc.), viñedos que se han potenciado en los últimos tiempos, y hasta cereales, testimoniales en la actualidad. La agricultura pierde protagonismo, a medida que se desciende

hacia el sur, permaneciendo únicamente algunas higueras, entre las sabinas y pinos dispersos, que también desaparecen al llegar a los malpaíses más recientes de Los Lajiales.

Geografía: Localizada en el centro meridional de la isla, que se extiende desde la cumbre de El Golfo hasta Los Lajiales sobre La Restinga. Por el este limita con el time de los acantilados marítimos de Las Playas-Esperillas-Icota, y por el oeste con Los Jables del Julian. Conformar una meseta en ladera, que desciende desde los 1.317 m. del Pico Tenerife, hasta los 200 m de cota. La pendiente resulta bastante irregular, alternando laderas en las que supera el 25 % con rellanos en los que no alcanza el 5 %.

Geomorfología: Definida por la dorsal volcánica del sur, que se manifiesta por la elevada presencia de conos volcánicos en todo su ámbito. Los barranquillos son incipientes y de escaso desarrollo, con frecuencia están cegados por el volcanismo más reciente. Es notable la disyunción con el acantilado, que rompe bruscamente la pendiente.



Fig. 24. Casas de Taibique, desde el mirador de Montaña Tanajara. Conjuntamente con Las Casas, conforman el núcleo principal del joven municipio de El Pinar, formalmente constituido como Ayuntamiento el 15 de septiembre de 2007.

Vegetación: La *subunidad forestal* alberga, en la cumbre, un fayal-breza arbóreo y pinos plantados, que se benefician de la influencia de las nieblas que rebosan desde El Golfo. Singular es la presencia en el mismo de la rara faya o haya herreña (*Morella rivas-martinezii*), especie prioritaria de la

Directiva Hábitats. Progresivamente el monte verde se deshace entre el pinar genuino de la vertiente meridional. En los claros aparecen jables primocolonizados por tomillo (*Micromeria hyssopifolia*) y brezo (*Erica arborea*), entre otras especies menos significativas. En la subunidad inferior el pinar se abre progresivamente, desalojado por los cultivos y desplazado por el dominio potencial de la sabina (*Juniperus turbinata* ssp. *canariensis*), aunque escasa en la actualidad debido a la deforestación secular y a la lenta capacidad de regeneración del sabinar. La zona baja, más árida, en la que los cultivos están completamente abandonados, constituye un erial ocupado por cerrillares de *Hyparrhenia sinaica* y matorrales de cornical (*Periploca laevigata*), que incorporan elementos frecuentes de la vegetación xerófila: verodes (*Kleinia neriifolia*), tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*), bejeque herreño (*Aeonium valverdense*), calcosa (*Rumex lunaria*) o rarezas locales como la margarita *Argyranthemum sventenii*.

Valoración: La subunidad forestal tiene aptitud natural y paisajística. La inferior debe dar cabida al crecimiento natural de los núcleos de Taibique y Las Casas, buscando la forma que equilibre las lógicas pretensiones sociales con el descontrol de la tendencia a la dispersión desmesurada advertida en los últimos tiempos. Del mismo modo deben considerarse las actividades agropecuarias tradicionales compatibles con el paisaje típico de la zona. Dicho de otra forma, las actividades tradicionales no deben considerarse como un factor de distorsión, sino parte del paisaje. No debe olvidarse la naturaleza, pero tampoco la cultura. Parcialmente afectada por el *Parque Rural de Frontera* (H-4): ZEC y, en la parte más rural, solo ZEPA.

UNIDAD 13.- LA ORCHILLA

Visualización: Paisaje volcánico de alta naturalidad y calidad visual, dominado por los productos y estructuras volcánicas de la dorsal occidental, apenas alterados por la meteorización. Las zonas más antiguas (primer término de la foto), quedan relegadas a las cotas más altas de la unidad o a islotes en medio de las lavas más recientes. Están colonizadas por tabaibales caducifolios, que ofrecen una fugaz estacionalidad: verdes en invierno, pronto pierden las hojas y aparentan secos y ocres el resto del año. Muy llamativos resultan también los cojines plateados de la irama, que contrastan con el oscuro volcánico.

Geografía: Unidad situada en el sector más suroccidental de la isla, que hasta la edad moderna fue el punto más occidental del mundo. De superficie reducida, se extiende desde el nivel del mar hasta los 400 m de cota. La plataforma costera, mayormente ocupada por la montaña y malpaíses de La Orchilla, es de pendiente suave (5-10 %), acentuándose en las laderas de las montañas, y llega a la verticalidad en el cantil costero.



Fig. 25. Malpaíses y Montaña de La Orchilla que, tras su silueta, apenas deja ver la torre del Faro. En primer término, sobre terrenos más antiguos, tabaibales dulces y amargos.

Geomorfología: De nuevo estamos ante una pequeña isla baja, ocupada por un malpaís con buenas manifestaciones de lavas *pahoe-hoe*, que se alternan con los más escarpados de lavas *aa* y rellanos de lapilli próximos a la Montaña Orchilla, cono de cinder que supera los 200 m e imprime carácter al lugar. Hacia el nordeste aparece un acantilado escalonado que cierra la Montaña de Las Calcosas. En general, la costa es un joven acantilado, recortado por la erosión marina y, a veces, disimulado por sus propios derrubios.

Vegetación: Bastante pobre, a veces reducida a un laxo matorral de irama (*Schizogyne sericea*), entre el que crece un fugaz velo de terófitos, los años favorecidos por las lluvias invernales. En los islotes y ladera más antiguos, crece un espectacular tabaibal dulce (*Euphorbia balsamifera*), atravesado por la carretera que conduce al Faro, y que en las cotas más altas salpica algunas sabinas (*Juniperus turbinata* ssp. *canariensis*), viejas y depauparadas por la aridez del clima. Más extendida está la tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*) que, junto con la irama estructura la comunidad pionera sobre los lapilli de la zona.

Valoración: Paisaje volcánico, que acrecienta la inmensidad del mar y la evocadora imagen del mítico faro de La Orchilla, punto más occidental de Europa, guardián del antiguo “Meridiano 0” y máximo símbolo de la identidad insular. Muy negativa es la discutible presencia del vertedero insular, cuya ubicación no creemos idónea. Es verdad que no resulta fácil proponer una alternativa, menos de consenso. Aptitud natural, paisajística

cultural. La Unidad completa está dentro del *Parque Rural de Frontera* (H-4) y declarada como ZEC y ZEPA.

UNIDAD 14.- EL LAJIAL-LA RESTINGA

Visualización: Espectacular malpaís y hermoso nombre con el que le han bautizado los herreños. El Lajial es un mar de lava y volcanes que se prolonga por el sur más allá de los confines de la isla, como bien nos ha ilustrado la reciente “crisis volcánica” vivida, sentida y sufrida por los herreños en general, y los vecinos de La Restinga en particular. Paisaje de evidente impronta geológica, debe también su identidad a las comunidades pioneras vegetales que lo pueblan, en ocasiones tan solo líquenes, y solo a veces especies de mayor presencia. En la punta más meridional de la isla y del Archipiélago, tras la Montaña de La Restinga se esconde el pueblito marinero del mismo nombre, que a su arraigada tradición pescadora suma en los últimos tiempos la actividad recreativa y deportiva del turismo. Al lugar se llega, desde los núcleos altos de El Pinar, por una carretera que serpentea entre lavas, que siendo negra se camufla bastante con el paisaje.



Fig. 26. Vista general del malpaís de Los Lajiales, desde la carretera de Tacorón. En este mar, no muy lejos del litoral surgió el reciente volcán de La Restinga, que no logró emerger.

Geografía: Situada en el extremo meridional de la isla, entre las Puntas del Miradero y de Las Lapillas, forma recodo en La Restinga y progresa hacia el interior hasta contactar con la zona baja de Los Jables-Tembárgena. Por el este limita con el time del acantilado de Las Esperillas-Icota. Ascende

desde el nivel del mar hasta los 400 m. de cota con una pendiente bastante regular y progresiva, menos en algunos sectores del oeste y del nordeste donde alcanza el 20 %, inclinación que se supera en las laderas de algunas montañas.

Geomorfología: Malpaís mixto con lavas *pahoe-hoe* y *aa*, conformando un amplio y espectacular “mar petrificado”, fruto de las emisiones de media docena de conos volcánicos, algunos muy bien conservados y de una gran plasticidad visual, otros alterados en mayor o menor escala por la huella de la extracción de picón.

Vegetación: En el litoral aerófilo crecen las especies características del cinturón halófilo costero, como el tomillo marino (*Frankenia ericifolia*) o la pequeña siempreviva (*Limonium pectinatum*). En el malpaís, junto a la vegetación liquénica, es muy característica la participación de sanjoras o bejeques (*Aeonium valverdense*), y otras especies anemócoras y xerófilas propias de la zona baja: verode (*Kleinia neriifolia*), cornical (*Periploca laevigata*), calcosa (*Rumex lunaria*), junto con la inevitable irama (*Schizogyne sericea*) y las también muy extendidas tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*) y ajinajo (*Echium aculeatum*). En las cotas más altas, en islotes terroso-arenosos, estabilizados, se hacen notar los cerrillares con preponderancia de *Hyparrhenia sinaica*.



Fig. 27. Puerto y casco urbano de La Restinga, presidido por la montaña del mismo nombre. De histórica tradición pesquera, el conjunto se ha consolidado como uno de los principales polos turísticos de la isla, avalado por la creciente actividad submarina.

Valoración: Paisaje natural de calidad indiscutible, con dominancia de elementos abióticos. Tanto las lavas, como los grabados rupestres de la zona más baja realzan el interés de la zona. Algunas extracciones de áridos y el núcleo de La Restinga-Puerto rompen esa naturalidad, pero su pequeña escala no desvirtúa el encanto del lugar. Este pequeño núcleo urbano, aun manteniendo la pluralidad de usos: residencial, turístico, pesquero, debe planificarse con visión de futuro, al objeto de evitar convertir en crónicos los males propios de estos enclaves costeros en el Archipiélago. Todavía es posible, si se quiere y no lo impiden los volcanes. Aptitud natural y paisajística, compatible con el desarrollo moderado y controlado del asentamiento urbano, que con su entorno más inmediato está excluido del *Parque Rural de Frontera* (H-4), que afecta al resto de la unidad, declarada además ZEC y ZEPA.

UNIDAD 15.- LAS ESPERILLAS-ICOTA

Visualización: Abierto al mar, el paisaje da tanto la espalda a la tierra que parece inexistente, hasta que nos alongamos al time o filo del acantilado y se contempla la verdadera magnitud de estos riscos costeros, muy escarpados y de difícil acceso. De apariencia bastante natural, han sido secularmente pastoreados, además de afectados por frecuentes derrumbes motivados por la erosión pluvial y marina. La presencia del mar, casi siempre encrespado por la brisa, que también se deja sentir con fuerza en tierra, incrementa la sensación de naturaleza salvaje.

Geografía: Prolongación topográfica, sin solución de continuidad, del acantilado de Las Playas, que progresivamente se va achicando hacia el suroeste, desde la Punta de Miguel hasta alcanzar el extremo sur insular, en las inmediaciones de La Restinga. Siempre de elevada pendiente, más del 50 %, roza con frecuencia la verticalidad sobre el mar.

Geomorfología: Conformada por pilas de coladas erosionadas, disjuntas por almogros rojizos, dan lugar a pequeños andenes de menor pendiente en los que se refugia la vegetación y por los que se transita con dificultad. Costa muy abrupta, abarrancada y propensa a los desprendimientos y conos de derrubios, tragados por la erosión marina.

Vegetación: Típica en mosaico, muy condicionada por la topografía del terreno y el marcado carácter halófilo de las cotas más bajas. En las medianías y parte alta del acantilado es más diversa, resaltando por su talla la presencia de sabinas (*Juniperus turbinata* ssp. *canariensis*) y algunos pinos (*Pinus canariensis*), que se descuelgan desde la meseta. Los andenes y frentes de colada, menos accesibles para el ganado, sirven de refugio para muchos de los endemismos insulares: *Argyranthemum sventenii*, *Echium hierrensis*, *Sideritis ferrensis*, *Sonchus gandogeri*, etc., más notables por su rareza que por el protagonismo que imprimen a la vegetación.



Fig. 28. Acantilados de Las Esperillas e Icota: cortados por la erosión marina, decrecen progresivamente en altura, a medida que se avanza en dirección sur hacia la punta de La Restinga. En sus andenes, encuentran cobijo algunos de los endemismos botánicos más raros de la isla.

Valoración: Su protagonismo paisajístico se aprecia mejor desde el mar que desde tierra, pues los acantilados llegan a pasar desapercibidos para los transeúntes de la carretera de La Restinga. Su valor natural se relaciona sobre todo con la flora y la fauna. Al pie del cantil marítimo existen algunos nacientes naturales, que en la Playa de Icota se explotan a través de una galería, desde donde se remonta hasta el monte de El Pinar para proporcionar agua potable a una parte importante de la población insular. En el aspecto cultural hay también importantes yacimientos arqueológicos. Aptitud paisajística, natural y cultural.

Epílogo

Como en nuestra intervención oral, queremos concluir este singular paseo teñido de melancolía, con un mensaje de esperanzado optimismo acerca de la realidad insular. El Hierro no solo es la isla más pequeña, sino también la menos poblada, tanto en valor absoluto (unos 10.500 habitantes) como relativo: unos 40 habitantes por km². Sin embargo, o quizás también por eso, es la que arroja mayor superficie cultivada por habitante, que se aproxima a los 3000 m², si se incluyen los pastizales que alimentan la cabaña insular.

En consecuencia, el *sector primario* representado por la agricultura (platanera, piña tropical, vid, algunos frutales y hortalizas), la ganadería, especializada en la producción de leche para la fabricación de queso, y la pesca, constituye el soporte fundamental de la economía insular. Además está organizado en cooperativas de primer grado por parcelas de actividad, con el objetivo de hacer más eficiente su explotación (J.L. García Rodríguez, -inéd.-). Estas prácticas entroncan con las raíces culturales del herreño, lo que unido a la componente natural ya destacada, avalan los méritos para que la isla fuera declarada Reserva de la Biosfera por la UNESCO, el 22 de enero de 2000.



Fig. 29. Captación de agua procedente de la precipitación de niebla en las cumbres del Paisaje Protegido de Ventejís, muy cerca de la localidad histórica del mítico Garoé. La zona reúne, además, condiciones óptimas para llevar a cabo un proyecto de reforestación con flora autóctona. Ambientalmente fue ésta una de las ideas que más nos sedujo dentro de las estrategias de sostenibilidad perseguidas por el Plan Insular de Ordenación (PIOH).

Dentro de ese marco que persigue la utopía de la sostenibilidad, se han venido desarrollando políticas y proyectos insulares dignos de reconocimiento y que prestigian los postulados defendidos por el proyecto Hombre y Biosfera del Comité MaB. Desde 1995, el Cabildo Insular de común acuerdo con la mayoría de los agentes e instituciones sociales, amparados en la Agenda 21 de la Conferencia de Río, el Plan de Acción de Barbados, donde se recogía la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible de las Islas y Pequeños Estados Insulares (1994), la Conferencia Europea Sobre el Desarrollo Sostenible de las Islas (1997), la Carta del Turismo Sostenible, la Carta Europea del Litoral, etc., ha

impulsado una serie de proyectos relacionados con residuos, hidrología (captación de agua de nieblas, promoción de depósitos o aljibes), turismo rural, de salud y deportivo (submarinismo, parapente, senderismo), agricultura y ganadería ecológica, energías renovables, etc.

Resultado de esas políticas ambientales fue la concesión por parte del Gobierno de Canarias del premio *César Manrique de Medio Ambiente 2008* a la isla de El Hierro: “por la apuesta y defensa sin fisuras de los ciudadanos e instituciones de la isla, y, en su nombre, al Cabildo de El Hierro, por un modelo insular sostenible y especialmente respetuoso con el medio ambiente, como referente de un modelo de desarrollo responsable de Canarias”.



Fig. 30. Fotomontaje del proyecto hidroeléctrico *Gorona del Viento*. Convertido en referente mundial de sostenibilidad ambiental en el sector de las energías renovables, no le faltan voces críticas relacionadas con su viabilidad y eficiencia económica.

No obstante, existen herreños que piensan que las repercusiones de tales distinciones, así como el desarrollo de muchos de los proyectos citados, son más de imagen que de sostenibilidad económica real. Tal vez sea así, pero no puede negarse el esfuerzo realizado en busca de un modelo diferente al imperante en otros territorios, también declarados Reserva de la Biosfera, que para nada funcionan como tales. Ejemplos hay, sin necesidad de salir fuera de Canarias.

Es bien sabido que el principal motor económico de la isla sigue siendo la inversión pública, a través de la cual se canalizan cada año considerables

recursos financieros, que de manera directa (subsidios o pensiones) o indirecta (infraestructuras y servicios) han repercutido en la mejora sustancial del nivel de vida de la población insular en las últimas décadas. La práctica parece inevitable de momento, si se quiere salvar el bienestar alcanzado, pero también acarrea consecuencias dañinas relativas a la inercia o al acomodo social que genera.

Bibliografía

- ACEBES, J.R., M. DEL ARCO, A. GARCÍA GALLO, M.C. LEÓN ARENCIBIA, P.L. PÉREZ DE PAZ, O. RODRÍGUEZ DELGADO, W. WILDPRET DE LA TORRE, V.E. MARTÍN OSORIO, M.C. MARRERO GÓMEZ & M.L. RODRÍGUEZ NAVARRO (2004). Pteridophyta, Spermaphyta. *In: Izquierdo, I., J.L. Martín, N. Zurita & M. Arechavaleta (eds.): Lista de especies silvestres de Canarias (hongos, plantas y animales terrestres)*, pp. 99-143. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial, Gobierno de Canarias. La Laguna. Tenerife.
- CEBALLOS, L. & F. ORTUÑO (1976). *Estudio sobre la vegetación y flora forestal de las Canarias occidentales*. 2ª Ed. Cabildo Insular de Tenerife. Santa Cruz de Tenerife.
- DEL ARCO AGUILAR, M., P.L. PÉREZ DE PAZ, W. WILDPRET DE LA TORRE, V. LUCÍA SAUQUILLO & M. SALAS PASCUAL (1990). *Atlas cartográfico de los pinares canarios: La Gomera y El Hierro*. 90 pp.+ Mapas. Sta. Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ PADRÓN, C., P.L. PÉREZ DE PAZ & W. WILDPRET DE LA TORRE (1987). Flora y Vegetación líquénica epífita de los sabinars herreños. *Bibliotheca Lichenologica*, 27: 342 pp. (J. Cramer ed.). Berlín-Stuttgart.
- MARTÍN ESQUIVEL, J.L., H. GARCÍA COURT, C.E. REDONDO ROJAS, I. GARCÍA FERNÁNDEZ & I. CARRALERO JAIME (1995). *La Red Canaria de Espacios Naturales Protegidos*. Consejería de Política Territorial. Vicenconsejería de Medio Ambiente. Gobierno de Canarias.
- MÉNDEZ GUERRERO, M., I. SÁNCHEZ GARCÍA & J.C. SÁNCHEZ REYES (2012). *El Hierro 3D - Convivencia volcánica-Una experiencia de tres días*. El Hierro.
- PÉREZ DE PAZ, P.L. (1982). Isla de El Hierro: Aspectos Botánicos y reserva a proteger. *Vida Silvestre* 41: 2-13.
- PÉREZ DE PAZ, P.L. (2002). Singularidad y fragilidad ambiental del paisaje canario, pp. 145-153 *in* P. Romera García: *Paisaje y Arquitectura en Canarias*. Las Palmas de Gran Canaria.
- PÉREZ DE PAZ, P.L. (2008). El Paisaje en *Plan Insular de Ordenación El Hierro. Adaptación Ley 19/2003*. Vol. B. Tomo 1.1. *Recursos Naturales*. Documento de Aprobación Inicial-Marzo 2008. Inédito. Cabildo Insular de El Hierro.
- VERA GALVÁN, A. (2007). *La Red Europea de Espacios Protegidos Natura 2000 en Canarias*. Servicio de Biodiversidad. Dirección General del Medio Natural. Gobierno de Canarias.

*A Chely, que me ha regalado El Hierro.
A David, que sueña la magia de su paisaje.*

2. Cambios en la biodiversidad vegetal submarina del Mar de Las Calmas tras la erupción volcánica de La Restinga: una oportunidad para profundizar en el conocimiento de los ecosistemas marinos de Canarias

Carlos Sangil

*Departamento de Biología Vegetal (Botánica),
Universidad de La Laguna
casangil@ull.es*

En la biodiversidad y organización de las comunidades marinas del Mar de Las Calmas se produjeron profundos cambios a raíz de la erupción volcánica de La Restinga. Esta erupción volcánica liberó una importante cantidad de CO₂ el cual modificó la química del agua y originó un ambiente de acidez extrema. Todas las poblaciones de organismos presentes en la zona, en mayor o en menor medida, sufrieron los efectos del agua ácida. En el presente trabajo se evalúa una pequeña parte de ellos, en concreto, los cambios que se produjeron en las poblaciones de macroalgas de los fondos rocosos. Para este fin, los datos previos a la erupción volcánica de abundancia de las diferentes especies de macroalgas (porcentaje de cobertura) fueron comparados con datos posteriores a la misma. El alga parda Lobophora variegata, especie predominante en la zona con porcentajes de cobertura media superiores al 85%, resultó especialmente afectada. La cobertura de esta especie se redujo significativamente entre un 80 y 50%. Las localidades de la Reserva Marina más próximas a la erupción resultaron ser las más afectadas. Además de Lobophora variegata, otras macroalgas como las que acumulan carbonato cálcico en sus estructuras (p.ej. Corallinales), también resultaron fuertemente perjudicadas. Las nuevas condiciones ambientales creadas durante e inmediatamente después de la erupción, así como la disponibilidad de sustrato, fueron aprovechadas por

especies alternativas a las predominantes. Entre estas especies destacaron sobre todo organismos efímeros, de ciclos de vida corto, como las algas verdes Cladophora liebetrutii y Pseudochlorodesmis furcellata, el alga parda Padina pavonica, y algas rojas del orden Ceramiales (Ceramium spp., Polysiphonia spp.). El desarrollo de estas nuevas comunidades fue corto puesto que pocos meses después de sufrir el impacto del agua ácida, las poblaciones de Lobophora variagata comenzaron a recuperarse y a recolonizar el nuevamente los sustratos rocosos.

Introducción

La erupción submarina de La Restinga (octubre 2011 – marzo de 2012), está siendo uno de los eventos volcánicos más y mejor estudiados de Canarias, despertando el interés no solo de los geólogos, sino también de los biólogos marinos y oceanógrafos, debido al fuerte cambio que indujo sobre las comunidades marinas del Mar de Las Calmas. A diferencia de las erupciones que se producen en tierra, las erupciones submarinas, como la de La Restinga, tienen como particularidad que muchos de los materiales y gases emitidos alteran en gran medida las propiedades oceanográficas de la columna de agua. En el caso particular de esta erupción la fuerte liberación de gases, entre ellos el CO₂, como se discutirá más adelante, generó un ambiente de acidez extrema que alteró de manera muy significativa a toda la biodiversidad del entorno del Mar de Las Calmas. Esta erupción, dramática en sus consecuencias ambientales, es sin embargo una extraordinaria oportunidad para estudiar la respuesta de nuestros ecosistemas al incremento de la acidez de los océanos, y quizás nos pueda ayudar a comprender mejor los procesos que lamentablemente parece que se van a desencadenar en un futuro próximo.

El Mar de Las Calmas debido sus singularidades florísticas y faunísticas, y a que alberga una reserva marina (Reserva Marina Punta Restinga – Mar de Las Calmas), ha sido una zona muy estudiada en las últimas décadas. Entre los diferentes estudios realizados en esta zona destacan los seguimientos científicos de la Reserva Marina llevados a cabo por investigadores de los Departamentos de Biología Animal y Biología Vegetal de la Universidad de La Laguna. En ellos, además de demostrar el denominado “efecto reserva” (recuperación de las comunidades de organismos por la limitación de las actividades pesqueras) se ha generado una importante cantidad de información sobre las diferentes poblaciones de organismos y comunidades residentes en la zona. Esta circunstancia nos ha permitido valorar de forma muy precisa el impacto sufrido en la zona. Múltiples aspectos, y desde diferentes perspectivas, pueden ser abordados

para analizar los efectos de la erupción volcánica; uno de ellos, los cambios en las comunidades de macroalgas, se presenta en este manuscrito.

Este trabajo se extrae, tanto de los seguimientos de la Reserva Marina, como de dos campañas de investigación que el grupo de investigación de la Universidad de La Laguna, Biodiversidad, Ecología Marina y Conservación, realizó dentro del marco del proyecto “*Evolución del impacto del volcán de El Hierro en la Biodiversidad y los recursos marinos y costeros*” (Brito *et al.*, 2012a,b). El impacto sobre otros grupos de organismos pueden ser consultados en estos informes así como en otro de los capítulos de este libro (Hernández, 2013). Las macroalgas, objeto de este estudio, además de ser los organismos bentónicos que dominan y caracterizan el paisaje submarino de las islas, son excelentes indicadores del estado de los ecosistemas, ya que la organización y estructura de sus comunidades es sensible a los cambios e impactos en el medio ambiente (Sangil *et al.*, 2012a,b). Cambios en la abundancia (cobertura) de algunas especies así como otros parámetros descriptores de las comunidades (riqueza y diversidad) han sido aquí utilizados para evaluar el impacto de la erupción submarina de La Restinga.

En la primera parte de este trabajo se expone cual era la situación de la vegetación submarina del Mar de Las Calmas antes de la erupción. Seguidamente se describe el proceso eruptivo y los cambios en la columna de agua. Se plantean los posibles efectos de estos cambios, y finalmente se exponen y discuten los principales cambios que sufrieron las comunidades.

Características de la vegetación submarina del Mar de Las Calmas previas a la erupción volcánica

Los fondos submarinos de la isla de El Hierro presentan una serie de singularidades remarcables respecto al resto de las islas Canarias. La primera de ellas es que al tratarse de una isla tan joven (<1 millón de años) la costa, así como los primeros metros de la zona submareal, están escasamente remodelados y por tanto los fondos rocosos predominan sobre los arenosos. Las fuertes pendientes dificultan los procesos de sedimentación y los lechos de arena a poca profundidad son limitados. Por otro lado, la inestabilidad de estos últimos evita el desarrollo de amplias poblaciones de macrófitos, los cuales en una gran proporción quedan circunscritos a los fondos rocosos. Además, los fondos de la isla en general destacan por su buen estado de conservación. Gracias a una menor densidad de población, al menor número de actividades nocivas en el mar, así como al empleo de artes de pesca selectivas (donde no está permitido el uso para peces de nasas, tambores o trasmallos), los fondos se encuentran bien estructurados y con elevada funcionalidad. En ellos a diferencia de lo que sucede en el resto de las islas existen poblaciones de predadores de peces

(gallos, pejeperros, tamboriles espinosos o sargos) con densidades suficientes para mantener controladas las poblaciones del erizo *Diadema africana*, herbívoro que en otras islas debido a sus elevadas densidades ha ocasionado la deforestación de los fondos de rocosos convirtiendo los valiosos fondos de macroalgas en los conocidos blanquiales (Hernández *et al.*, 2008; Clemente *et al.*, 2010). Y por último, dada su posición hacia el centro del océano, y alejada respecto al afloramiento de aguas frías de la costa africana, las condiciones oceanográficas de las aguas de El Hierro son significativamente diferentes al resto de las islas, con baja concentración de nutrientes y temperatura más cálida. La mayor temperatura de las aguas tiene importantes implicaciones biogeográficas, tal es así que las especies de afinidad tropical y subtropical, tanto de macroalgas, invertebrados como peces, son más abundantes en El Hierro (Brito *et al.*, 2001; Sangil *et al.*, 2007, 2011b).

En sus primeros metros de profundidad (0-40 m) la vegetación de los fondos rocosos de la isla se caracteriza por estar dominada por el alga parda *Lobophora variegata* (Fig. 1). Esta alga parda (Phaeophyceae) del orden Dictyotales y familia Dictyotaceae, es una especie ampliamente extendida en las zonas tropicales, subtropicales y templado cálidas del océano Atlántico, aunque el máximo desarrollo de sus poblaciones lo alcanza en las zonas tropicales y subtropicales (Guiry & Guiry, 2013). Es un alga modesta en cuanto a sus dimensiones (10-15 cm), y está constituida por una serie de láminas ovaladas que se van renovando periódicamente. Tiene un ciclo de vida diplo-haplonte de alternancia de generaciones isomórficas, con gametófitos y esporofitos indistinguibles salvo cuando presentan sus estructuras reproductoras. Lo más destacable de este alga es sin duda su competitividad ecológica, que le permite colonizar diferentes hábitats desde el intermareal hasta el submareal más allá de los 120 m de profundidad. En El Hierro, y entre 5 y 20 m de profundidad, *Lobophora variegata*, alcanza una cobertura media cercana al 70%, constituyendo comunidades casi monoespecíficas, y donde otras especies como coralinales costrosas, *Canistrocarpus cervicornis*, cianofitas y *Pseudotetraspora marina* apenas intervienen significativamente (cobertura > 1%) (Fig. 2).

En alguna zonas, como sucede en el Mar de Las Calmas la cobertura media de *Lobophora variegata* es aún mayor y supera el 90% (Sangil *et al.*, 2011a). En esta isla, únicamente la sedimentación y el oleaje previene de la monopolización de *Lobophora variegata* (Sangil *et al.*, 2011a,b). En los ambientes con sedimentación, la heterogeneidad, riqueza y diversidad de las comunidades se incrementa. Estas comunidades alternativas están constituidas principalmente por coralinales costrosas, *Canistrocarpus cervicornis*, *Pseudotetraspora marina*, *Jania adhaerens*, *Amphiroa* spp., filamentosas (pequeñas Ceramiales), *Halopteris scoparia*, *Gelidiopsis intricata* y *Padina pavonica*. *Lobophora variegata* está presente pero su

cobertura es muy baja y no supera el 1%. Por otro lado, en lugares expuestos al oleaje domina *Lobophora variegata* pero su cobertura es muy inferior sobre el 40-50%, junto a ésta son comunes *Cystoseira abies-marina*, *Cystoseira compressa*, *Styopodium zonale*, *Asparagopsis taxiformis* y *Pseudochlorodesmis furcellata*.

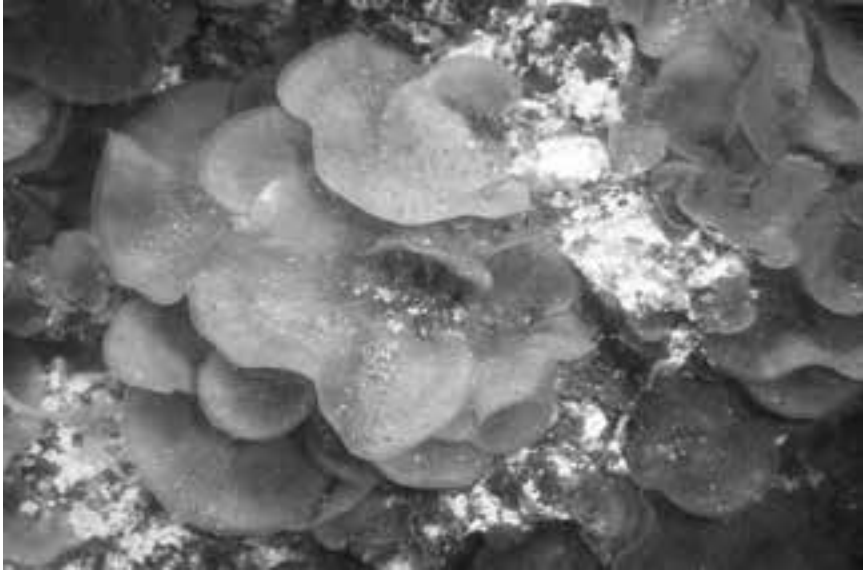


Fig. 1. Detalle del alga parda *Lobophora variegata*, especie dominante en los fondos rocosos submarinos de la isla de El Hierro.

Las comunidades de macroalgas del sublitoral somero de El Hierro difieren significativamente de las de las otras islas del archipiélago canario (Sangil *et al.*, 2011b; Sangil, 2012). Estas diferencias están basadas fundamentalmente en que la mayor cobertura de *Lobophora variegata* y en la menor cobertura de coralinales costrosas. Estas diferencias según Sangil *et al.* (2011b) están basadas fundamentalmente en que las densidades de *Diadema africana* en El Hierro son bajas y no generan cambios significativos en las comunidades como suceden en otras islas. En este trabajo también se señala que la mayor temperatura de las aguas que rodean a El Hierro pueden estimular el mayor desarrollo de *Lobophora variegata* al tratarse esta última de una especie de afinidad tropical. Recientemente Sangil *et al.* (en revisión) comparan comunidades de macroalgas a lo largo del archipiélago en fondos rocosos con bajas densidades de *Diadema africana*, confirmando que las diferencias de las comunidades del El Hierro se deben a la mayor cobertura de *Lobophora variegata* pero también a la menor cobertura de algas del orden Fucales (*Cystoseira abies-marina* y *Sargassum* spp.). Al margen de estas diferencias en la composición de las

comunidades, en este trabajo se demuestra que tanto la riqueza como la diversidad de las comunidades de macroalgas de El Hierro son significativamente inferiores al resto de otras islas. *Lobophora variegata* limita el crecimiento de otros macrófitos, su talo folioso se extiende sobre el sustrato evitando el establecimiento de otras especies, y además posee también potentes defensas químicas que inhiben el asentamiento de esporas o propágulos de otras especies.



Fig. 2. Vista de las comunidades de *Lobophora variegata* en el Mar de Las Calmas.

El evento eruptivo y los cambios en la columna de agua en el Mar de Las Calmas

El 12 de octubre de 2011, después de un intenso periodo sísmico en el que se registraron más de 10.000 terremotos, se constató el comienzo de una erupción submarina en la isla de El Hierro (ING, 2013). Esta erupción de carácter fisural se localizó aproximadamente a 1,8 km del extremo sur de El Hierro. La principal boca por la cual fueron emitidos los diferentes materiales volcánicos se situó en un valle submarino a 363 m metros de profundidad. Al finalizar la erupción y tras casi cinco meses de erupción (la erupción se dio por concluida el 5 de marzo de 2012) la cantidad de materiales emitidos fue tan importante que rellenó el valle submarino y originó un cono volcánico que alcanzó la cota de 89 m de profundidad (Rivera *et al.*, 2013). Al margen de este cono principal, también se constató la presencia de otros conos secundarios. Por el volumen de materiales

emitidos, no solo por la formación de los conos volcánicos, sino también porque los piroclastos y lavas fluyeron por las pendientes submarinas de la isla alcanzando profundidades superiores a 1.000 m, esta erupción ha sido reconocida como una de las erupciones históricas más importantes de las islas Canarias (Pérez-Torrado *et al.*, 2012; Rivera *et al.*, 2013). Junto con materiales sólidos (lavas y piroclastos), esta erupción volcánica se caracterizó por la emisión de una gran cantidad de cenizas, así como dióxido de carbono (CO₂), compuestos del azufre (H₂S, SO₃²⁻, S₄O₆²⁻) y metales (Cu, Cd, Pb, Al), los cuales entre otros efectos tiñeron de un color verde turquesa las aguas en torno a la erupción volcánica (Fraile-Nuez *et al.*, 2012; IEO, 2013; Santana-Casiano *et al.*, 2013).

Tanto lavas como piroclastos y cenizas, provocaron un impacto directo sobre todas aquellas comunidades situadas en la proximidad de los conos de emisión, ya que éstas quedaron total o parcialmente sepultadas. Hablamos de comunidades de corales como *Antipathella wollastoni*, *Stichopathes* spp., y *Dendrophyllia cornigera* entre otras (Brito & Ocaña, 2004). Estos impactos, sin embargo, se pueden considerar menores si los comparamos con todos los cambios que ocurrieron a lo largo del Mar de Las Calmas. Tal es así que los mayores impactos sobre las poblaciones y comunidades de organismos no sucedieron por contacto directo con los materiales sólidos emitidos sino por los cambios en las propiedades físico-químicas del agua.

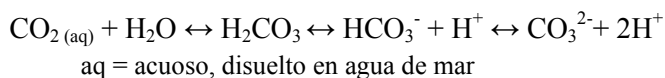
La temperatura del agua y su salinidad variaron en el entorno, aunque los cambios más significativos se registraron en zonas más próximas a la emisión. En la superficie del mar y sobre el cono principal se constató un incremento de más de 15°C respecto a la temperatura de aguas no afectadas por la erupción, y pudieron ser medidos valores anómalos a una distancia de 2 km. La salinidad, por el contrario decreció, y aunque ligeramente, se registraron valores anómalos a casi 6 km de distancia (Fraile-Nuez *et al.*, 2012; IEO, 2013). Por el contrario, el equilibrio ácido-base del agua a lo largo de todo el Mar de Las Calmas se desmoronó literalmente. La fuerte inyección de gases que aportó la erupción, fundamentalmente CO₂ y algunos compuestos reducidos del azufre, generó un desmesurado incremento de la concentración de iones del hidrógeno (H⁺) causando un fuerte descenso del pH (escala que mide la concentración de iones de H⁺, expresada en una escala logarítmica inversa, pH = - log₁₀ [H⁺]), y originando un ambiente ácido, e incluso corrosivo en algunas zonas. La liberación de CO₂ fue tan intensa que la pCO₂ (presión parcial de CO₂) disuelto en agua de mar alcanzó valores entre 12.000 y 150.000 µatm, es decir valores entre 30 y 400 veces superior a la pCO₂ en condiciones normales. El pH por su parte llegó a descender hasta 2,8 puntos, pasando de 8,1 a 5,3 unidades. En adición, los compuestos reducidos del azufre contribuyeron a la disminución del oxígeno disuelto en el agua, llegando al punto de que se detectaron masas de agua anóxicas (Fraile-Nuez *et al.*, 2012). Debido a las corrientes

predominantes (Corriente de Canarias) y a los fenómenos mesoescalares que ocurren al suroeste de las islas (Barton *et al.*, 1994; Aristegui *et al.*, 1997), el agua ácida se dirigió hacia el oeste afectando a todo el Mar de Las Calmas (ver NASA, 2013). El impacto no afectó por igual a la zona, en este sentido se creó un gradiente de acidez desde las zona más próxima (Punta Restinga, en el extremo este de la isla; pH = 6,71), a la zona más alejada (Punta de Orchilla, en el extremo oeste; pH = 7,76) donde el agua ácida ya se había diluido considerablemente (IEO, 2013).

Efecto de la acidez sobre el crecimiento de las macroalgas

Para comprender cuales son los efectos de la acidez del agua sobre el desarrollo de las plantas marinas es necesario hacer una pequeña introducción de los procesos involucrados en el equilibrio del pH. En el agua de mar el pH es un parámetro muy estable que se mueve entre unos límites estrechos. En aguas abiertas el pH es de aproximadamente $8,15 \pm 0,1$ unidades, aunque en el litoral donde la actividad fotosintética es mayor por la presencia de los macrófitos (macroalgas y fanerógamas) su rango de variación es más amplio. Durante el día el pH es ligeramente más alto debido a que las plantas (fitoplancton, fitobentos) “secuestran” CO_2 del medio, reduciendo así la concentración de H^+ , mientras que es ligeramente menor durante la noche debido a que las plantas cesan de captar CO_2 (Hofmann *et al.*, 2011).

En el mar el CO_2 se equilibra con diferentes compuestos en lo que se denomina química del carbono inorgánico en agua de mar. La relación entre los diferentes compuestos está a su vez gobernada por reacciones químicas, dependientes del pH, que se encuentran en equilibrio, tal que:



En condiciones normales (pH $8,15 \pm 0,1$), la proporción de los diferentes compuestos es aproximadamente la siguiente: el 91% del total del carbono inorgánico disuelto en el agua corresponde a HCO_3^- , el 8% a CO_3^{2-} , y únicamente un 1% a CO_2 . El H_2CO_3 es un compuesto inestable que se disocia rápidamente en el agua y por tanto no es contabilizado respecto al resto de compuestos. Pero cuando la pCO_2 se incrementa se produce un reequilibrio de cada uno de los compuestos de carbono inorgánico. Parte del CO_2 reacciona con el agua provocando que el equilibrio se desplace hacia el incremento de la concentración de HCO_3^- (bicarbonato) y H_2CO_3 (ácido carbónico), por el contrario, la concentración de CO_3^{2-} (ión bicarbonato) descende. Al tiempo que estas reacciones de equilibrio se desplazan hacia

el H_2CO_3 y HCO_3^- se produce un incremento de H^+ (iones hidrógeno) y por tanto un descenso del pH. Como ejemplo de cómo cambian las concentraciones de estos compuestos inorgánicos del carbono podemos tomar las predicciones que el IPCC (2007) realiza para el año 2100. Una de las predicciones de este trabajo señala que el pH descenderá 0,5 unidades hasta valores de 7,6. Esto implica que la concentración de CO_2 sufrirá un incremento de unas 250 veces respecto a la concentración a un pH de 8,1; el HCO_3^- también sufrirá un incremento, aunque más moderado y en torno al 24%; mientras que la concentración de CO_3^{2-} se reducirá en un 50% (Roleda & Hurd, 2012; Koch *et al.*, 2013).

Pero llegado este punto, ¿qué supone para el desarrollo de las macroalgas que se produzca un cambio en la concentración y proporción de las diferentes formas de carbono inorgánico, y un descenso del pH?

En cuanto al incremento del carbono inorgánico, la respuesta en teoría y a priori es sencilla. En condiciones normales el carbono inorgánico se encuentra en bajas concentraciones, y podría considerarse un factor limitante, por tanto, un incremento del mismo podría suponer un fuerte estímulo para la fotosíntesis de las macroalgas y consecuentemente para su crecimiento y desarrollo. Sin embargo, la realidad es un poco más compleja ya que dentro del grupo de las macroalgas existen diferencias importantes en la asimilación y captación de las diferentes formas de carbono inorgánico. A grandes rasgos, las macroalgas pueden separarse en tres grandes grupos: algas rojas, pardas y verdes, los cuales a su vez están constituidos por diferentes líneas filogenéticas más o menos separadas entre sí. En general entre estos grupos existen importantes diferencias en la morfología y estructura de las algas, en los pigmentos fotosintéticos, como en la reproducción, pero también en los mecanismos enzimáticos de su metabolismo fotosintético. Muchas de las macroalgas verdes y pardas pueden adquirir indistintamente HCO_3^- y/o CO_2 del medio y por transporte activo a través de sus membranas desde el exterior (columna de agua) al interior intracelular por los denominados mecanismos de concentración de carbono (por sus siglas en inglés conocidos como CCM). Ya en el interior celular, estas algas utilizan el HCO_3^- directa o indirectamente como sustrato para la fotosíntesis. En el caso de las algas que adquieren conjuntamente o como única fuente de carbono el CO_2 existe una enzima, la anhidrasa carbónica, que cataliza el CO_2 en HCO_3^- . Por el contrario, en la mayoría de las algas rojas, la adquisición de carbono inorgánico y en la forma de CO_2 se realiza por difusión pasiva desde el exterior al interior intracelular donde es finalmente utilizado en la fotosíntesis (Hurd *et al.*, 2009).

Teniendo estas consideraciones previas podemos llegar a intuir que no todas las macroalgas se ven beneficiadas por igual con los cambios en las proporciones de los compuestos inorgánicos del carbono. Como ya hemos visto, el compuesto de carbono que más incrementa su concentración es el

CO₂, por tanto las algas que lo utilizan como sustrato serán las principales beneficiadas. Las plantas CCM que utilizan como sustrato el HCO₃⁻ también podrían verse estimuladas pero en la misma magnitud ya que el incremento de la concentración de HCO₃⁻ con el descenso del pH es bastante inferior al CO₂. Estas premisas afortunadamente ya han sido testadas para posibles escenarios de cambio climático, y diferentes experimentos utilizando diferentes presiones parciales de CO₂ (750-1700 µatm) han llegado a la conclusión que los cambios en el pH y la proporción de las formas de carbono inorgánico estimulan significativamente el crecimiento de muchas algas rojas sin el CCM. Sin embargo, en los estudios que se han realizado con las macroalgas con el CCM no se advierte un incremento generalizado y significativo del crecimiento en la mayoría de las especies estudiadas; y por tanto, las plantas con estos mecanismos pueden ser indiferentes a los cambios en la concentración y proporción de los compuestos del carbono inorgánico. La explicación parece estar en que el CCM en condiciones normales es bastante eficiente para las plantas que lo poseen, y el carbono inorgánico aun siendo escaso no es un verdadero limitante de su crecimiento. De alguna forma se podría decir que en condiciones normales las algas con CCM se encuentran “saturadas” de carbono inorgánico y que un incremento significativo de la disponibilidad del mismo no afecta a su crecimiento (Roleda & Hurd, 2012).

Hasta ahora hemos considerado únicamente los efectos del pH sobre la asimilación del carbono inorgánico y hemos mostrado sus posibles efectos sobre el crecimiento de las macroalgas únicamente a unos ciertos niveles y no extremadamente bajos. Pero como sabemos y podemos intuir, los cambios en el pH tienen implicaciones sobre el desarrollo de los organismos mucho más amplias y decisivas, sobre todo en su metabolismo celular y en la estructura de las proteínas. El pH es crucial para los sistemas biológicos por sus efectos sobre las velocidades de las reacciones enzimáticas y la estructura de las proteínas. Por tanto si desciende excesivamente puede tener efectos tóxicos y nocivos para los organismos.

Las enzimas tienen un rango de pH óptimo de “funcionamiento”, ello es debido a que al estar constituidas por proteínas tienen numerosos residuos aminoácidos superficiales e ionizables (Fersht, 1980). Muchos de estos residuos son centros reactivos por los cuales las enzimas se unen a sus sustratos, y por tanto en la medida que estos se modifican con el pH la afinidad enzima-sustrato va descendiendo, y con ella la velocidad a la que las enzimas realizan la catálisis. Puede llegar el punto en que se producen cambios en la forma tridimensional de la enzimas (desnaturalización) y que éstas sean incapaces de reaccionar e incluso de reconocer sus propios sustratos. Llegado este punto todos los mecanismos que implican la intervención de enzimas (fotosíntesis, respiración, homeostasis, etc.) fallan, y por tanto, la vida del organismo expuesto a este pH es inviable.

Otro aspecto a tener en cuenta son los procesos de calcificación. Algunas macroalgas, así como muchos otros organismos marinos, dependen del CO_3^{2-} , para conjuntamente con el Ca^{2+} , formar sus estructuras y esqueletos de carbonato cálcico. En condiciones normales, ambos compuestos se encuentran saturados en el agua marina, de este modo la precipitación y construcción de estructuras biogénicas por parte de las plantas está, por decirlo de alguna manera, favorecida. Sin embargo, como ya hemos visto con anterioridad, en la medida que el pH desciende, lo hace también la concentración de CO_3^{2-} . Los niveles de saturación de este ion bajan y las plantas encuentran dificultades o son incapaces de calcificar sus estructuras. Experimentalmente y con especies de algas rojas del género *Corallina* se ha observado un significativo descenso en la calcificación en la medida que el pH baja, y un completo cese a partir de un pH por debajo de 7,6 unidades (Gao *et al.*, 1993; Hofmann, 2012).

Como sucede con la asimilación del carbono inorgánico el proceso de calcificación y los niveles de saturación de carbonato cálcico que necesitan las macroalgas para formar sus estructuras calcificadas son muy variables, es decir, la sensibilidad al pH es nuevamente variable según cada especie (Martín *et al.*, 2013). Las macroalgas son capaces depositar diferentes poliformas de carbonato cálcico: calcita (con alta o baja proporción de magnesio, denominadas por lo acrónimos anglosajones HMC o LMC) y aragonito. Cada una de estas formas tiene una diferente solubilidad, siendo la calcita con alta proporción de magnesio (HMC) sintetizada por las algas rojas coralinales la más soluble, y por lo tanto, la forma más difícil de depositar y retener en condiciones acidez. Por otro lado, el lugar donde se deposita el carbonato cálcico también resulta determinante. En este sentido la mayor dificultad para depositar y retener el carbonato se encuentra en aquellas macroalgas que lo exponen al medio, como *Padina pavonica* que lo deposita sobre las células de la superficie de sus talos, o como las coralinales que lo hacen en las paredes celulares. Por el contrario, las especies que acumulan el carbonato cálcico en sus interiores, como es el caso del género *Halimeda* con el aragonito, no tienen tantas dificultades para retenerlo por lo menos a niveles de pH no excesivamente bajos (7,8 unidades) (Roleda & Hurd, 2012).

Estudio de las comunidades vegetales

Para evaluar los cambios en las comunidades de macroalgas se presentan datos previos a la erupción (años 2005 y 2008), con datos obtenidos justo en el momento en el que concluyó la erupción (abril de 2012), y seis meses después (octubre de 2012). Las doce localidades de estudio (Fig. 3) han sido agrupadas a su vez en tres zonas: la primera de ellas la “zona de pH extremo”, coincidiendo con la Reserva Marina y en la

que se realizaron nuestros en ocho localidades (localidades 1 a 8), fue la zona más impactada por el volcán. En ella se registraron valores de pH que oscilaron de 6,71 unidades para las localidades más cercanas al volcán, y 7,34 para las localidades más alejadas. La segunda zona en la que se incluyen las localidades 10 y 11, “zona de bajo pH”, recibió un impacto parcial, ya que las aguas ácidas llegaron parcialmente diluidas. El pH registrado osciló entre 7,65 y 7,76 unidades. Finalmente, la tercera zona en la que se consideraron las localidades 11 y 12, “zona control”, no recibió el impacto de las aguas ácidas, y por tanto sus valores de pH fueron normales.

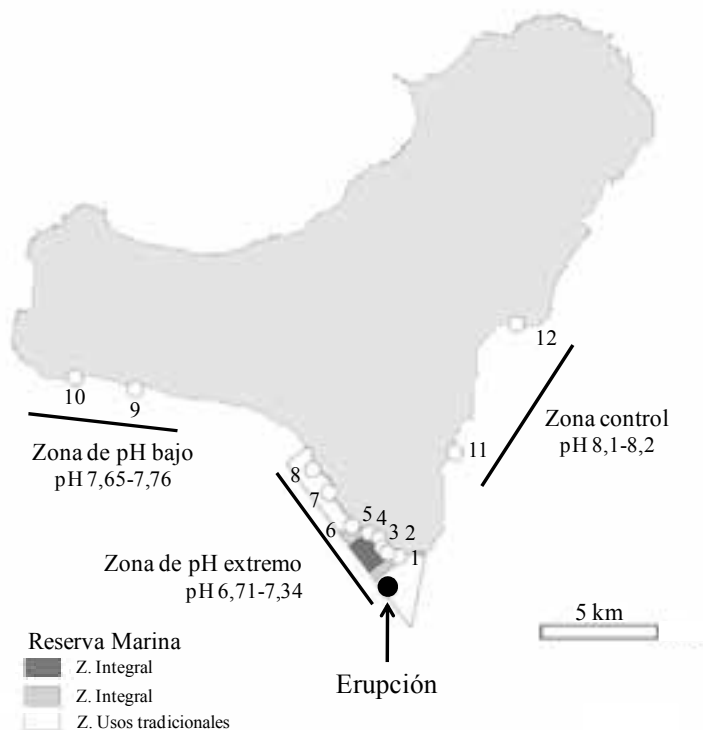


Fig. 3. Diferentes zonas consideradas en este estudio, zona de pH extremo (pH 6,71-7,34), zona de bajo pH (pH 7,65-7,76) y zona control (pH 8,1-8,2); y distribución de las localidades muestreadas. pH: fuente (IEO, 2013).

Del año 2008, solo se pudo disponer de datos de seis localidades (localidades 1, 5, 6, 8, 9 y 10). La toma de datos se realizó en fondos rocosos entre 5 y 20 m de profundidad, repartiendo equitativamente el número de muestras en tres niveles de profundidad 5-10, 10-15 y 15-20 m.

Para la estima de la abundancia de cada una de las especies de macroalgas se empleó una cuadrícula de 25x25 cm (subdividida en subcuadrículas de 5x5 cm) (Fig. 4). La abundancia de cada especie fue expresada como porcentaje de cobertura referida al total de la superficie de la cuadrícula. En cada uno de los niveles de profundidad se establecieron seis cuadrículas, dieciocho por localidad, 756 muestras en total. Al margen de la cobertura se consideraron dos parámetros más descriptores de las comunidades: riqueza y diversidad. La riqueza fue expresada como el número de especies por muestra, mientras que para la diversidad de cada muestra se consideró el índice de Shannon-Wiener [$H' = - \sum (ni / N) \log_2 (ni / N)$], donde N es la cobertura total de la muestra y ni es la cobertura de cada una de las especies que componen la muestra (Shannon & Weaver, 1949).



Fig. 4. Investigador estimando el porcentaje de cobertura de las diferentes especies de macroalgas mediante el método de cuadrícula.

Cambios en las comunidades vegetales

La erupción volcánica submarina provocó importantes cambios en la vegetación submarina de El Hierro, aunque esos cambios no fueron generalizados para las diferentes zonas estudiadas. En este sentido la zona más próxima a la erupción, la denominada zona de pH extremo fue la zona que más cambios sufrió. En la zona de bajo pH se detectaron cambios pero estos fueron ligeros, mientras que en la zona control no se observaron variaciones (Tabla 1 y Fig. 5A).

Especies	Zona de pH extremo				Zona de pH bajo				Zona control		
	2005	2008	Abr 2012	Oct 2012	2005	2008	Abr 2012	Oct 2012	2005	Abr 2012	Oct 2012
<i>Lobophora variegata</i>	87,26	94,95	27,38	63,38	51,95	64,58	54,35	68,88	51,43	57,15	57,58
Coralinales costrosas	2,74	1,29	0,007	4,72	9,23	12,06	5,64	5,84	18,76	12,95	12,63
Filamentosas	0,16	0,19	16,02	1,83	0,28	0,77	3,21	0,96	0,55	1,01	0,46
<i>Pseudotetraspora marina</i>	1,30	0,008	0,031	3,41	2,51	2,74	0,02	29,16	1,06	0,02	1,41
<i>Lophocladia trichocladus</i>	0,12	2,40	0,79	3,80		0,64	1,206	5,01		5,51	6,07
<i>Canistrocarpus cervicornis</i>	0,76	0,77	1,79	1,54	5,30	6,25	0,991	1,34	3,26	0,41	2,81
Cianofitas	2,21	9,15	0,01	0,01	0,40	0,33	0,029	0,69	0,61	0,02	0,15
<i>Cladophora liebetruthii</i>			4,89				0,243		0,01	1,05	0,03
<i>Jania adhaerens</i>	0,60	0,47		0,002	0,59	2,27	0,065	0,10	1,42	2,56	3,80
<i>Cystoseira compressa</i>	0,01		1,55	1,23			0,250	0,29	0,13	2,05	0,90
<i>Padina pavonica</i>	0,002		2,82	0,49		0,03	0,551	0,17	0,01	0,23	0,59
<i>Pseudochlorodesmis</i>	0,003		2,58	0,57	0,008		0,051	0,04	0,05	0,17	0,08
<i>Sargassum</i> sp2		0,25	1,96	0,25		0,09	0,735	0,02	0,003	0,95	0,22
<i>Sargassum</i> sp1	0,05		1,23	0,04	0,41	0,06	0,265	0,20	0,34	2,10	0,49
<i>Colpomenia sinuosa</i>	0,001		0,48	0,007			0,444			3,72	
<i>Asparagopsis taxiformis</i>	0,14	2,08			0,25	0,41	0,029		0,52	0,18	0,02
<i>Dictyota dichotoma</i>	0,003		0,09	0,18	0,02			0,27	0,008	0,56	0,64
<i>Styopodium zonale</i>		0,04	0,10						0,83	0,04	0,26
<i>Cystoseira abies-marina</i>			0,06	0,02			0,029		0,10	0,45	0,65
<i>Cottoniella filamentosa</i>	0,60		0,02	0,01	0,11	0,03			0,03	0,004	
<i>Amphiroa</i> spp.	0,07			0,001	0,76	0,17		0,02	0,54		0,01
<i>Dictyota pfaffii</i>	0,01	0,008	0,03		0,30	0,25			0,49	0,05	0,06
<i>Corallina elongata</i>	0,01				0,01	0,03	1,125			0,16	0,06
<i>Dictyota crenulata</i>	0,007		0,04			0,45			0,13		0,34
<i>Hidrochlathrus clathratus</i>	0,003		0,04	0,23			0,029	0,02	0,03	0,03	0,02
<i>Anadyomene stellata</i>			0,05	0,07			0,390	0,04		0,05	0,04
<i>Dictyota</i> sp.		0,07	0,01	0,07				0,06		0,02	0,22
<i>Dasya baillouviana</i>	0,02	0,06			0,25	0,51			0,02		
<i>Gelidiopsis intricata</i>	0,09						0,015		0,003	0,004	
<i>Jania pumila</i>									0,17		0,007
<i>Dictyota pulchella</i>											0,16
<i>Thuretella schousboei</i>			0,05								
<i>Peyssonnelia</i> sp.										0,11	
<i>Wrangelia penicillata</i>	0,009								0,04		
<i>Mesophyllum canariense</i>	0,007										0,02
<i>Halopteris scoparia</i>	0,007								0,007	0,01	
<i>Hypnea spinella</i>			0,007				0,044		0,001		
<i>Taenomia atomaria</i>			0,01							0,01	
<i>Sporochnus bolleanus</i>			0,01								
<i>Liagora tetrasporifera</i>	0,010										0,007
<i>Caulerpa racemosa</i>									0,007		0,01
<i>Laurencia</i> sp.	0,001		0,001							0,01	
<i>Scinaia complanata</i>			0,007								
<i>Sebdenia rodrigueziana</i>			0,006								
<i>Acrosymphyton purpur.</i>	0,007										
<i>Codium vermilara</i>				0,007							
<i>Ernodesmis verticillata</i>									0,008		
<i>Champia parvula</i>			0,005								
<i>Rosenvingea intricata</i>			0,003								
<i>Liagora ceranoides</i>	0,003										
<i>Arthrocladia villosa</i>			0,002								

<i>Wrangelia argus</i>		0,015	
<i>Chondria</i> sp.			0,01
<i>Meristoteka decumbens</i>	0,002		
<i>Microdyction calodyction</i>			0,003
<i>Caulerpa mexicana</i>	0,002		
<i>Caulerpa webbiana</i>	0,002		
<i>Hypnea musciformis</i>			0,002

Tabla 1. Cobertura media de cada una de las especies registradas en las tres diferentes zonas de estudio (zona de pH extremo, zona de pH bajo, zona control) de la isla de El Hierro (ver fig. 3); en dos periodos previos a la erupción (2005 y 2008), y dos periodos posteriores (abril de 2012 y octubre de 2012).

Como podemos ver en los datos de cobertura media recogidos en la Tabla 1 y en la figura 5A, y para la zona de pH extremo, *Lobophora variegata* sufrió una fuerte reducción en su abundancia. Previamente a la erupción, en 2005 y 2008, los valores de cobertura media de esta especie fueron respectivamente 87,26 y 94,95%. En abril de 2012 se había reducido a un 27,38%. Sin embargo, seis meses después, en octubre de 2012, se observó una rápida recuperación de la especie, la cual alcanzó una cobertura del 68,38%.

Por otro lado, los cambios a lo largo de las localidades en la zona de pH extremo siguieron un claro gradiente. En este sentido las localidades más cercanas a la erupción fueron las que sufrieron mayor reducción en la cobertura de *Lobophora variegata* (Fig. 5B). Por ejemplo, en las localidades 1, 2 y 5 descendió más de un 75%, mientras que en las más alejadas como la localidad 8 fue de aproximadamente del 50% (Fig. 6). Examinando la cobertura de *Lobophora variegata* en los diferentes niveles de profundidad en los que se tomaron los datos (5-10, 10-15, 15-20 m) para la zona de pH extremo (Fig. 7), observamos que la reducción en la cobertura de esta especie tras la erupción fue similar en las tres profundidades estudiadas. Sin embargo, el proceso de recuperación fue diferente, si bien para las profundidades de 5-10 y 10-15 m la cobertura en octubre de 2012 alcanzó valores del 78,23 y 71,92%, respectivamente, en el nivel de profundidad 15-20 m solo registró un 40%.

En contraposición a la disminución de *Lobophora variegata* encontramos que otras especies incrementaron significativamente en su abundancia (Tabla 1). Entre ellas destacaron las algas rojas filamentosas del orden Ceramiales (especies de los géneros *Ceramium* y *Polysiphonia*), las algas verdes también filamentosas, *Cladophora liebethrutii* y *Pseudochlorodesmis furcellata* y el alga parda *Padina pavonica* (Fig. 8).

También, hay que señalar que tras la erupción se registró por primera vez en la zona la presencia de algunas especies, como *Sporochnus bolleanus* y *Arthrocladia villosa*, que tampoco eran conocidas en el resto de

la isla. Por otro lado, algunas especies como *Anadyomene stellata* y *Rosenvingea intricata* (Figs 9 y 10), además de ser más frecuentes en abril de 2012 presentaron en este periodo unas dimensiones de talos significativamente superiores a las normales.

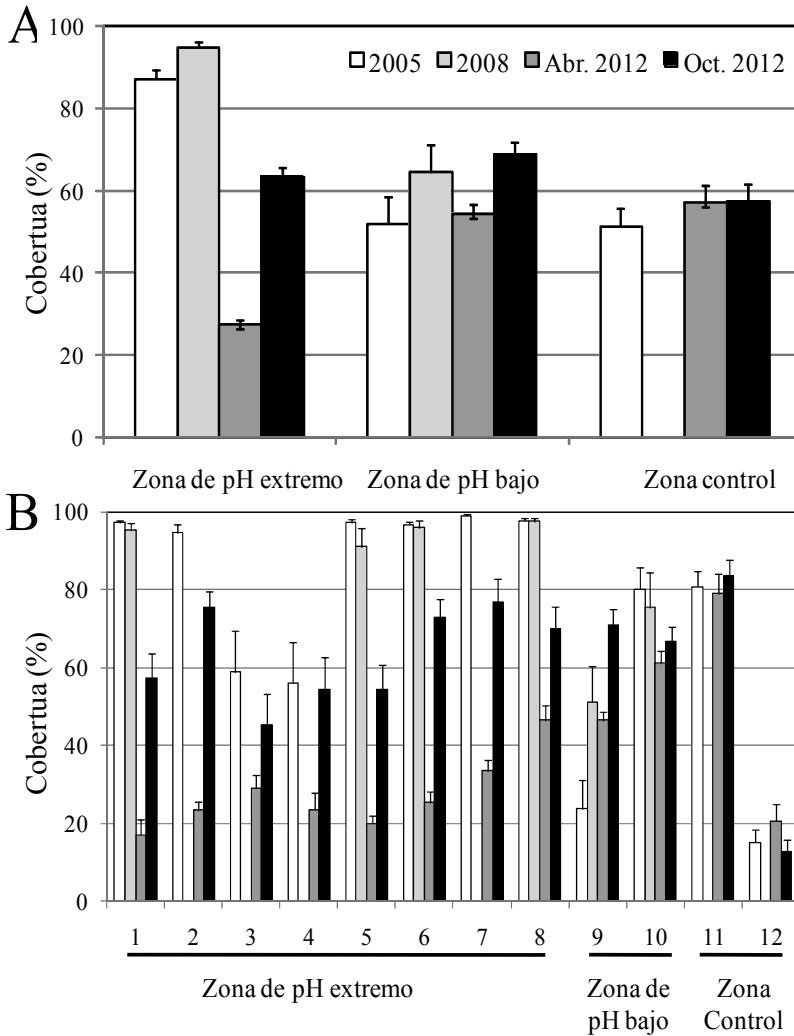


Fig. 5. Variación de la cobertura media de *Lobophora variegata* antes y después de la erupción submarina: (A) en las diferentes zonas estudiadas, y (B) en cada una de las localidades de estudio. Se observa como después de iniciada la erupción se produce una caída significativa de la cobertura en las localidades de pH extremo, con evidente recuperación en octubre de 2012.

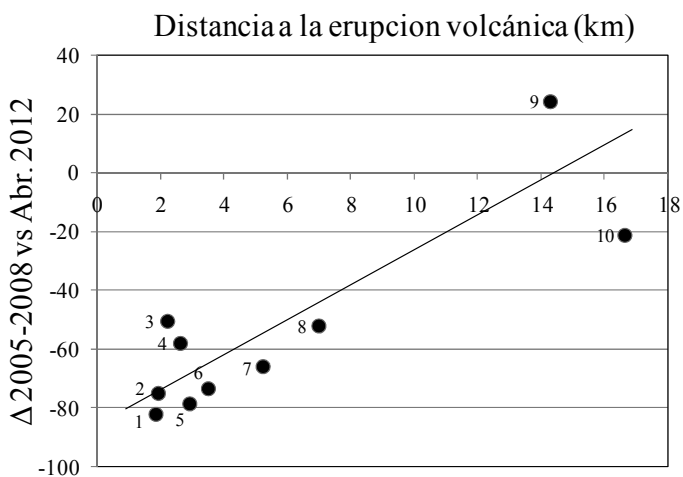


Fig. 6. Cambios en la cobertura de *Lobophora variegata* (2005-2008 frente a abril de 2012) en relación con la distancia a la erupción volcánica. Se observa que la reducción en la cobertura de *Lobophora variegata* sucedió en las localidades más próximas a la erupción (localidades 1 a 8), en ellas la reducción en la cobertura de la especie fue de entre el 80 y 50%.

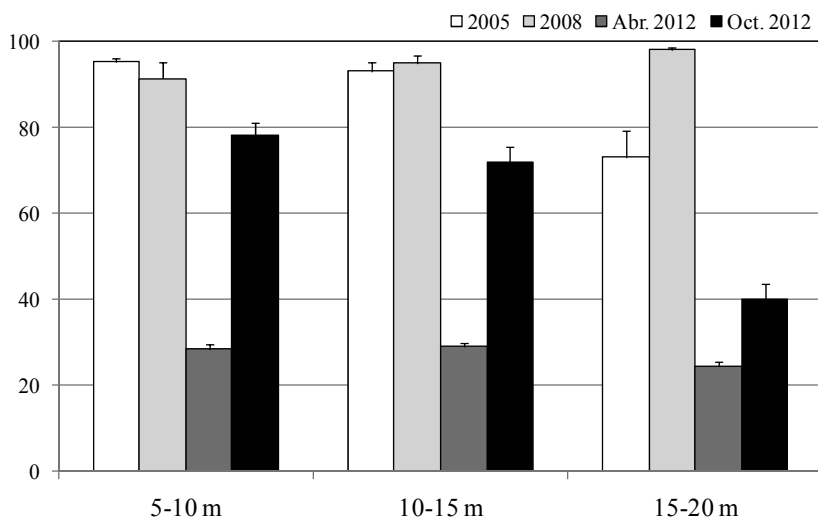


Fig. 7. Valores de cobertura media de *Lobophora variegata* en la zona de pH extremo y en los tres niveles de profundidad estudiados. Obsérvese que la cobertura de *Lobophora* cayó de forma similar en las tres profundidades, pero la recuperación de la cobertura en octubre de 2012 es inferior en el nivel de 15-20 m de profundidad.

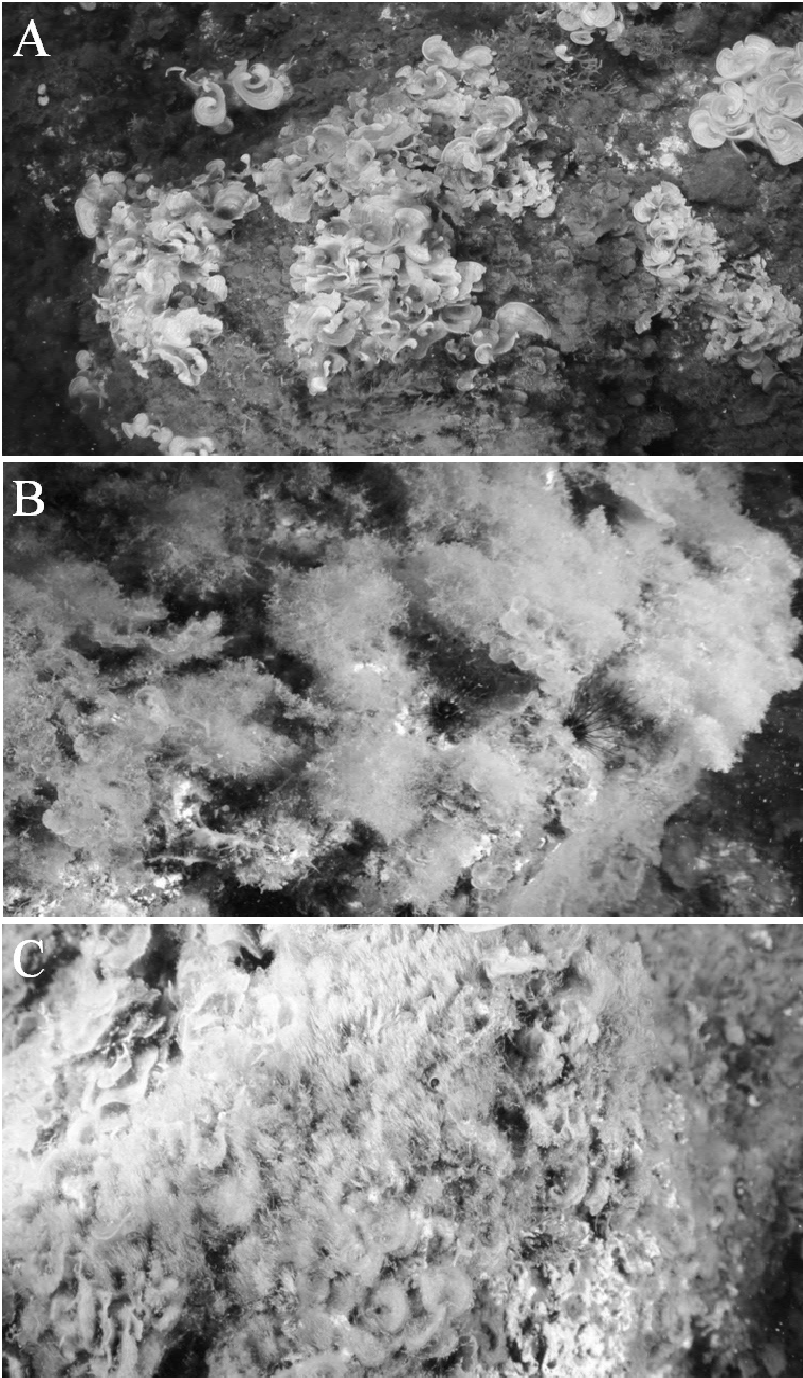


Fig. 8. Especies que remplazaron a *Lobophora variegata* en la zona de pH extremo: (A) *Padina pavonica*, (B) *Cladophora liebetruhtii*, (C) *Pseudochlorodesmis furcellata*.

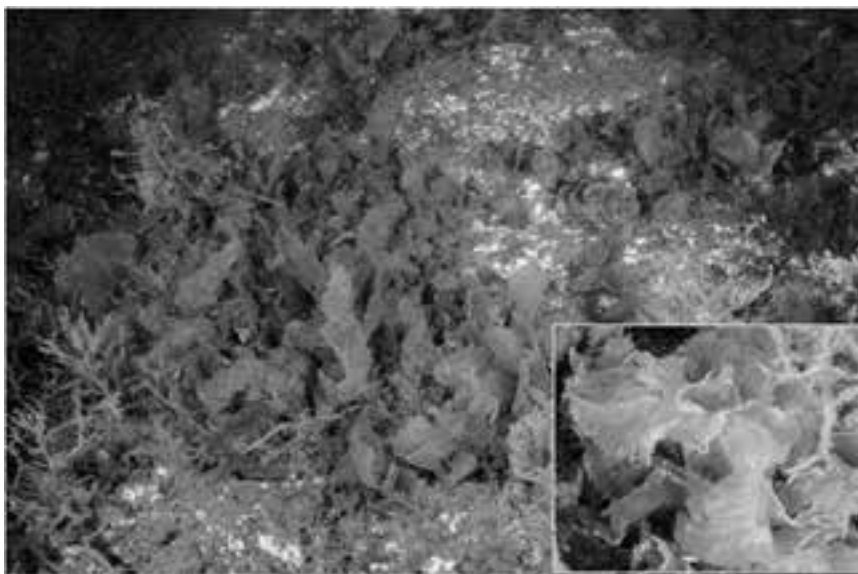


Fig. 9. Aspectos de poblaciones del alga verde *Anadyomene stellata* en el Mar de Las Calmas.

Otro grupo que sufrió especialmente el impacto del agua ácida fue el de las algas rojas incrustantes del orden Corallinales. Tal como recoge la Tabla 1, así como la figura 11A, estas especies no fueron registradas en la zona de pH extremo en abril de 2012. Como podemos observar en la figura 9, las costras resultaron muy afectadas por el agua ácida, la cual literalmente disolvió sus estructuras de carbonato cálcico. Durante el muestreo de abril de 2012 se dedujo que estas costras estaban muertas (Fig. 12). En la zona de pH bajo también se detectó una caída en la cobertura de estas especies, pero estas no llegaron a desaparecer como en la zona de pH extremo. Aunque si atendemos a las localidades (Fig. 11B), podemos observar que los cambios solo fueron significativos en la localidad 9 y no en la 10. Seis meses después, la recuperación de las coralinales costrosas en la zona de pH extremo fue notable, sin embargo no sucedió lo mismo en la zona de bajo pH.

En cuanto a la riqueza (número de especies muestra), y en la zona de pH extremo (Fig. 13A) se observó un ligero incremento. Sin embargo, este no fue generalizado dentro de todo el área ya que como muestra la figura 13B la riqueza en algunas localidades (localidades 3 y 4) era más elevada antes de la erupción volcánica. En la zona de pH bajo la riqueza fue similar en los diferentes periodos estudiados. Por el contrario, en la zona control se observó un descenso de la riqueza.

Finalmente, la diversidad en la zona de pH extremo sufrió un incremento muy significativo en abril de 2012 con valores superiores al

doble de los previamente registrados (Fig. 14A). En octubre de 2012 la diversidad descendió respecto a abril. Este patrón fue similar en todas las localidades de esta zona (Fig. 14B). En la zona de pH bajo como en la zona control, este parámetro presentó valores similares en los periodos estudiados.



Fig. 10. Aspecto de un ejemplar del alga parda *Rosenvingea intricata* en el Mar de Las Calmas.

Conclusiones

El proceso eruptivo produjo cambios en la organización y estructura de la vegetación submarina del Mar de Las Calmas. Estos cambios describieron un gradiente desde las zonas más cercanas a las más alejadas de la erupción. En este sentido, resultaron muy significativos en la reserva marina, la zona que recibió el impacto de la mayor acidez del agua; ligeros en el resto del Mar de Las Calmas, zona que recibió parcialmente el impacto; y nulos en la zona control, zona no afectada por el descenso del pH.

En la Reserva Marina, zona de pH extremo, el fuerte impacto de las aguas ácidas redujo de forma importante la cobertura de la especie dominante en sus fondos, *Lobophora variegata* y eliminó a las algas rojas Corallinales. El pH extremo (valores de 6,71-7,34 unidades) al que estuvo sometida esta zona, al menos durante parte del tiempo que duro la erupción, fue incompatible con el normal desarrollo de la mayoría de las macroalgas.

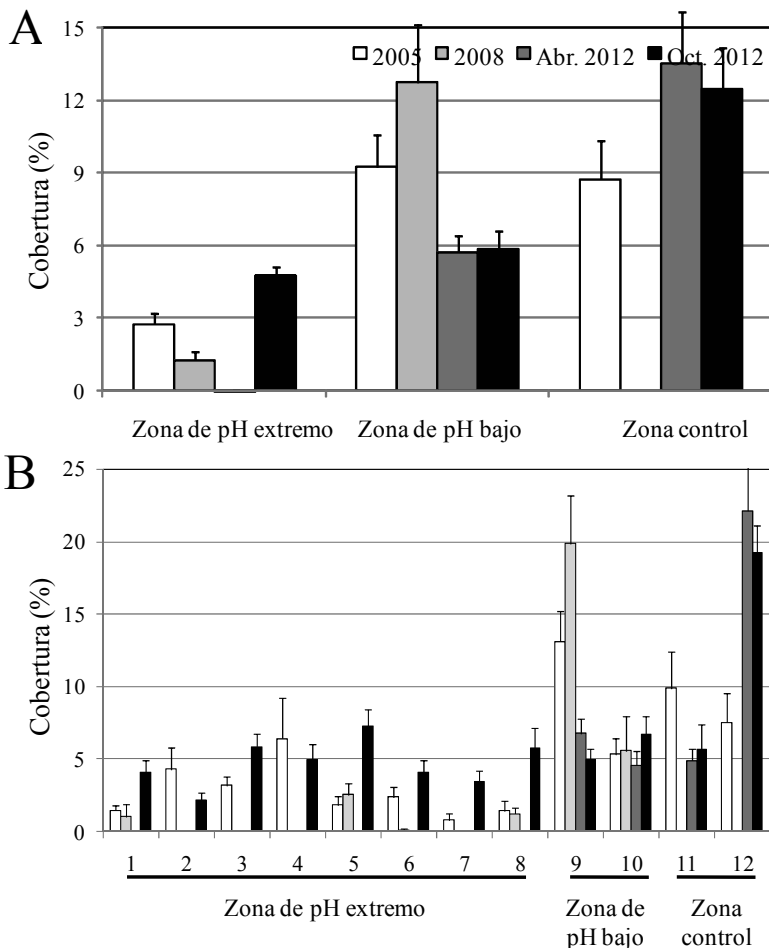


Fig. 11. Variación de la cobertura media de las algas rojas incrustantes del orden Corallinales antes y después de la erupción submarina: (A) en las diferentes zonas estudiadas, y (B) en cada una de las localidades de estudio.

Las nuevas condiciones ambientales, así como los sustratos rocosos dejados libre por *Lobophora variegata* y por las Corallinales sirvieron de catapulta para el desarrollo y predominio de otras especies. Las nuevas comunidades que surgieron en la Reserva Marina se caracterizaron por estar constituidas por especies efímeras, organismos cuyas generaciones completan su ciclo de vida en un corto periodo de tiempo. Especies, por decirlo de alguna manera, “plásticas” y adaptables a los cambios en el medio ambiente, a diferencia de *Lobophora variegata*, especie de crecimiento más lento, con generaciones que perduran varios años y con

requerimientos ambientales estables. Experimentalmente se ha demostrado que *Lobophora variegata* es capaz de tolerar y crecer con normalidad a bajo pH ($\approx 7,6$ unidades) (Roleda & Hurd, 2012). Sin embargo, tal como se desprende de los resultados de este trabajo, *Lobophora variegata* resultó muy afectada cuando fue expuesta a valores de pH inferiores.



Fig. 12. Poblaciones de Corallinales costrosas en la zona de pH extremo en las que el carbonato cálcico de las paredes de sus células resultó disuelto por el agua ácida.

En el resto del Mar de Las Calmas, zona de bajo pH, con valores de pH $\approx 7,65 - 7,76$ unidades, las comunidades sólo resultaron afectadas a nivel del grupo de las Corallinales, no detectándose cambios en la cobertura de *Lobophora variegata* o en las especies efímeras.

El incremento de la acidez de los océanos, consecuencia del aumento de la concentración de CO_2 en la atmósfera por causas antropogénicas, está siendo en estos momentos un tema candente y objeto de numerosas investigaciones. Muchas de las conclusiones a las que ha llegado la comunidad científica pueden ser contrastadas y extrapoladas con los cambios sucedidos en el Mar de Las Calmas, aunque con reservas puesto que el incremento en la acidez en la zona más impactada por la erupción supera con mucho la acidez sufrida actualmente por los océanos, así como las previsiones más severas para final de este siglo (ver IPCC, 2007). Algunos de estos trabajos han predicho que la disminución del pH puede inducir cambios en fisionomía de algunas comunidades con sustitución de

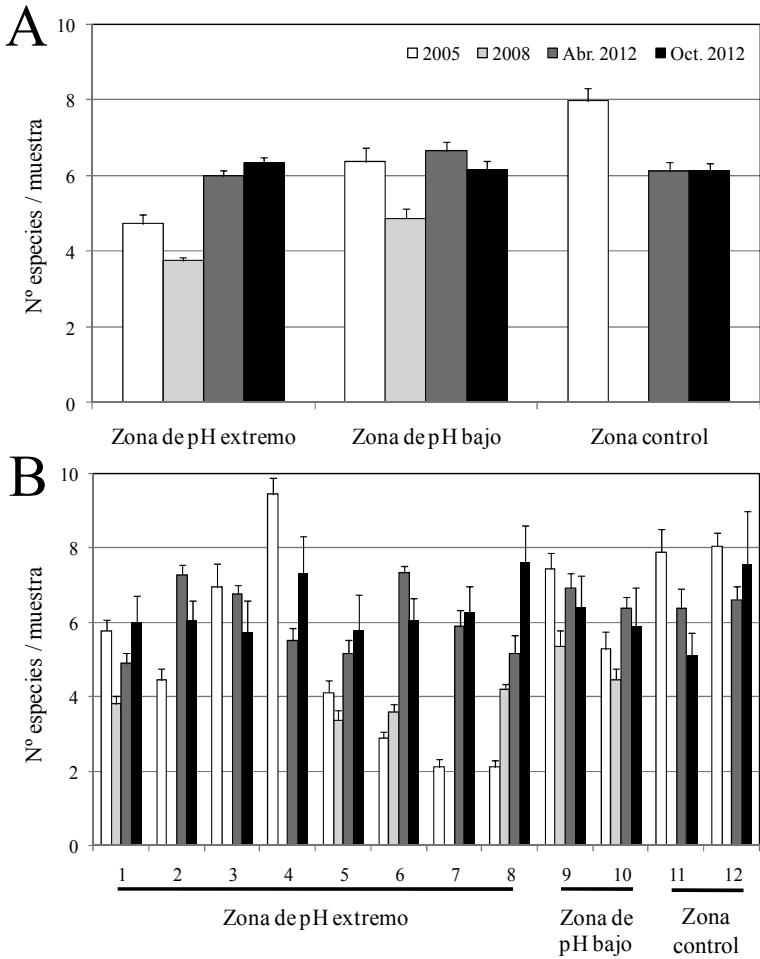


Fig. 13. Variación del número medio de especies por muestra antes y después de la erupción submarina: (A) en las diferentes zonas estudiadas, y (B) en las localidades de estudio.

los elementos perennes dominantes por especies efímeras y cespitosas (Connell & Russell, 2010; Porzio *et al.*, 2011; Roleda & Hurd, 2012). Cambios similares en las comunidades sucedieron en el Mar de Las Calmas. En común con estos estudios encontramos la proliferación de especies similares como *Padina* spp. y *Cladophora* spp. (Hall-Spencer *et al.*, 2008; Johnson *et al.*, 2012). Por otro lado, también incrementaron su abundancia diferentes algas rojas (Ceramiales como *Ceramium* spp. y

Polysiphonia spp.) plantas que como recordaremos carecen de mecanismos CCM y tienen

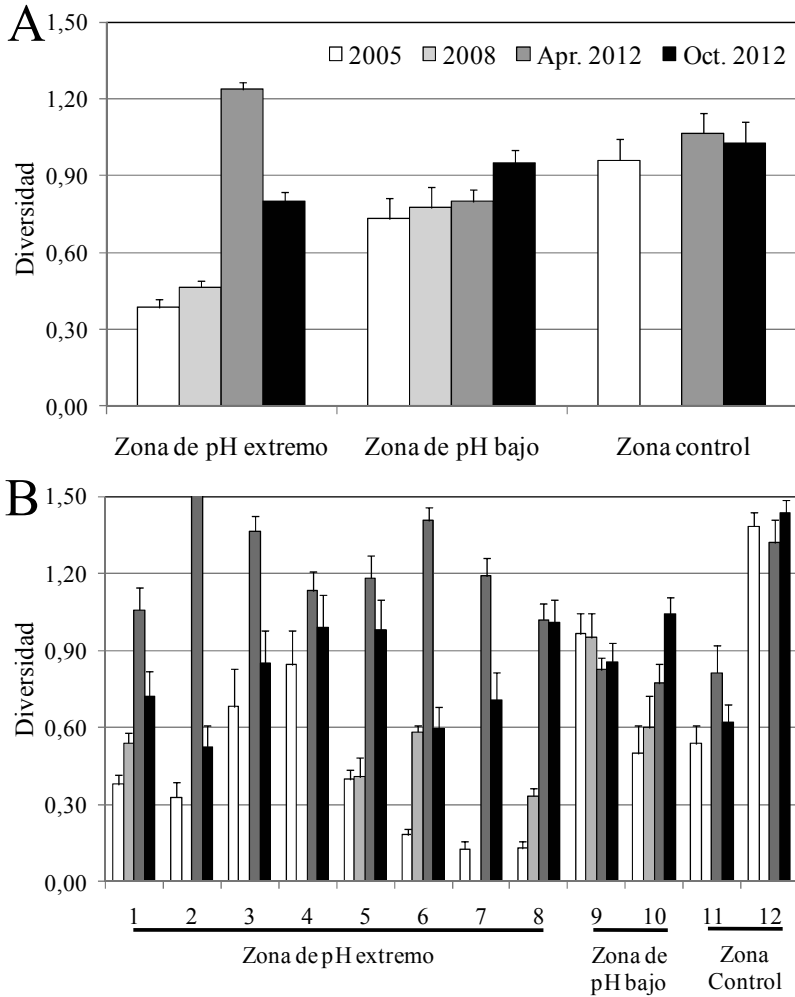


Fig. 14. Variación de la diversidad media por muestra antes y después de la erupción submarina: (A) en las diferentes zonas estudiadas, y (B) en las localidades de estudio.

limitaciones para captar CO_2 en condiciones normales, y que por tanto se pudieron ver beneficiadas durante la erupción (Roleda & Hurd, 2012). Sin embargo, los cambios en el Mar de Las Calmas solo ocurrieron en la zona de mayor descenso de pH. En la zona donde el pH alcanzó valores similares a los que se alcanzarán a final de siglo, las comunidades de *Lobophora*

variegata no fueron alteradas sustancialmente. En esta zona únicamente se constató con claridad la reducción en la cobertura de las algas Corallinales.

Algunos trabajos también sugieren (Hall-Spencer *et al.*, 2008; Porzio *et al.*, 2011) que en la medida que disminuye el pH lo hace también la riqueza y diversidad de las comunidades, pero en la zona más afectada del Mar de Las Calmas se observó, al menos en la diversidad, un patrón inverso, puesto que ésta se incrementó significativamente. Todo ello no fue debido a que se incorporaran nuevas especies, puesto que en su gran mayoría las especies que proliferaron tras la erupción ya estaban presentes en la zona, sino a que se produjo una disminución de la monopolización de *Lobophora variegata*.

Finalmente, una de las principales conclusiones que se extrae de los resultados de este trabajo es la rapidez con la que la vegetación del Mar de Las Calmas se está recuperando. Tan sólo seis meses después de la erupción volcánica la recuperación de la vegetación es notable. Tal es así, que la cobertura media de *Lobophora variegata* duplica a la obtenida inmediatamente después de la finalización de la erupción. Se puede afirmar por tanto que en un corto periodo de tiempo las comunidades de macroalgas del Mar de Las Calmas volverán a presentar un estado similar al que tenían antes de la erupción.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a los compañeros Sabrina Clemente, Adriana Rodríguez, José Carlos Hernández, David Pérez, Marc Balsalobre, José Carlos Mendoza, Alejandro Escánez y Patricia Arranz por su contribución a la obtención de los datos que se ilustran en este trabajo. Nuestro trabajo contó también con la colaboración desinteresada del Cabildo Insular de El Hierro, del servicio de vigilancia de la reserva marina La Restinga - Mar de Las Calmas, y de Juan Piloto del Servicio de Inspección Pesquera de El Hierro. Los resultados aquí expuestos forman parte del proyecto “Evolución del impacto del volcán de El Hierro en la biodiversidad y los recursos marinos y costeros”, dirigido por Alberto Brito y financiado por la Viceconsejería de Pesca del Gobierno de Canarias. Finalmente agradezco al Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, y en especial a Julio Afonso Carrillo, la invitación a participar en la VIII Semana Científica Telesforo Bravo.

Bibliografía

ARÍSTEGUI, J., P. TETT, A. HERNÁNDEZ-GUERRA, G. BASTERRETXEA, M.F. MONTERO, K. WILD, P. SANDRÁ, S. HERNÁNDEZ-LEÓN, M. CANTÓN, J.A. GARCÍA-BRAUN & M. PACHECO (1997). The influence of island-generated eddies on chlorophyll distribution: a study of mesoscale variation around Gran Canaria. *Deep Sea Research* 44: 71-95.

- BARTON, E.D., J. ARÍSTEGUI, P. TETT, M. CANTÓN, J. GARCÍA-BRAUN, S. HERNÁNDEZ-LEÓN, L. NYKJAER, C. ALMEIDA, J. ALMUNIA, S. BALLESTEROS, G. BASTERRETXEA, J. ESCÁNEZ, L. GARCÍA-WEILL, A. HERNÁNDEZ-GUERRA, F. LÓPEZ-LAATZEEN, R. MOLINA, M.F. MONTERO, E. NAVARRO-PÉREZ, J.M. RODRÍGUEZ, K. VAN LENNING, H. VÉLEZ & K. WILD (1998). The transition zone of Canary Current upwelling region. *Progress in Oceanography* 41: 455-504.
- BRITO, A., J.M. FALCÓN, N. AGUILAR & P. PASCUAL (2001). Fauna vertebrada marina. In: Fernández Palacios, J.M. & J.L. Martín Esquivel (Coords), *Naturaleza de las Islas Canarias: Ecología y Conservación*. Pp. 219-231. Ed. Turquesa. Santa Cruz de Tenerife.
- BRITO, A., J.C. HERNÁNDEZ, S. CLEMENTE, C. SANGIL, J.M FALCÓN & M. BALSALOBRE (2012a). Evaluación del impacto del volcán de El Hierro en la biodiversidad y los recursos marinos y costeros. Universidad de La Laguna, La Laguna.
- BRITO, A., J.C. HERNÁNDEZ, S. CLEMENTE, C. SANGIL, J.M FALCÓN, M. BALSALOBRE & J.C. MENDOZA (2012b). Evaluación del impacto del volcán de El Hierro en la biodiversidad y los recursos marinos y costeros. Segunda Parte. Universidad de La Laguna, La Laguna.
- BRITO, A. & O. OCAÑA (2004). *Corales de las Islas Canarias*. Francisco Lemus Editor, La Laguna.
- CLEMENTE, S., J.C. HERNÁNDEZ, A. RODRÍGUEZ & A. BRITO (2010). Identifying keystone predators and the importance of preserving functional diversity in sublittoral rocky-bottom areas. *Marine Ecology Progress Series* 413: 55-67.
- CONNELL, S.D. & B.D. RUSSELL (2010). The direct effects of increasing CO₂ and temperature on non-calcifying organisms: increasing the potential for phase shifts in kelp forests. *Proceedings of the Royal Society* 277: 1409-1415.
- FRAILE-NUEZ, E., M. GONZÁLEZ-DÁVILA, J.M. SANTANA-CASIANO, J. ARÍSTEGUI, I.J. ALONSO-GONZÁLEZ, S. HERNÁNDEZ-LEÓN, M.J. BLANCO, A. RODRÍGUEZ-SANTANA, A. HERNÁNDEZ-GUERRA, M.D. GELADO-CABALLERO, F. EUGENIO, J. MARCELO, D. DE ARMAS, J.F. DOMÍNGUEZ-YANES, M.F. MONTERO, D.R. LAETSCH, P. VÉLEZ-VELCHÍ, A. RAMOS, A.V. ARIZA, I. COMAS-RODRÍGUEZ & V.M. BENÍTEZ-BARRIOS (2012). The submarine volcano eruption at the island of El Hierro: physical-chemical perturbation and biological response. *Scientific Reports* 2: 486. doi: 10.1038/srep00486.
- FERSHT, A. (1980). *Estructura y mecanismos de las enzimas*. Editorial Reverte. Madrid.
- GAO, K., Y. ARUGA, K. ASADA, T. ISHIHARA, T. AKANO & M. KIYOHARA (1993). Calcification in the articulated coralline alga *Corallina pilulifera*, with special reference to the effect of elevated CO₂ concentration. *Marine Biology* 117: 129-132.
- GUIRY, M.D. & G.M. GUIRY (2013). AlgaeBase. World-wide electronic publication. National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org> (Consultado en marzo 2013).

- HALL-SPENCER, J.M., R. RODOLFO-METALPA, S. MARTIN, E. RANSOME, M. FINE, S.M. TURNER, S.J. ROWLEY, D. TEDESCO & M.C. BUIA (2008). Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature* 454: 96-99.
- HÉRNÁNDEZ, J.C. & S. CLEMENTE (2010). Reservas Marinas, cambio climático y catástrofes naturales: el caso del Mar de Las Calmas en la isla de El Hierro. En: Afonso-Carrillo, J. (ed.), *El Hierro: el nacimiento de un volcán*. Actas VIII Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de La Cruz, pp. 113-132.
- HERNÁNDEZ, J.C., S. CLEMENTE, C. SANGIL & A. BRITO (2008a). Actual status of the sea urchin *Diadema* aff. *antillarum* populations and macroalgal cover in the Marine Protected Areas comparing to a Highly Fished Area (Canary Islands - Easter Atlantic Ocean). *Aquatic Conservation* 18: 1091-1108.
- HERNÁNDEZ, J.C., S. CLEMENTE, C. SANGIL & A. BRITO (2008b). The key role of *Diadema* aff. *antillarum* (Echinoidea: Diademataceae) throughout the Canary Islands (eastern subtropical Atlantic) in controlling macroalgae assemblages: an spatio-temporal approach. *Marine Environmental Research* 66: 259-270.
- HOFMANN, L.C., G. YILDIZ, D. HANELT & K. BISCHOF (2012). Physiological responses of the calcifying rhodophyte *Corallina officinalis* L. to future CO₂ levels. *Marine Biology* 159: 783-792.
- HOFMANN, G.E., J.E. SMITH, K.S. JOHNSON, U. SEND, L.A. LEVIN, F. MICHELI, A. PAYTAN, N.N. PRICE, B. PETERSON, Y. TAKESHITA, P.G. MATSON, E.D. CROOK, K.J. KROEKER, M.C. GAMBI, E.B. RIVEST, C.A. FRIEDER, P.C. YU & T.R. MARTZ (2011). High-frequency dynamics of ocean pH: a multi-ecosystem comparison. *PlosOne* 6: e28983. doi:10.1371/journal.pone.0028983
- HURD, C.L., C.D. HEPURN, K.I. CURRIE, J.A. RAVEN & K.A. HUNTER (2009). Testing the effects of ocean acidification on algal metabolism: considerations for experimental designs. *Journal of Phycology* 45: 1236-1251.
- IGN (Instituto Geográfico Nacional) (2013). Boletín El Hierro: http://www.ign.es/ign/resources/volcanologia/txt_HIERRO. (Consultado en marzo 2013).
- IEO (Instituto Español de Oceanografía) (2013). La actividad científica del Instituto Español de Oceanografía en la erupción volcánica de El Hierro: www.ieo.es/hierro.htm (Consultado en marzo de 2013).
- IPCC (2007). Climate Change (2007). The physical science basis. Summary for policymakers. Contribution of working group I to the fourth assessment report. The International Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>
- JOHNSON, V., B. RUSSELL, K. FABRICIUS, C. BROWNLEE & J.M. HALL-SPENCER (2012). Temperate and tropical brown macroalgae thrive, despite decalcification, along natural CO₂ gradients. *Global Change Biology* 18: 2792-2803.
- KOCH, M., G. BOWES, C. ROSS & X. ZHANG (2013). Climate change and ocean acidification effects on seagrasses and marine macroalgae. *Global Change Biology* 19: 103-132.
- MARTIN, S., S. COHU, C. VIGNOT, G. ZIMMERMAN & J. GATTUSO (2013). One-year experiment on the physiological response of the Mediterranean crustose coralline alga, *Lithophyllum cabiochae*, to elevated pCO₂ and temperature. *Ecology and Evolution* 3: 676-693.

- NASA (National Aeronautics and Space Administration) (2013). Earth Observatory: <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards> (Consultado en marzo de 2013).
- PÉREZ-TORRADO, F.J., J.C. CARRACEDO, A. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, V. SOLER, V.R. TROLL & S. WIESMAIER (2012). La erupción submarina de La Restinga en la isla de El Hierro, Canarias: octubre 2011-marzo 2012. *Estudios Geológicos* 68: 5-27.
- PORZIO, L., M.C. BUIA & J.M. HALL-SPENCER (2011). Effects of ocean acidification on macroalgal communities. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 400: 278-287.
- RIVERA, J., G. LASTRAS, M. CANALS, J. ACOSTA, B. ARRESE, N. HERMIDA, A. MICALLEF, O. TELLO & D. AMBLAS (2013). The construction of an oceanic island: insights from El Hierro 2011-12 submarine eruption. *Geology* 4. doi: 0.1130/G33863.1
- ROLEDA, M.Y. & C.L. HURD (2012). Seaweed responses to ocean acidification. In: Wiencke C. & K. Bischof (eds.), *Seaweed Biology. Ecological Studies*. pp: 407-431. Springer-Verlag, Berlin.
- SANGIL, C. (2012). La vegetación sublitoral de sustratos rocosos de las Islas Canarias: estructura, composición y dinámica de las comunidades de macroalgas. Secretariado de Publicaciones de La Universidad de La Laguna. Universidad de La Laguna. La Laguna.
- SANGIL, C., J. AFONSO-CARRILLO & M. SANSÓN (2007). Biodiversidad y biogeografía de las macroalgas bentónicas de la isla de La Palma. *Revista de Estudios Generales de La Palma* 3: 457-479.
- SANGIL, C., J. AFONSO-CARRILLO & M. SANSÓN (2011a). La vegetación submareal de sustratos rocosos en la isla de El Hierro (islas Canarias): relación entre variables ambientales y estructura de las comunidades de macroalgas. *Vieraea* 39: 167-182.
- SANGIL, C., M. SANSÓN & J. AFONSO-CARRILLO (2011b). Spatial variation patterns of subtidal seaweed assemblages along a subtropical oceanic archipelago: thermal gradient vs herbivore pressure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 94: 322-334.
- SANGIL, C., M. SANSÓN, S. CLEMENTE, J. AFONSO-CARRILLO & J.C. HERNÁNDEZ (en revisión). Contrasting the richness, diversity and structure of seaweed assemblages in alternate states: urchin density as a driver of biotic homogenization. *Journal of Sea Research*.
- SANTANA-CASIANO, J.M., M. GONZÁLEZ-DÁVILA, E. FRAILE-NUEZ, D. DE ARMAS, A.G. GONZÁLEZ, J.F. DOMÍNGUEZ-YANES & J. ESCÁNEZ (2013). The natural ocean acidification and fertilization event caused by the submarine eruption of El Hierro. *Scientific Reports* 3: 1140. doi: 10.1038/srep01140.
- SHANNON, C.E. & W. WEAVER (1949). *The mathematical theory of communications*. University of Illinois Press, Illinois.

3. Volcanes, zifios y otros valores naturales de las aguas profundas de El Hierro

**Natacha Aguilar de Soto¹,
Mark Johnson², Patricia Arranz^{1,2}, Alejandro Escáñez¹,
Cristina Reyes¹, Agustina Schiavi¹, Peter Madsen³ y Alberto Brito¹**

¹ *Grupo de Investigación BIOECOMAC. Depto. De Biología Animal,
Univ. de La Laguna, España. naguilar@ull.es*

² *Scottish Ocean Institute. Univ. St. Andrews, Fife, Escocia, Reino Unido.*

³ *Dept. of Zoophysiology, Univ. Aarhus, Dinamarca.*

Una especie es un mosaico en el que la evolución ha ido moldeando cada pieza para que enlace de forma exquisita con las demás; no puede entenderse el todo sin el funcionamiento adecuado y relacionado de cada una de las partes. En un animal esas piezas son factores aparentemente tan distantes como el comportamiento, la anatomía y fisiología, la alimentación, la estructura social, las señales de comunicación, las relaciones con depredadores y presas..., todo lo que define a un taxón, que al fin dictamina su distribución y abundancia, y que necesitamos comprender para trabajar en su conservación. Es magnífico que incluso en el siglo XXI nos siguen sorprendiendo descubrimientos sobre las proezas de la naturaleza, por ejemplo, las de los zifios: mamíferos que pueden sumergirse en apnea hasta dos horas, a profundidades de dos e incluso tres kilómetros. Este comportamiento de buceo es extremo para un cetáceo de tamaño medio, con un peso entre 6 y 16 veces menor que el del cachalote. Requiere que todas las piezas del mosaico “zifio” estén adaptadas a una forma de vida al límite de sus capacidades fisiológicas, lo que parece aumentar su vulnerabilidad a impactos antrópicos.

En la década de los 90 los zifios se hicieron famosos por protagonizar varamientos masivos coincidentes con maniobras

navales en varias partes del mundo. Esto planteaba un reto importante: evaluar el impacto poblacional de los varamientos, y prevenirlos, en especies prácticamente desconocidas para la ciencia. El descubrimiento de poblaciones residentes, de zifios de Blainville y de Cuvier, en las aguas profundas y costeras de la isla de El Hierro, abrió un horizonte de oportunidades al permitir trabajar con estas especies de forma asequible. Se cumple en 2013 una década de investigación continuada de zifios en El Hierro, a lo largo de la cual se han ido alzando los velos de los misterios de su biología y ecología, y también descubriendo otros tesoros de las aguas azules y profundas de la Isla del Meridiano.

El comienzo

Septiembre de 2002: varamiento de 14 zifios en Fuerteventura y Lanzarote coincidente con maniobras navales en el área. Esta mortalidad masiva se une a varias otras ya registradas en el archipiélago canario (Martín *et al.*, 2004) y en otras partes del mundo (Cox *et al.*, 2006), relacionadas con el uso de sonares de alta intensidad para la detección de submarinos, y subraya la importancia de tomar medidas de reducción del impacto. No existen datos sobre el comportamiento de los zifios, ni sobre su sensibilidad auditiva o vocalizaciones, que expliquen su vulnerabilidad a los sonares y permitan diseñar medidas de mitigación. Se forma el “Grupo de Trabajo para la Prevención de Mortandades Masivas Atípicas”, en el que participan las dos universidades canarias, ONGs y representantes de la Viceconsejería de Medio Ambiente, así como de los Ministerios de Defensa y de Medio Ambiente. La Universidad de La Laguna (ULL) plantea trabajar en la isla de El Hierro, en base a los indicios que ha obtenido acerca de la existencia de poblaciones costeras de zifios en la isla, gracias a los muestreos archipelágicos realizados desde 1998 a bordo del barco *Corvette*, y a entrevistas a buceadores y pescadores. Con la financiación mayoritaria del Gobierno de Estados Unidos, y con el apoyo del Grupo de Trabajo citado, del Cabildo Insular de El Hierro y de la Cofradía de Pescadores de Ntra. Sra. de la Virgen de los Reyes, en La Restinga, comienzan las investigaciones de zifios en El Hierro.

Marco del estudio: las aguas profundas de El Hierro

En El Hierro la profundidad es una compañera constante, dado que esta isla tiene la plataforma insular más estrecha del archipiélago canario. Las formaciones geológicas submarinas de El Hierro constituyen un marco físico único. La isla, de origen volcánico, surgió de los fondos abisales que

la rodean y fue extendiéndose a lo largo de grietas (rift) radiales, alineadas de manera similar a los ejes de una pirámide. Esta formación de rifts en estrella se observa en tierra y continua bajo el mar, de modo que cada rift origina una “cordillera” submarina en cada una de las tres puntas de la isla (Fig. 1). Las cordilleras están punteadas por decenas de conos volcánicos, de hasta 275 m de altura, y se extienden hasta 20 km de la costa y 3100 m de profundidad. Entre ellas quedan las tres profundas bahías de Las Calmas, Las Playas y El Golfo, formadas por grandes deslizamientos del edificio aéreo hacia el mar (Masson *et al.*, 2002; Acosta *et al.*, 2004).

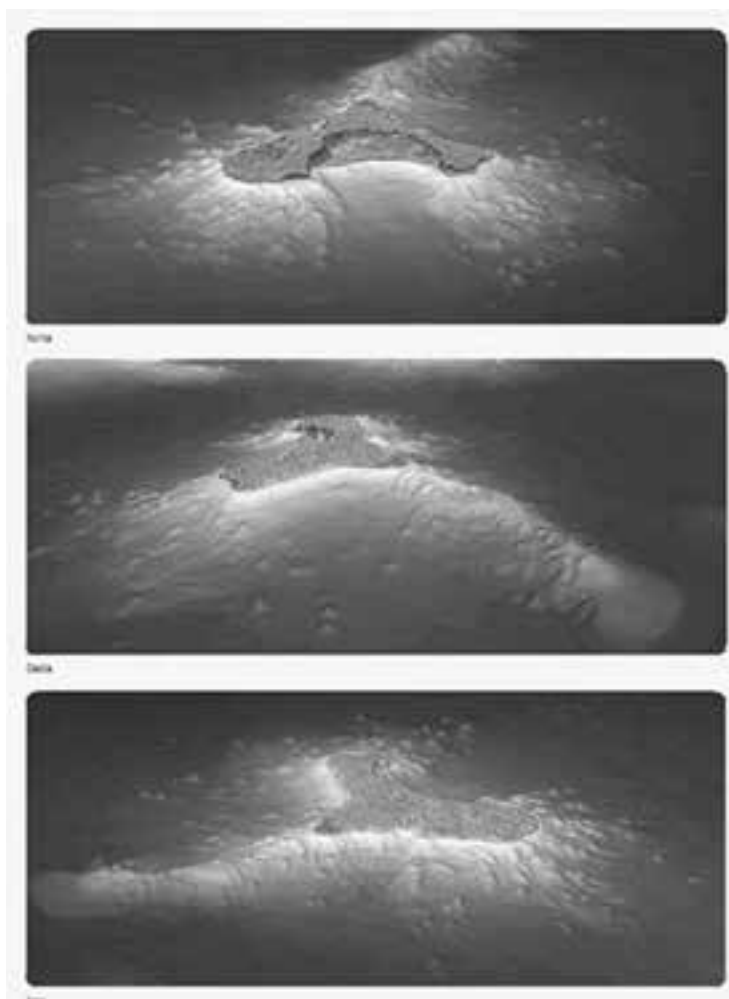


Fig. 1. Orografía submarina de tres vertientes de la isla de El Hierro. Proyecciones batimétricas realizadas por CIMA Canarias (www.cimacanarias.com) en base a la batimetría realizada por el Instituto Español de Oceanografía.

La orografía de la isla influye en su compleja oceanografía, creando remolinos en las puntas y una zona de estela cálida en la bahía de Las Calmas, protegida de los vientos alisios y de la corriente de Canarias dominantes en el archipiélago. Estos fenómenos circulatorios dictan la llegada de aguas frías a Canarias desde el afloramiento de aguas profundas en la costa africana del Sahara. La influencia del afloramiento es menor en El Hierro debido a su localización en el extremo oeste y meridional del archipiélago, lo que hace que sus aguas sean las más tropicales de Canarias. El escarpado relieve submarino y la calidez de las aguas de El Hierro determinan dos de las principales características de sus comunidades marinas: la presencia de especies de aguas profundas a escasa distancia del litoral (Fig. 2), y de especies subtropicales y tropicales en mayor grado que en el resto del archipiélago.



Fig. 2. El coral negro (*Anthipatella wollastoni*) y el tiburón sarda o toro (*Odontaspis ferox*) son ejemplos de especies de aguas profundas que se pueden observar muy cerca de la costa en El Hierro (fotografía del tiburón de Jordi Chias; fotografía del coral: BIOECOMAC).

En la propuesta presentada por la ULL para la declaración de un Área Marina Protegida en El Hierro (Arranz *et al.*, 2011) se resumen algunos valores ecológicos importantes de las aguas de la isla: en sus costas y zonas sublitorales están ampliamente representados dos tipos de hábitats protegidos en el Anexo I de la Directiva Europea Hábitats: los campos de lava y excavaciones naturales, y las cuevas marinas sumergidas o semisumergidas. En cuanto a especies protegidas de fauna marina, listadas en catálogos

regionales, nacionales o internacionales de conservación, se han registrado en El Hierro quince especies de mamíferos (ahora dieciséis, ver Tabla 1, Fig. 3), cinco de tortugas, catorce de aves, seis de peces actinopterigios y diecisiete de invertebrados (dos crustáceos, seis moluscos, cinco equinodermos, tres cnidarios y un porífero). A esto se suman sesenta y tres especies de condriictios (tiburones, rayas y quimeras), en su mayoría incluidos en la Lista Roja de la IUCN.

Tabla 1. Especies de cetáceos (16) registradas en la Isla de El Hierro desde 2003 a 2013.

Especie	Distribución	Nombre ingles	Nombre común (canario y español)
ODONTOCETOS			
Familia Delphinidae			
<i>Delphinus delphis</i>	Cosmopolita *	Common dolphin	Golfera. Delfín común
<i>Steno bredanensis</i>	Pantropical	Rough toothed dolphin	Tonina negra. Delfín de dientes rugosos
<i>Stenella frontalis</i>	Anfiatlántica cálido templada	Pantropical spotted dolphin	Golfera. Delfín moteado atlántico
<i>Stenella coeruleoalba</i>	Cosmopolita *	Striped dolphin	Golfera. Delfín listado
<i>Tursiops truncatus</i>	Cosmopolita *	Bottlenose dolphin	Tonina. Delfín mular
<i>Grampus griseus</i>	Cosmopolita *	Risso's dolphin	Calderón gris
<i>Globicephala macrorhynchus</i>	Pantropical y templado-cálida	Short finned pilot whale	Roas. Calderón de aleta corta o tropical
<i>Orcinus orca</i>	Cosmopolita	Orca, killer whale	Orca
Familia Ziphiidae			
		beaked whales	Roases amarillos. Zifios.
<i>Ziphius cavirostris</i>	Cosmopolita *	Cuvier's beaked whale	Zifio de Cuvier
<i>Mesoplodon densirostris</i>	Cosmopolita * templado-cálida	Blainville's beaked whale	Zifio de Blainville
<i>Mesoplodon europaeus</i>	Anfiatlántica tropical	Gervais beaked whale	Zifio de Gervais
<i>Mesoplodon mirus</i>	Antitropical	True's beaked whale	Zifio de True
Familia Physeteridae			
<i>Physeter macrocephalus</i>	Cosmopolita	sperm whale	Chacalote. Cachalote
Familia Kogiidae			
<i>Kogia spp</i>	Pantropical		Cachalote pigmeo/enano
MISTICETOS			
<i>Balaenoptera spp</i>		Rorquals	Rorcuales
<i>Balaenoptera edeni</i>	Pantropical	Bryde's whale	Rorcual tropical
<i>Megaptera novaeangliae</i>	Cosmopolita	Humpback whale	Yubarta

La flora marina de El Hierro está también representada en los catálogos de conservación de la naturaleza, con dos especies de fanerógamas y dos de algas protegidas presentes en aguas de la isla. Esta riqueza en especies protegidas es relevante, pero el valor del mar de El Hierro no reside únicamente en el número de especies o en su rareza, sino en el estado de

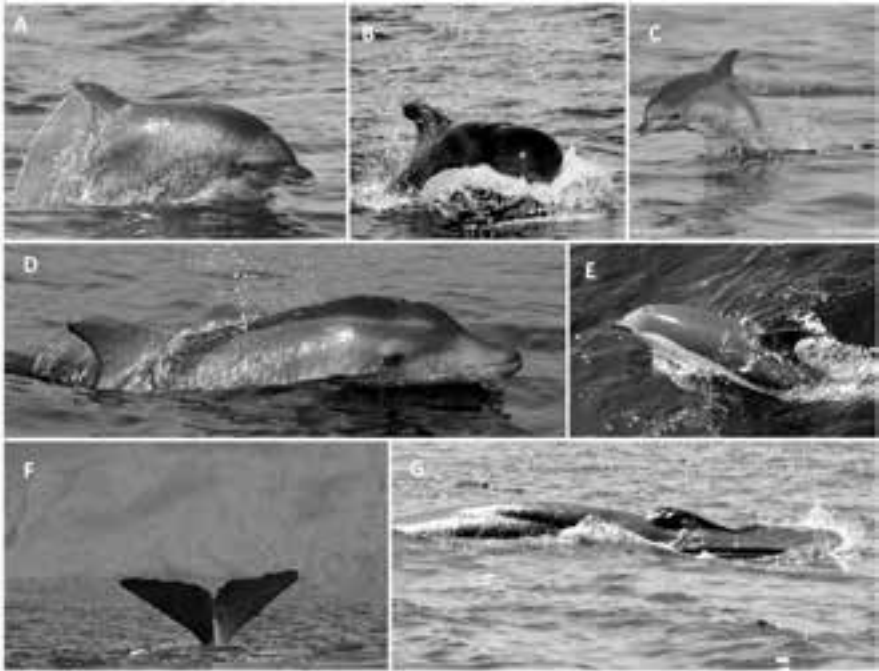


Fig. 3. Algunas de las dieciséis especies de cetáceos en El Hierro: A) Delfín moteado (*Stenella frontalis*); B) Calderón de aleta corta (*Globicephala macrorhynchus*), C) Delfín mular (*Tursiops truncatus*); D) Delfín de dientes rugosos (*Steno bredanensis*); E) Delfín común (*Delphinus delphis*); F) Cachalote (*Physeter macrocephalus*) G) Rorcual tropical (*Balaenoptera edeni*). Fotos de BIOECOMAC tomadas en El Hierro con permiso del Gobierno de Canarias, por: Víctor González Otaola, Natacha Aguilar, Jacobo Marrero y otros investigadores.

naturalidad de sus comunidades marinas. Dentro de las aguas costeras españolas existen pocos lugares donde los procesos ecológicos naturales se encuentren tan bien conservados como en El Hierro. Esto se debe a la escasa población de la isla y al buen manejo de la pesca, que han limitado la actividad extractiva de los recursos marinos, así como al interés general por la conservación del mar como un atractivo importante para el buceo. Las aguas son además limpias, gracias a la escasez de industria y núcleos urbanos en la costa, así como a la lejanía de El Hierro con respecto a fuentes contaminantes de otras islas. El buen estado de conservación de las aguas de El Hierro es origen y consecuencia de varias figuras de protección que concurren en la zona, entre ellas se encuentran la Reserva Marina de interés pesquero Punta de La Restinga-Mar de Las Calmas; la Zona Marina Especialmente Sensible de Canarias, que restringe el paso de grandes buques a 12 millas náuticas del perímetro de las islas (OMI, 2005); la moratoria al uso de sonares navales a una distancia de 50 millas náuticas de

la costa, establecida por el Ministerio de Defensa para la protección de los zifios; o la declaración de El Hierro como Reserva de la Biosfera para la salvaguarda de sus recursos naturales terrestres y marinos.

Los zifios: descripción de las especies y seguimiento poblacional en El Hierro

La familia Ziphiidae es la segunda en número de especies de los cetáceos, con 21 especies citadas en la actualidad, de las cuales algunas se han descrito en la última década. La distribución de los zifios en aguas profundas, normalmente alejadas de costa, hace que se encuentren entre los mamíferos más desconocidos del planeta, con algunas especies descritas únicamente en base a restos óseos de animales varados. Canarias, y particularmente El Hierro, es uno de los pocos lugares del mundo donde se conoce la existencia de poblaciones costeras de zifios durante todo el año (Aguilar de Soto *et al.*, 2003, 2004, 2010; Aparicio *et al.*, 2005; Aparicio 2008). Las poblaciones son de zifios de Blainville y de Cuvier (*Mesoplodon densirostris* y *Ziphius cavirostris*) (Fig. 4, Tabla 2). Ambas especies presentan el particular dimorfismo sexual de la familia Ziphiidae, que no reside en el tamaño, dado que la talla máxima de ambos sexos es similar, sino en la erupción de dos únicos dientes en la mandíbula inferior de los machos adultos, que no son visibles externamente en las hembras ni en los machos inmaduros (Mead, 1989; Heyning, 2002). A ello se une la progresiva acumulación de cicatrices en los machos con la edad, lo que se da en mucho menor grado en las hembras. La coloración general en ambas especies es variable, desde el marrón oscuro al gris, con posibles zonas amarillentas debido a las diatomeas que se adhieren a la piel y que destacan

Tabla 2. Tamaño, peso y longevidad de *Mesoplodon densirostris* y *Ziphius cavirostris* [Basado en 1: Ross (1984, en Mead, 1989), 2: Mead (1989), 3: FAO-UNEP (1994), 4: Heyning (1984)] *Datos de *M. europaeus* (L max: 4,7 m), única especie del género *Mesoplodon* con esta información. Las tallas modales de estas especies son menores que las máximas registradas y sugiere que éstas pueden corresponder a animales erróneamente identificados (MacLeod, 2006).

	<i>Mesoplodon densirostris</i>	<i>Ziphius cavirostris</i>
Longitud en nacimiento (m)	1,9-2,6	2-3
Peso en nacimiento (kg)	60	250
Longitud en maduración sexual (m)	*4,5	?
Edad de maduración sexual	9 (una ♀)	?
Longitud máxima (m)	4,7	6,9
Peso máximo (kg)	1033	3000
Longevidad registrada (años)	48*	?
Referencias	1,2,3	3,4

más en *M. densirostris*, al menos en los individuos observados en El Hierro. Las crías recientes de esta especie pueden tomar una coloración más clara. Los zifios de Cuvier tienen la cabeza blanquecina y, aparentemente, sobre todo en los machos, la proporción de blanco en el cuerpo se va incrementando con la edad.



Fig. 4. El Hierro alberga importantes poblaciones de zifio de Cuvier (izquierda, fotografía de Natacha Aguilar) y de zifio de Blainville (derecha, fotografía de Iván Domínguez).

La cercanía de las aguas profundas a la costa de El Hierro permite realizar muestreos desde puntos fijos, utilizando plataformas de observación en tierra, situadas a unos 100 m de altura en acantilados litorales. En la estación de tierra se utilizan prismáticos de largo alcance (15x70) con retícula vertical y compás magnético, que permiten obtener la distancia y demora (ángulo magnético) al avistamiento. Estos datos permiten calcular la posición geográfica del grupo de cetáceos avistado, que se grafica en tiempo real en un ordenador alimentado con baterías. En el ordenador aparece también la posición del barco de trabajo, el Punta Ballena, que la ULL mantiene en El Hierro. La posición del Punta Ballena es enviada por radio VHF a un receptor conectado al ordenador. La representación en pantalla de estos datos (Fig. 5) facilita el seguimiento de los cetáceos y la localización de los mismos por el barco, dado que desde tierra se le da al barco una distancia y rumbo desde su posición hacia la de los animales. El barco corrobora la identificación a nivel específico del grupo de cetáceos

observado, y obtiene datos de comportamiento, composición social del grupo, y fotografías de los animales.



Fig. 5. Estación de muestreo de zifios y otros cetáceos desde acantilados en tierra, con unos prismáticos de 15x70 cubriendo el área más lejana y dos prismáticos de 7x50 muestreando más cerca de costa. Los prismáticos van equipados con compás y retícula para determinar la localización de los avistamientos. Los datos se registran en tiempo real en un ordenador que plasma en un mapa los avistamientos y tiene herramientas para facilitar el seguimiento de los grupos.

En el caso de los zifios de Cuvier y de Blainville en El Hierro, los grupos son pequeños, normalmente entre dos y siete individuos, aunque también pueden verse animales solitarios y ocasionalmente grupos más grandes, de hasta once animales. La composición social de los grupos es variable, desde dos animales subadultos de género indeterminado, hasta grupos tipo harén, con un macho adulto y varias parejas de hembras con crías. El seguimiento de las poblaciones de zifios (abundancia, estructura social, etc.) se realiza por medio de identificación fotográfica de los individuos, gracias a las marcas permanentes que tienen en todo el cuerpo (Fig. 6). En la última década se han recogido más de once mil fotos de zifios en más de cuatrocientos acercamientos de foto-identificación en las aguas de El Hierro.

En base a estos datos se ha creado uno de los catálogos de identificación fotográfica de los zifios de Cuvier y de Blainville más completos y longevos que existen, junto a los de Bahamas y Hawaii. Este catálogo es accesible al público en general en la base de datos virtual <http://www.cetabase.info/> (Fig. 7), en la que se pueden realizar búsquedas de fotos por especie, género e incluso calidad de las fotografías y cantidad de marcas en el cuerpo (Reyes *et al.*, 2012). Esta larga serie temporal de seguimiento individual de los zifios ha permitido extraer datos sobre aspectos fundamentales de la biología de estos cetáceos, tales como la tasa de natalidad del zifio de Blainville, estimada en una cría cada tres años



Fig. 6. Ejemplo de marcas permanentes (las cicatrices) en el cuerpo de un zifio de Blainville, y de marcas temporales: las algas diatomeas que se observan como manchas amarillas en la aleta dorsal. En este ejemplo el animal hubiera sido irreconocible si se utilizaran sólo las muescas en la aleta dorsal, como es común en otras especies de cetáceos, mientras que las cicatrices del cuerpo permiten su foto-identificación.

gracias a seguimientos de hembras catalogadas con crías sucesivas (Aguilar de Soto *et al.*, 2010; Reyes *et al.*, 2011). La época de reproducción es amplia, como es característico en los cetáceos odontocetos, pero parece haber un pico de nacimiento de las crías en los meses de otoño. El valor de la larga serie temporal de fotoidentificación de zifios en El Hierro es proporcional al tiempo que se consiga continuar, para afianzar la validez estadística de las tendencias observadas, por primera vez para la ciencia en estas especies, con respecto a datos demográficos y de la estructura social de las especies. Todos estos datos conforman la dinámica poblacional de los zifios y, por tanto, influyen en la capacidad de recuperación de sus poblaciones tras una mortalidad natural o relacionada con causas antrópicas. Por ejemplo, las mejores estimas de abundancia en El Hierro muestran que las poblaciones de zifios son pequeñas, de algo más de cien animales, de modo que un varamiento de catorce zifios, como el que se registró en Fuerteventura y Lanzarote en 2002, podría representar un impacto poblacional importante para la supervivencia de las poblaciones locales, si los zifios no son capaces de incrementar su tasa de reproducción para compensar por la mortalidad (Aparicio *et al.*, 2009).



Fig. 7. Ejemplo de las páginas de exploración de la base de datos de identificación fotográfica Cetabase (www.cetabase.info) que mantiene BIOECOMAC para facilitar el intercambio científico de datos y la participación del público en la investigación. La pestaña desplegable a la derecha de la ficha de cada individuo muestra las fechas en las que se obtuvieron avistamientos con fotos del mismo, desde 2003 hasta la actualidad.

Estudios de la ecología acústica de los zifios con marcas digitales

Los cetáceos odontocetos utilizan el sonido para funciones vitales tan variadas como la comunicación, la navegación y la detección de presas y de depredadores. Esto lo realizan por escucha pasiva, y también por ecolocalización activa. Los primeros descubrimientos acerca del uso del sonido por mamíferos para la “visión” en la oscuridad fueron realizados en murciélagos, por autores como Spallazani, Jurine, Maxim o Hartridge, en 1773, 1798, 1912 y 1920, respectivamente (Au, 1993). Sin embargo, fue más tarde cuando se describió realmente el proceso del biosonar para la localización y discriminación de presas en murciélagos (Griffin, 1958). Este autor detectó la emisión de pulsos o chasquidos de frecuencia modulada o de banda ancha, en el rango sónico y ultrasónico (por encima del rango auditivo humano, en 20 kHz), que forman los distintos tipos de biosonar de

los murciélagos. Griffin describió tres fases en el uso del biosonar por los murciélagos: búsqueda acústica de presas con chasquidos ultrasónicos regularmente espaciados, aproximación a la presa con reducción progresiva del intervalo entre chasquidos (ICI o “inter-click interval”) y, finalmente, emisión de un zumbido compuesto por chasquidos más cortos y con un ICI muy reducido, que permite obtener una alta resolución temporal. Constató claramente que la emisión de los zumbidos coincide con la captura física de las presas.

El descubrimiento del biosonar en murciélagos estimuló la investigación a este respecto en cetáceos y, en la década de los cincuenta, numerosos autores realizaron variados experimentos con delfines mulares (*Tursiops truncatus*) en cautividad, describiendo el proceso de ecolocalización en estos animales (revisado en Au, 1993). En una comprobación definitiva, (Norris *et al.*, 1961) taparon los ojos de un delfín mular y observaron que podía seguir solucionando las pruebas que se le presentaban, basándose exclusivamente en el oído. Posteriormente se realizaron experimentos con otras especies de cetáceos odontocetos en cautividad: orca (*Orcinus orca*), calderón de aleta larga (*Globicephala melas*), falsa orca (*Pseudorca crassidens*), beluga (*Delphinapterus leucas*) o marsopa de Dall (*Phocoenoides dalli*) (revisado en Au, 1993).

Así, el sonido constituye un indicador fiable de la actividad de alimentación de los cetáceos odontocetos, y por ello en los estudios de zifios en El Hierro se utilizan los dispositivos DTag (Johnson & Tyack, 2003; Johnson *et al.*, 2009), un tipo específico de marca digital que registra presión (para obtener la profundidad) y temperatura del agua, pero que se diferencia de otros instrumentos, utilizados normalmente para el seguimiento de mamíferos marinos, porque además registra datos acústicos, hasta frecuencias ultrasónicas, y tiene un sistema de sensores de orientación con acelerómetros y magnetómetros en los tres ejes de coordenadas. La frecuencia de muestreo acústico es programable y la de los sensores de orientación es de 50 veces por segundo (Hertzios, Hz), es decir, de gran resolución (Fig. 8).

La electrónica de la marca se introduce en una carcasa con espuma de flotación, de modo que la marca tiende a flotar cuando se liberan las ventosas. La carcasa lleva incorporada una pequeña emisora de radio de VHF, en frecuencias de alrededor de 148 MHz, para el seguimiento de la marca en el animal y su recuperación final. La DTag se adhiere por medio de ventosas al lomo de los cetáceos, donde se coloca con un mástil de posicionamiento tras ser aproximados los animales sin necesidad de capturarlos. Se activa automáticamente cuando el sensor de conductividad le indica que está en agua salada. Las ventosas son construidas específicamente para las DTag, más blandas que las que se incluyen en los paquetes de otras marcas comerciales, de forma que limiten la succión y

posibles alteraciones microvasculares en la dermis del cetáceo. Los datos se almacenan en la memoria física de la marca (tipo Flash) y son descargados a través del puerto de infrarrojos una vez que ésta es recuperada. Posteriormente se recarga la batería y la marca queda lista para un nuevo uso.



Fig. 8. Las marcas DTag son un ordenador miniaturizado, con una batería de alta densidad que alimenta la electrónica y el hidrófono. Todo ello se introduce en una carcasa estanca que puede sumergirse hasta 3000 m. Se coloca con un mástil en el lomo del animal, al que se adhiere con ventosas. El seguimiento se realiza por radio VHF y la marca se recupera una vez se libera del animal tras un tiempo programado de grabación.

Los chasquidos de ecolocalización de los zifios son únicos entre los cetáceos

Los zifios han evolucionado de forma curiosa, sus chasquidos son los únicos registrados para los cetáceos que tienen frecuencia modulada, lo que sin embargo es característico en el sonar de los murciélagos (Griffin, 1967). Los chasquidos normales de ecolocalización, en los cetáceos, son cortos (unos 20-50 microsegundos) y de banda ancha de frecuencias, y las especies estudiadas hasta la actualidad utilizan el mismo tipo de chasquido para la búsqueda de presas a distancia, y en los zumbidos, que marcan los

intentos de captura de las mismas. En El Hierro se describieron por primera vez las vocalizaciones del zifio de Blainville, y el hecho de que los zifios emitan chasquidos diferentes al resto de los cetáceos facilita su identificación en muestreos acústicos de escucha pasiva. Esto es relevante porque facilita el uso de estas técnicas para investigar la distribución de los zifios, o monitorear su presencia, lo que puede ser utilizado para aplicar medidas de reducción del impacto de actividades antrópicas a las que los zifios son vulnerables.

Las características de los dos tipos de chasquidos que emiten los zifios de Blainville son las siguientes (Johnson *et al.*, 2006): los chasquidos regulares de búsqueda de presas a distancia se producen con una separación entre 0,2 y 0,4 s y son de frecuencia modulada. Tienen una forma distintiva de barrido ascendente, a un ritmo de unos 110 kHz/ms, y una duración de 270 μ s, con un ancho de banda de -10 dB desde 25 a 55 kHz (Fig. 9). Estos chasquidos recuerdan a los chasquidos de los murciélagos (Griffin, 1967), pero son completamente distintos a los de otros cetáceos estudiados en dos características principales: son más largos y tienen frecuencia modulada. Por el contrario, los chasquidos emitidos durante los zumbidos son del tipo normalmente descrito para delfinidos: cortos (110 μ s), de banda ancha y sin

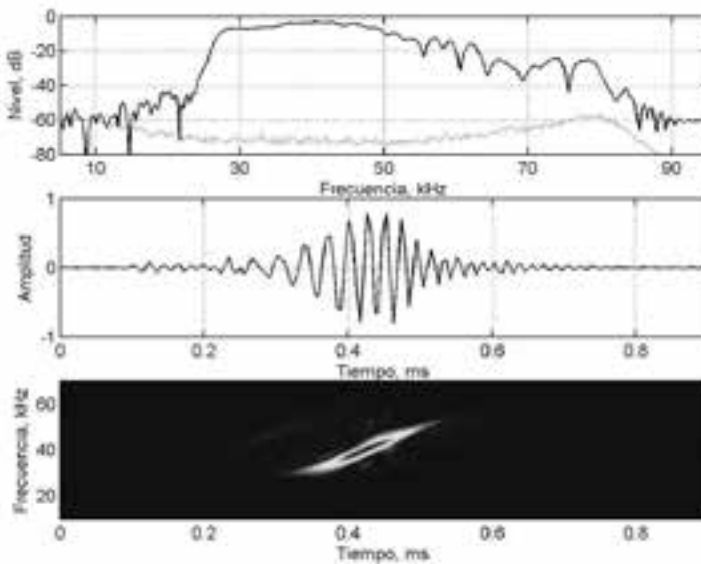


Fig. 9. Chasquido de ecolocalización emitido por un individuo cercano al zifio marcado y en dirección a éste. A) Espectro del chasquido, en el que se observa que la mayor parte de la energía (ancho de banda de -10 dB) está entre 26 y 50 kHz. La línea punteada inferior indica el nivel de ruido del sistema de grabación. B) Gráfica de la amplitud de onda del chasquido. C) Representación del espectrograma del mismo chasquido, donde se observa que es un barrido ascendente de frecuencia modulada.

estructura de frecuencia modulada. Su ancho de banda a -10 dB es de 25 kHz hasta al menos 75 kHz y se emiten con un intervalo de menos de 10 ms, pudiendo llegar a emitir hasta 250 chasquidos/s, lo que les otorga una gran resolución temporal. Además, los chasquidos del zumbido pueden detectar objetos de menor tamaño, dado que alcanzan frecuencias más altas y por tanto de menor longitud de onda, por ello ofrecen una mayor resolución espacio-temporal. Es decir, los zifios utilizan largas series de chasquidos de frecuencia modulada, emitidos con un intervalo de algo menos de medio segundo entre ellos, para buscar presas, y, una vez seleccionada la presa a la que van a atacar, y a corta distancia de ella (unos cuatro metros) pasan a emitir un zumbido. En el zumbido los chasquidos se emiten mucho más rápido, se pasa de la “foto” al “video” acústico, y por tanto se obtiene una mayor resolución sobre los movimientos de la presa, que es necesaria para poder seguirla y capturarla.

Las marcas colocadas en zifios de El Hierro grabaron también ecos de los chasquidos, reflejados por organismos en el agua y por el fondo del mar (Johnson *et al.*, 2004; Madsen *et al.*, 2005; Aguilar de Soto, 2006; Arranz *et al.*, 2011). Estos ecos de presas son los primeros que se han grabado de un animal ecolocalizando y, por tanto, constituyen la primera evidencia directa de cómo los odontocetos utilizan el biosonar para alimentarse mientras nadan en su hábitat. La intensidad de los ecos recibidos desde organismos a distancias conocidas sugiere un nivel de emisión de los chasquidos de los zifios de alrededor de 200-220 dB re $1\mu\text{Pa}$ a 1m (Madsen *et al.*, 2005). Los ecos de chasquidos reflejados en el fondo marino son utilizados para determinar la distancia entre el mismo y el animal emisor (Fig. 10). Las distancias se calculan en base al retraso temporal entre la emisión del

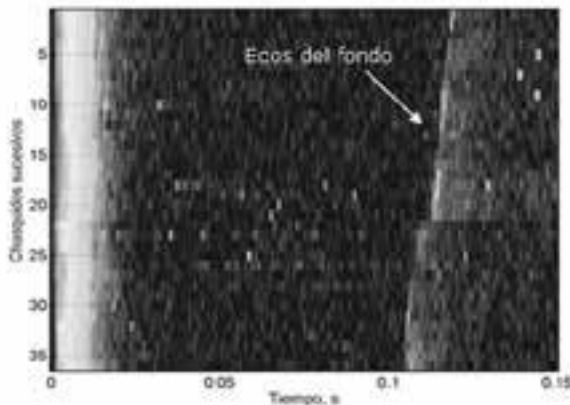


Fig. 10. Ecograma mostrando una serie de chasquidos sucesivos alineados en vertical en el tiempo 0, de modo que los ecos producidos por estos chasquidos en el fondo se ordenan también en una línea difusa a la derecha. Se observa que el animal se va acercando al fondo y en este ejemplo termina a unos 80 m del mismo (considerando la velocidad del sonido en 1500 m/s: $0.106 \cdot 1500/2$).

chasquido y la recepción de su eco, multiplicado por la velocidad media del sonido en el agua (1500 m/s) y dividido entre dos para compensar la doble distancia recorrida por el sonido, desde el cetáceo hasta el fondo/presa y desde éste hasta la marca. Si a la distancia del cetáceo al fondo se suma la profundidad del animal en ese momento, se obtiene la profundidad del fondo.

Los ecos de organismos en el agua (Fig. 11) se observan en la marca con ayuda del mismo tipo de ecograma utilizado para obtener ecos del fondo. En cada pantalla se cuenta el número de series de ecos formando líneas independientes, que deben contener al menos tres ecos sucesivos. El número de series de ecos es indicativo de la cantidad de biomasa en la columna de agua (Madsen *et al.*, 2005; Aguilar de Soto, 2006; Arranz *et al.*, 2011). El análisis de la distribución de los ecos mostró capas de mayor agregación de organismos a profundidades de entre unos 600 y 800 m. Esto coincide con la localización de la denominada "capa de reflexión profunda" (DSL o deep scattering layer), compuesta por miríadas de organismos de pequeño tamaño, principalmente peces mictofidos, que realizan migraciones verticales circadianas. De día se refugian en profundidad de los depredadores visuales de las capas someras, y de noche parte de los organismos de la DSL asciende para alimentarse en las aguas más ricas cercanas a la zona fótica.

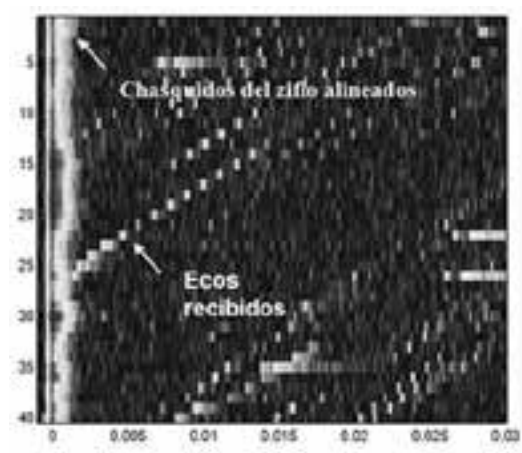


Fig. 11. Ecograma en el que se observan los chasquidos del animal marcado alineados verticalmente en la línea clara de la izquierda. Los números del eje de ordenadas indican el número sucesivo de chasquido y, en el eje de abscisas, el tiempo en segundos desde la emisión de cada uno. Los ecos reflejados por organismos en el agua se observan como líneas diagonales. En la mayoría de los casos el zifio se mueve más rápido que los organismos que reflejan los ecos, por lo que se acerca a los mismos. Así, se observa que las líneas de ecos comienzan en un punto alejado (mayor separación en el eje de las X = mayor distancia) y se van acercando a la línea de chasquidos del animal emisor.

Lo que los chasquidos, zumbidos y ecos dicen de la ecología de alimentación de los zifios

Los zifios de Cuvier y de Blainville sólo son vocalmente activos durante las inmersiones de alimentación (Johnson *et al.*, 2004; Aguilar de Soto, 2006; Tyack *et al.*, 2006). Arranz *et al.* (2011) resume así el comportamiento acústico durante los buceos del zifio de Blainville: esta especie realiza inmersiones profundas y de larga duración, siendo en promedio la profundidad máxima 800 m (472-1330 m) y la duración casi 50 min (23-65 min). Los zifios empiezan a ecolocalizar a una profundidad media de 400 m (169-873 m), después de un descenso en silencio de aproximadamente 4 min de duración (1-11 min). Estos animales cesan de ecolocalizar a una profundidad media de 700 m (273-1027 m) y realizan ascensos en silencio de una duración media de casi 20 min (9-35 min). La suma de las fases de descenso y ascenso en silencio resulta en una duración media de la fase de transporte en silencio, entre la superficie y la capa de alimentación, de 24 min (12-33 min). La fase de búsqueda de alimento, durante la que los zifios ecolocalizan, tiene una duración media de 24 min (9-38 min), durante la cual los zifios producen un promedio de 27 zumbidos (4-53 zumbidos) o intentos de captura de presas. Entre inmersiones profundas consecutivas, los zifios de Blainville pasan normalmente una hora y media (4-188 min) realizando series de buceos de recuperación, a menor profundidad, durante los que permanecen en silencio, por lo que estos buceos no se consideran relacionados con la alimentación (Aguilar Soto, 2006; Tyack *et al.*, 2006; Aguilar de Soto *et al.*, 2012). Así, en total los zifios de Blainville dedican un 18 % de su tiempo al transporte en las inmersiones profundas, un 18 % a la búsqueda y adquisición de presas mediante ecolocalización y un 64 % a realizar inmersiones someras, entre buceos profundos (Fig. 12). Una vez iniciada la fase de búsqueda en los buceos, los zifios invierten un promedio de tan sólo 2 min (0,6-3,1 min) antes de realizar el primer intento de captura de una presa (zumbido).

Los modelos generales de optimización del aprovisionamiento definen para los depredadores una estrategia “generalista” y otra “especialista”. La primera se caracteriza por una escasa selección de presas, de modo que se invierte poco tiempo en la localización de las mismas y se ingiere la mayoría de las que se encuentran, con mayor o menor contenido energético. La estrategia especialista se define por una mayor inversión en la búsqueda y selección de presas, que pueden requerir altos gastos de energía para su captura, pero serán presas calóricas. El comportamiento de los zifios indica que son animales altamente especializados, en cuanto a que no inician la búsqueda de alimento hasta que se encuentran en profundidad, invirtiendo la mitad del tiempo en cada buceo en el transporte desde la superficie hasta la capa de alimentación. Sin embargo, una vez están en la zona de caza, su

comportamiento es más generalista, aprovechando recursos mesopelágicos (de aguas libres entre 200 y 1000 m de profundidad) y demersales, de especies ligadas al fondo.

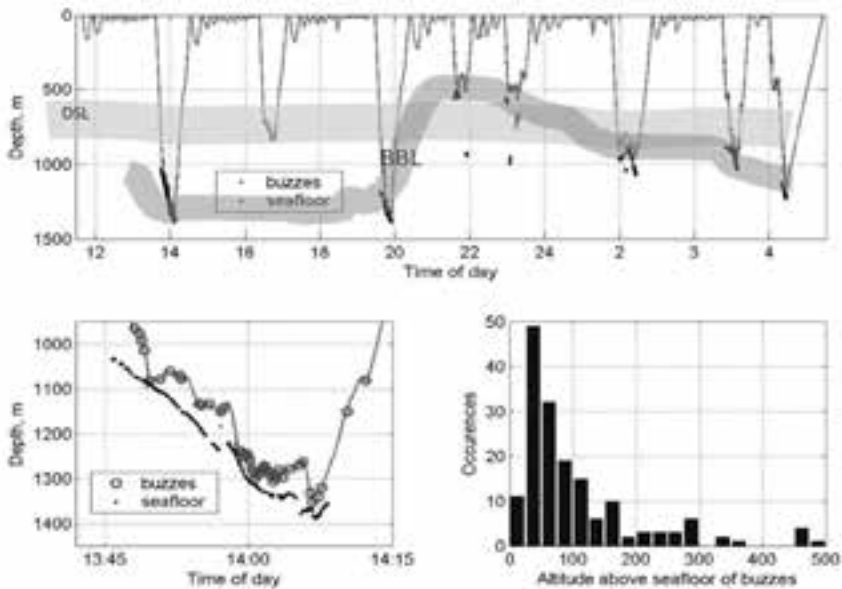


Fig. 12. Ejemplo de perfil de inmersión con ocho buceos de alimentación, separados por buceos más cortos y someros de recuperación, y con la fase vocal de uno de los buceos ampliada abajo. Se plasma la fase vocal de cada inmersión, en la que los zifios emiten chasquidos de ecolocalización, en gris grueso; los zumbidos (buzzes), indicando los intentos de captura de presas, se representan con círculos, y la localización del fondo (seafloor) con puntos bajo la línea del buceo. El histograma muestra la distribución de la altitud sobre el fondo a la que se realizan los intentos de capturas de presas, para todos los zumbidos para los que se detectaron ecos del fondo marino. Se pinta en el perfil de inmersión la BBL, la capa límite bentónica, definida como 200 m de altitud sobre el fondo, así como la DSL, la capa de reflexión profunda, que se encuentra normalmente a unos 600-800 m en las aguas de Canarias. Estas capas constituyen agregaciones de biomasa en el océano profundo.

Los ecos provenientes de organismos, registrados en las marcas de los zifios de Blainville, indican que hay fuertes variaciones en la concentración de biomasa a lo largo de la columna de agua y que los zifios no siempre se alimentan en las capas de profundidad con mayor abundancia de ecos, sino que muchas veces la superan y se alimentan más abajo. Se alimentan tanto en la capa de reflexión profunda (DSL) como por debajo de ésta, probablemente de los depredadores que ascienden del fondo para capturar las pequeñas especies que componen la DSL. Esto demuestra que están

realizando selección de presas, en ocasiones dentro de concentraciones muy densas de organismos como las que se encuentran en la DSL, conformando un modelo intermedio entre estrategias generalistas y especialistas.

Los mamíferos de buceo profundo invierten una parte importante del tiempo en el transporte entre la superficie y las cotas de alimentación (Kramer, 1988; Fedak & Thompson, 1993), por lo que la inversión en la localización de las presas es alta. Desde este planteamiento, los zifios se encuadran directamente dentro de la estrategia especialista. No obstante, si se define el tiempo de búsqueda como el invertido en localizar las presas una vez en las profundidades objetivo, obviando el coste de transporte entre éstas y la superficie, se observa que la estrategia del zifio de Blainville se acerca más al modelo generalista. En los buceos capturan múltiples presas, realizando una media de un intento de captura de presa por minuto, una vez en la fase de ecolocalización. Así, estas presas no parecen requerir tiempos de manipulación (persecución, captura e ingestión) elevados; probablemente, la eficiencia energética de esta estrategia se basa más en el gran número de presas ingeridas que en su contenido calórico individual.

Probablemente para tener acceso a los dos tipos de hábitat en los que se alimentan en aguas profundas: la capa mesopelágica y la BBL, los zifios muestran en El Hierro una preferencia por el talud de la isla, como demuestra el modelado realizado en base a más de 1500 avistamientos de zifios obtenidos en El Hierro (Fig. 13).

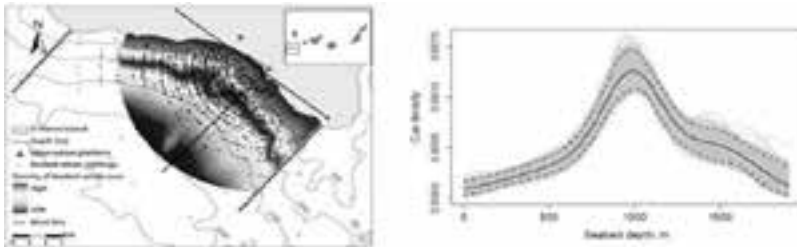


Fig. 13. Preferencias de hábitat de los zifios: datos observados y modelados en base a detecciones visuales en El Hierro. Los puntos negros en el mapa son avistamientos de zifios recogidos de 2004 a 2010 desde una plataforma de observación (triángulo en tierra) situada en la costa suroeste de la isla de El Hierro. El área de observación coincide con la zona de aguas encalmadas delimitada por las líneas de cizalladura del viento dominante (wind lines). Se utilizó un sistema de coordenadas (x, y) a partir del punto de orientación, orientado tal y como se muestra en la figura, para definir la localización de los avistamientos. Se realizó un modelado estadístico y los resultados acerca de la distribución de densidad de avistamientos de zifios en relación a la profundidad se representan según una escala de grises. A la derecha se muestra el ajuste de dicho modelo (línea central) y los intervalos de confianza del 2,5 y 97,5 % (líneas discontinuas inferior y superior, respectivamente). La mayor densidad de avistamientos de zifios (cue density) se espera alrededor de la cota batimétrica (seabed depth) de los 1000 m. Figuras de Arranz *et al.* (en prensa).

El efecto volcán en los zifios de El Hierro

Cuando en octubre de 2011 se inició la erupción volcánica que creó un nuevo cono submarino en la isla de El Hierro, levantándolo hasta tan solo 80 m de la superficie (Fig. 14), se planteó la posibilidad de que los zifios se alejaran de la zona. Sin embargo, el seguimiento longitudinal de las poblaciones de zifios en El Hierro ha permitido evidenciar que no han sido afectadas por la erupción volcánica submarina. Durante el pico de la erupción se observaron las dos especies de zifios residentes en las aguas de El Hierro, aunque sin entrar en la zona de “mancha volcánica”. En el año siguiente se han continuado observando las dos especies, sin que se muestre un impacto evidente en su densidad.

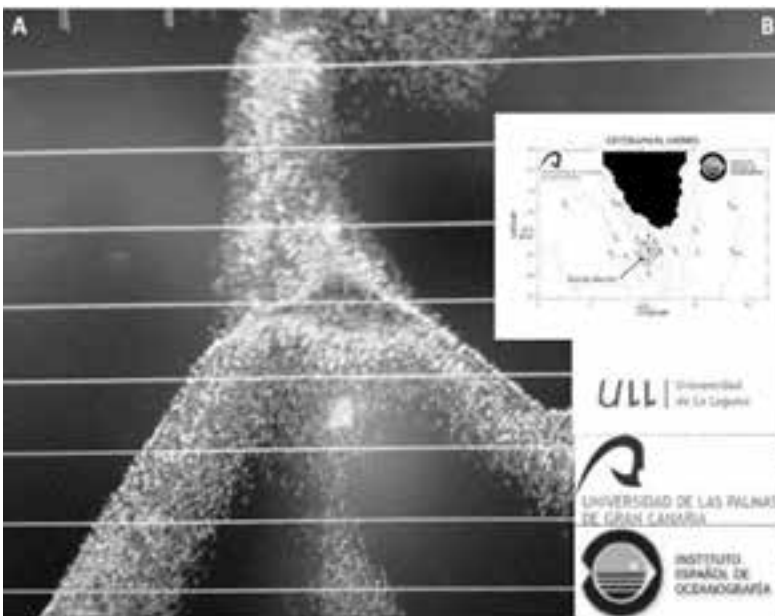


Fig. 14. Imagen de la ecosonda del buque Cornide de Saavedra, mostrando una salida de gases del nuevo cono volcánico del sur de la isla de El Hierro.

La aparición de numerosos peces de profundidad muertos, flotando en superficie, durante la erupción volcánica y en los meses posteriores, indica que es posible que haya habido una afección a los recursos alimentarios de los zifios. Aunque es cierto que en la zona del nuevo cono volcánico es previsible que las comunidades demersales no sean aún adecuadas para la actividad trófica de los zifios, las comunidades mesopelágicas, y las de

fondo en zonas del talud alejadas del volcán, parecen haberse recuperado adecuadamente.

Para investigar el hábitat de los zifios en El Hierro se realizaron dos campañas de pesquerías experimentales mesopelágicas, con redes de arrastre profesionales, desde el buque La Bocaina (Instituto Marítimo Pesquero de Lanzarote, Viceconsejería de Pesca del Gobierno de Canarias) y desde el buque Cornide de Saavedra, del Instituto Español de Oceanografía (Fig. 15). La primera se realizó antes de la erupción volcánica, en 2009, y la segunda después, en abril de 2012. Los análisis preliminares no mostraron diferencias evidentes entre las dos pescas en cuanto a composición específica y abundancia de las capturas. Las pescas, que se realizaron en La Palma, Tenerife y El Hierro para aportar una visión comparativa de las comunidades de aguas profundas, mesopelágicas, de las islas, han permitido identificar 180 especies de peces, 49 especies de crustáceos y 37 de cefalópodos (Fig. 16).



Fig. 15. Investigaciones de oceanografía biológica, física y química en las aguas profundas de El Hierro, con los buques Bocaina (Instituto Marítimo Pesquero de Lanzarote) y Cornide de Saavedra (Instituto Español de Oceanografía). Se realizaron pescas experimentales hasta 900 m de profundidad, muestreos de plancton hasta 200 m y de agua hasta 2000 m.

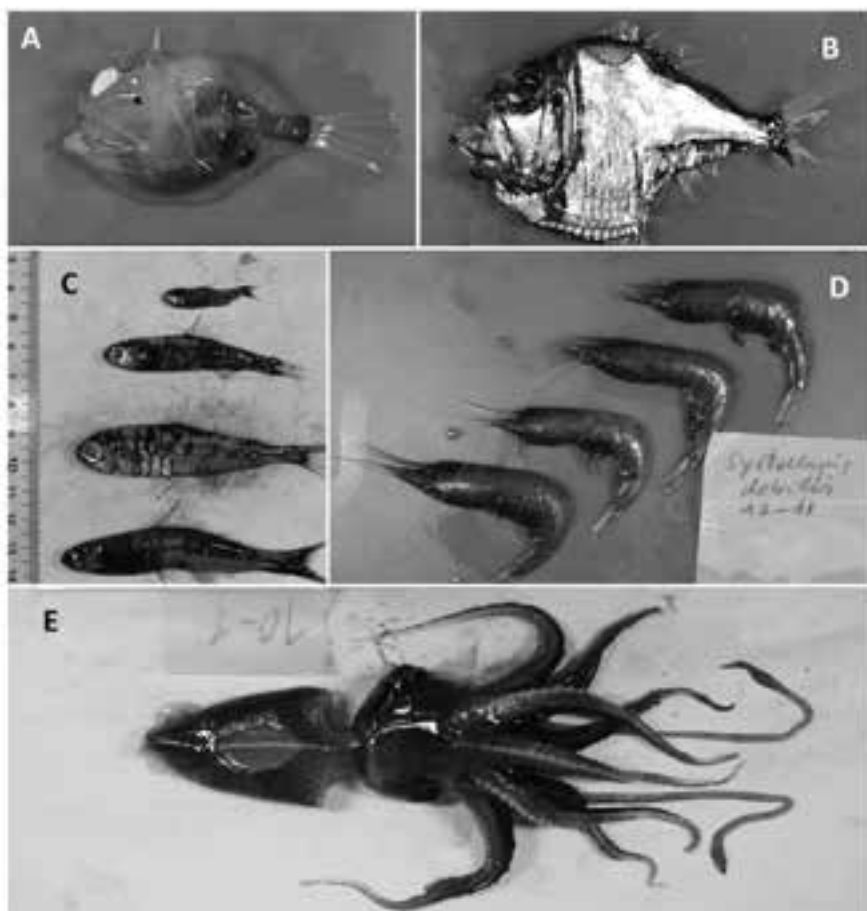


Fig. 16. Ejemplos de organismos mesopelágicos (de vida libre en la columna de agua entre 200 y 1000 m) capturados en las campañas: A) Hembra de *Haplophryne mollis*; B) Pez hacha *Argyropelecus aculeatus*; C) Varias especies de mictófidos, la familia más abundante en la capa de reflexión profunda; D) Crustáceos *Systellaspis debilis*; E) Moluscos cefalópodos: *Histioteuthis meleagroteuthis*. Se observa la importancia de los fotóforos para estos organismos, tanto para señalar con fines de comunicación, como para atraer presas o camuflar su presencia, por ejemplo, los fotóforos ventrales del pez hacha transmiten una luz similar a la que llega desde superficie, haciéndolos invisibles ante depredadores más profundos. Fotos de Alejandro Vicente Ariza.

La vida social de los zifios en El Hierro

Para todos los mamíferos marinos es importante la comunicación y destaca para ello el uso de señales acústicas, aprovechando así las buenas propiedades del agua para la transmisión del sonido. Las grandes ballenas utilizan llamadas en bajas frecuencias, que sufren poca pérdida por

absorción en el mar y pueden ser detectadas a miles de kilómetros, al menos antes de que el ruido de los buques incrementara el sonido ambiente natural, reduciendo el rango espacial de las señales (Payne & Webb, 1971). Esta comunicación a larga distancia está adaptada a la forma de vida de las ballenas, que normalmente viajan solitarias o en grupos pequeños y han de encontrarse para el apareamiento. Los cetáceos con dientes, odontocetos, viven normalmente en grupos sociales más grandes y sus señales de comunicación se utilizan principalmente para comunicarse dentro del grupo, o con animales relativamente cercanos. Utilizan una gran variedad de llamadas pulsadas y tonales para comunicarse, con frecuencias medias o altas que sufren absorción por las moléculas de agua, por lo que los rangos de detección acústica son menores.

Los sonidos que emiten los zifios son mayoritariamente chasquidos de ecolocalización, pero se ha descubierto recientemente que, al menos el zifio de Blainville, produce también silbidos y sonidos pulsados de comunicación (Aguilar de Soto *et al.*, 2012). Estos autores describen que incluso los sonidos de comunicación se emiten solamente en profundidad, constituyendo de hecho los silbidos más profundos registrados para un mamífero marino. El aumento de presión que se da con la profundidad afecta al sistema neumático que utilizan los cetáceos para producir sonidos: una serie de sacos aéreos localizados delante del cráneo. Esto se ha evidenciado, por ejemplo, en que los calderones del sur de Tenerife tienden a reducir la potencia y duración de sus llamadas de comunicación en profundidad (Jensen *et al.*, 2011). Los silbidos registrados en El Hierro son los únicos grabados para el zifio de Blainville en el mundo, y esto es debido probablemente a su escasa duración (media de 0,2 s), quizá relacionada con la influencia de la presión hidrostática, y a que los silbidos se emiten muy raramente. Son muy estereotipados, con poca modulación de frecuencias y numerosos armónicos. La frecuencia fundamental se encuentra entre 11 y 13 kHz, mientras que los armónicos alcanzan el rango ultrasónico. Los silbidos se emiten normalmente en series de dos a más de cinco (Fig. 17).

Además de los silbidos, que son escasos, los zifios producen unas llamadas pulsadas de comunicación que se han denominado “rasps” (Fig. 18). Estas señales tienen una duración media de 0,6 s y contienen de media 90 chasquidos de frecuencia modulada, con un intervalo entre chasquidos de unos 5 ms. El hecho de que puedan emitir chasquidos de frecuencia modulada tan rápidamente demuestra que cuando utilizan el otro tipo de chasquidos, más cortos, en los zumbidos, no lo hacen por limitaciones de su sistema de emisión acústica, sino para optimizar el funcionamiento de su biosonar.

Es sorprendente que los zifios de Blainville y de Cuvier (llamados “roases” en El Hierro) pasen en silencio más de un 80% de su tiempo, considerando que viven en grupos sociales altamente coordinados (Aguilar

de Soto, 2006). Aún es un misterio cómo consiguen mantener la cohesión social durante el tiempo en el que están en silencio, aunque pasen la mayor parte del tiempo en la capa fótica (en la que aún hay luz, Fig. 19), dado que no emiten sonidos cerca de superficie tampoco de noche, y se pueden separar durante el día a distancias mayores que a las que puede darse detección visual, y luego volver a reunir los grupos.

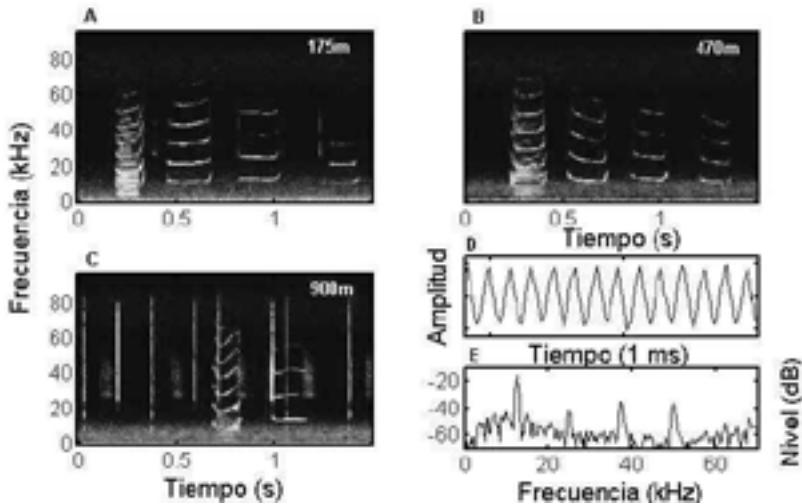


Fig. 17. Silbidos de zifios de Blainville registrados en animales estudiados con DTag en El Hierro, que es el único lugar donde se han podido grabar silbidos de zifios en libertad. Se indica la profundidad del animal en el momento de emitir los silbidos. El valor más extremo registrado para un mamífero marino es el de un zifio que silbó a 900 m de profundidad, desafiando los retos que la presión hidrostática impone sobre su sistema neumático de producción acústica.

Los animales que se comunican han de equilibrar los beneficios y costes que se derivan de emitir señales, tales como un incremento del riesgo de depredación. En el caso de los cetáceos, las vocalizaciones pueden ser oídas por orcas, que depredan sobre una gran variedad de mamíferos marinos y peces, y tienen un agudo sentido del oído. Hay distintas tácticas para la defensa ante depredadores, una de ellas es formar grupos de gran tamaño que puedan constituir un reto para el depredador (caso por ejemplo de los calderones), o diluir su efecto a nivel poblacional. Los zifios viven en grupos sociales pequeños y tienen tasas reproductivas bajas, por lo que no pueden enfrentarse a las orcas, y cada individuo de la población es importante.

Además, las adaptaciones fisiológicas que permiten a los zifios mantener un bajo consumo energético, para soportar largos periodos en

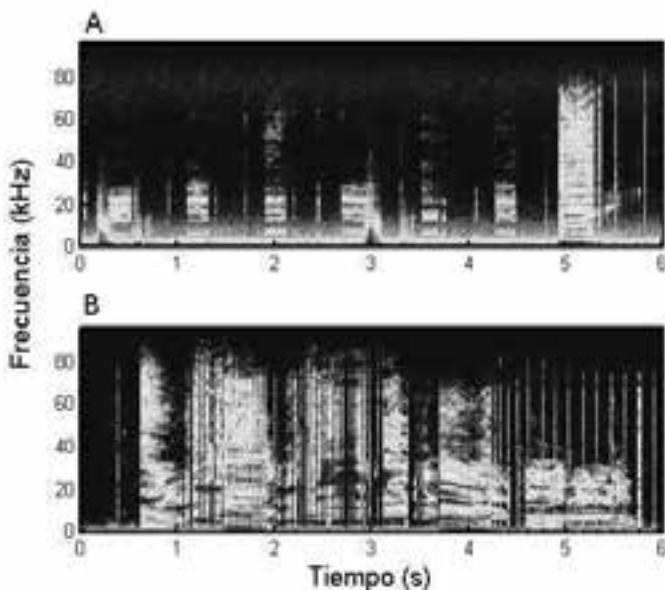


Fig. 18. Señales pulsadas de comunicación: los *rasps*. Se observa en las figuras un intercambio de señales entre el animal que lleva la marca y otros congéneres cercanos. La DTAG registra bajas frecuencias en los chasquidos que forman los rasps producidos por el animal marcado, debido a que estas bajas frecuencias se transmiten por el cuerpo del zifio. Por ello, no están presentes en los rasps producidos por animales vecinos, facilitando la identificación de la fuente de las señales.

apnea (Aguilar de Soto, 2006), limitan sus posibilidades de hacer frente a las orcas o escapar de ellas con movimientos de gran potencia. Así, la estrategia que parecen haber adoptado los zifios es la de evitar ser detectados. Esto explica por qué evitan vocalizar cerca de la superficie (las orcas no bucean a más de 200 m), y los largos ascensos silenciosos desde las inmersiones profundas. Estos ascensos se realizan en ángulo, de modo que los zifios pueden recorrer distancias de más de una milla durante los mismos, lo suficiente como para esquivar a un depredador que pudiera haberlos detectado acústicamente mientras los zifios emitían chasquidos durante el buceo de alimentación. La importancia que parece haber tenido la evitación de depredadores en la evolución del comportamiento de los zifios podría explicar que reaccionen de forma extrema ante sonidos, como los sonares navales, que coinciden con el rango de frecuencias de las llamadas de las orcas y podrían ser confundidos con éstas. Una fuerte reacción de escape es la explicación más aceptada como causa de las embolias observadas en los zifios varados a causa del uso de sonares navales (Jepson *et al.*, 2003). Esta reacción alteraría los mecanismos usuales de regulación fisiológica requeridos para poder realizar las hazañas de buceo que a nosotros nos asombran, y que para un zifio son normales.

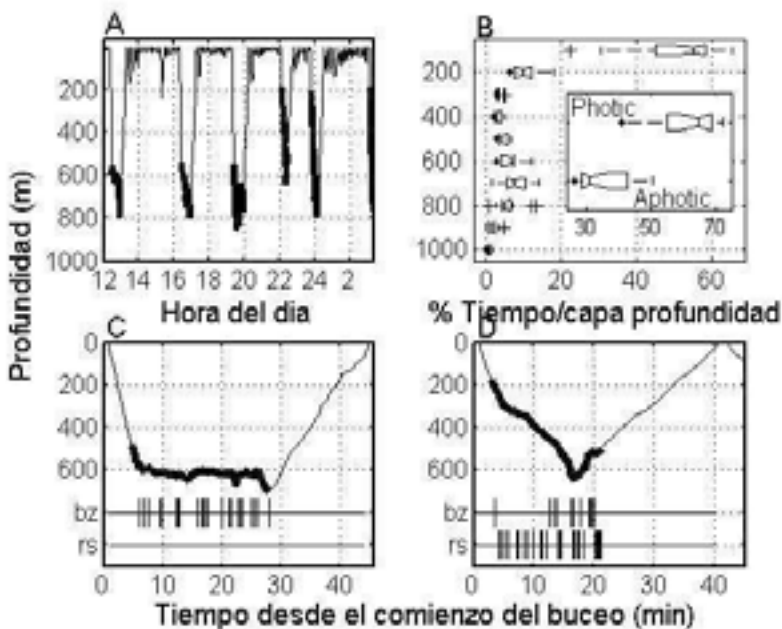


Fig. 19. A) Ejemplo del perfil de buceo de un zifio de Blainville, marcando con una línea gruesa el tiempo durante el que se encuentra vocalmente activo. B) Porcentaje de tiempo que los zifios pasan a distintas profundidades, agrupándolas en la capa fótica (< 200 m) y afótica, donde llega poca radiación lumínica. C) Muestra un buceo normal de un zifio, marcando con líneas verticales la ocurrencia de zumbidos (bz) y rasps (rs), se observa cómo el animal intenta cazar presas con los zumbidos regularmente a lo largo de la fase vocal del buceo (línea engrosada). D) Es una inmersión anómala, altamente comunicativa, en la que el zifio emitió muchos rasps.

Se dibuja así el mosaico “zifio”, un animal altamente especializado para poder aprovechar el nicho que ofrecen las aguas profundas, el ecosistema más extenso del planeta. Una de sus piezas clave es el ahorro de energía, con una anatomía y fisiología que le permiten reducir sus costes metabólicos y alimentarse de presas abundantes en las aguas profundas, pero de relativamente escaso contenido calórico (el zifio realiza unos 200 intentos de captura de presas al día). Esta estrategia es similar a la de los équidos, animales que pueden aprovechar vegetación poco nutritiva, lo que les permite extender su distribución a zonas más pobres, donde otras especies más selectivas no pueden competir. Ello explica que los zifios se distribuyan en las aguas profundas y oligotróficas de las grandes cuencas oceánicas, los mal llamados “desiertos marinos”, aunque sin poder mantener densidades altas. El nicho al que se han adaptado no es accesible para muchas otras especies de cetáceos, dado que requiere una gran

capacidad de apnea que solamente presenta el cachalote, gracias a su gran tamaño corporal, que le permite almacenar mucho oxígeno en la mioglobina de los músculos. Otras especies pueden descender a grandes profundidades, pero por periodos cortos de tiempo, durante los que no pueden permitirse capturar presas poco calóricas que no compensarían el coste de transporte (por ejemplo, los calderones). Así, los zifios evitan competencia y aumentan su rango de distribución, pero todo ello tiene un coste: su bajo metabolismo resulta en poca potencia para escapar o enfrentarse a los depredadores, y los pequeños grupos sociales y bajas densidades otorgan escasa resistencia ante una depredación continuada. Las orcas eran más abundantes en el pasado, pero ahora hay otro depredador en los mares: el ser humano. En Canarias se ha establecido una moratoria al uso de los sonares navales dentro de 50 millas náuticas del archipiélago. Esta medida ha sentado un precedente internacional y ha prevenido nuevas mortandades atípicas de zifios en la última década. Es un ejemplo de que sí se pueden tomar medidas efectivas para proteger las riquezas marinas de Canarias.

Agradecimientos

En estos diez años de trabajo en El Hierro ya han participado más de ciento cincuenta investigadores y estudiantes en prácticas de mas de diez nacionalidades. A todos ellos nuestro más sincero agradecimiento por todas esas horas de sol y paciencia, esperando el fin del buceo del zifio, y de alegrías compartidas. Especialmente a Jacobo Marrero, Andrea Fais, Ana Crespo, Cristina Aparicio, Marta Guerra, Alejandro Padrón, Iván Domínguez, Francisca Díaz, Aitziber Hernández, Marta Tobeña, Marcel Gil, Moneiba Casañas, y ... muchos más querría mencionar. También gracias a Herzog y a Francisco, por su gran ayuda con los barcos, y a las personas de La Restinga que nos hacen sentirnos en casa: Cacho, Gladis y familia, Aurelio, Fernando Gutierrez, la saga Noé (Cati, Chuchi, Jose), Juan Piloto y Juan “abogado”, y un largo etcétera. Fernando Gutiérrez, presidente de la cofradía de pescadores de La restinga, y Pedro Cano-Manuel, dueño del centro de buceo El Submarino, nos acogieron cuando llegamos a El Hierro e impulsaron nuestro trabajo, que continuaremos con su colaboración.

Referencias

- ACOSTA, J., E. UCHUPI, A. MUÑOZ, P. HERRANZ, C. PALOMO, M. BALLESTEROS & ZEE WORKING GROUP (2004). Geologic evolution of the Canarian Islands of Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria and La Gomera and comparison of landslides at these islands with those at Tenerife, La Palma and El Hierro. *Marine Geophysical Researches* 24: 1-38.
- AGUILAR DE SOTO, N. (2006). Comportamiento acústico y de buceo del Calderón y Zifio de Blainville en las Islas Canarias. Tesis doctoral, Universidad de La Laguna, Tenerife, España.

- AGUILAR DE SOTO, N., P. ARRANZ, P. MADSEN & M. JOHNSON (2011). Deep habitat selection by beaked and pilot whales. Symposium CLIOTOP at the International Biologging Conference. Tasmania. March 2011.
- AGUILAR DE SOTO, N., M. JOHNSON, C. APARICIO, F. DÍAZ, I. DOMÍNGUEZ, M. GUERRA, A. HERNÁNDEZ, A. BOCCONCHELLI, A. BRITO & P. TYACK (2004). High concentrations of beaked whales found near the coast of El Hierro, Canary Islands. Poster. European Research on Cetaceans 18th. Sweden. April 2004.
- AGUILAR DE SOTO, N., M. JOHNSON, P. ARRANZ, P. TYACK, E. REVELLI & P. MADSEN (2011). Whales that click together, stick together: social cohesion in beaked whales and implications for female size. International Biologging Conference. Tasmania. March 2011.
- AGUILAR DE SOTO, N., M. JOHNSON, F. DÍAZ, I. DOMÍNGUEZ, C. APARICIO, A. BOCCONCHELLI, A. BRITO & P.L. TYACK (2003). Cetáceos de hábitos profundos en Canarias. *Makaronesia* 5: 46-57.
- AGUILAR DE SOTO, N., M. JOHNSON, P.T.M. MADSEN, P.L. TYACK, A. BOCCONCELLI & F. BORSANI (2006). Does intense ship noise disrupt foraging in deep-diving Cuvier's beaked whales (*Ziphius cavirostris*)? *Marine Mammal Science* 22: 690-699.
- AGUILAR DE SOTO, N., C. REYES, A. CRESPO, A. SCHIAVI, C. APARICIO, P. ARRANZ, J. MARRERO, A. FAIS, A. ESCÁNEZ, F. AGUILAR & A. BRITO (2010). Zifios en las Islas Canarias occidentales. Tamaño poblacional y distribución en El Hierro. Informe para TRAGSEGA y el Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Universidad de La Laguna, La Laguna, España. 60 pp.
- AGUILAR DE SOTO, N., P.T. MADSEN, P. TYACK, P. ARRANZ, J. MARRERO, A. FAIS, E. REVELLI & M. JOHNSON (2012). No shallow talk: Cryptic strategy in the vocal communication of Blainville's beaked whales. *Marine Mammal Science* 28(2): E75-E92, DOI: 10.1111/j.1748-7692.2011.00495.x
- APARICIO, C., M. GUERRA, A. HERNÁNDEZ, A. PADRÓN, F. DÍAZ, I. DOMÍNGUEZ, A. BRITO, M. JOHNSON & N. AGUILAR DE SOTO (2005). Resident and reproductive populations of beaked whales in El Hierro, Canary Islands. European Research on Cetaceans 19th, France, April 2005.
- APARICIO, C. (2008). Abundance estimates of beaked whale populations in El Hierro Island. Proyecto presentado para la obtención de la suficiencia investigadora, Universidad de La Laguna, Tenerife, España.
- APARICIO, C., N. AGUILAR DE SOTO & A. CRESPO (2009). Should beaked whales be protected or “data defficient”? a population approach to their status of conservation. European Research on Cetaceans 23rd, Turkey. March 2009.
- ARRANZ, P., N. AGUILAR DE SOTO, P. MADSEN, A. BRITO, F. BORDES & M. JOHNSON (2011). Following a foraging fish-finder: fine-scale habitat use of deep diving Blainville's beaked whales revealed by echolocation. *PLOS ONE* 6(12), DOI:10.1371/journal.pone.0028353
- COX, T.M., T.J. RAGEN, A.J. READ, *et al.* (2006). Understanding the impacts of anthropogenic sound on beaked whales. *Journal of Cetacean Research and Management* 7: 177-187.
- FAO-UNEP (1994). *Marine mammals of the world*. Roma: FAO-UNEP.

- FEDAK, M.A. & D. THOMPSON (1993). Behavioural and physiological options in diving seals. *Symposium Zoological Society of London* 66: 349-368.
- HEYNING, J.E. (2002). Cuvier's beaked whale. In: Perrin, W.F., B. Würsig & J.G.M. Thewissen (Eds), *Encyclopedia of marine mammals*, pp. 305-307. Academic Press. San Diego.
- HOOKE, S.K., A. FAHLMAN, M. MOORE, N. AGUILAR DE SOTO, *et al.* (2011). Deadly diving? Physiological and behavioural management of decompression stress in diving mammals. *Proceedings of the Royal Society of the UK*. B doi:10.1098/rspb.2011.2088
- JENSEN, F., J. MARRERO, M. JOHNSON, N. AGUILAR DE SOTO & P. MADSEN (2011). Calling under pressure: deep social calls of short-finned pilot whales. *Proceedings of the Royal Society of the UK. B*. DOI: 10.1098/rspb.2010.2604
- JEPSON, P.D., M. ARBELO, R. DEAVILLE *et al.* (2003). Gas-bubble lesions in stranded cetaceans - Was sonar responsible for a spate of whale deaths after an Atlantic military exercise? *Nature* 425: 575-576.
- JOHNSON, M., P.T. MADSEN, N. AGUILAR DE SOTO & P. TYACK (2006). Foraging Blainville's beaked whales (*Mesoplodon densirostris*) produce distinct click types matched to different phases of echolocation. *Journal of Experimental Biology* 209: 5038-5050.
- JOHNSON, M., P.T. MADSEN, W.M.X. ZIMMER, N. AGUILAR DE SOTO & P.L. TYACK (2004). Beaked whales echolocate on prey. *Proceedings of the Royal Society of London B* 271: S383-386.
- JOHNSON, M., N. AGUILAR DE SOTO, E. TERRAY & P.T. MADSEN (2011). Eavesdropping on foraging: using passive echolocation to quantify deep-sea predator and prey interactions. International Biologging Conference. Tasmania. March 2011.
- KRAMER, D.L. (1988). The behavioral ecology of air breathing by aquatic animals. *Canadian Journal of Zoology* 66: 89-94.
- MACLEOD, C.D. (2006). How big is a beaked whale? A review of body length and sexual size dimorphism in the family Ziphiidae. *Journal of Cetacean Research and Management* 7: 301-308.
- MADSEN, P.T., M. JOHNSON, N. AGUILAR DE SOTO, W.M.X. ZIMMER & P.L. TYACK (2005). Biosonar performance of foraging beaked whales (*Mesoplodon densirostris*). *Journal of Experimental Biology* 208: 181-194.
- MADSEN, P.T., M. JOHNSON, P.J.O. MILLER, N. AGUILAR DE SOTO, J. LYNCH & P.L. TYACK (2006). Quantitative measures of air gun pulses recorded on sperm whales (*Physeter macrocephalus*) using acoustic tags during controlled exposure experiments. *Journal of the Acoustical Society of America* 120: 2366-2379.
- MARTÍN, V., A. SERVIDÍO & S. GARCÍA (2004). Mass stranding of beaked whales in the Canary Islands. In: Evans, G.H.P. & L.A. Miller (Eds), *Workshop on Active Sonar and Cetaceans*, pp. 78. Gran Canaria.
- MASSON, D.G., A.B. WATTS, M.J.R. GEE, R. URGELES, N.C. MITCHELL, T.P. LE BAS & M. CANALS (2002). Slope failures on the flanks of the western Canary Islands. *Earth-Science Reviews* 57: 1-35.

- MEAD, J.G. (1989) Beaked whales of the genus *Mesoplodon*. In: Ridgway, S.H. & R. Harrison (Eds), *Handbook of Marine Mammals*. pp. 349-430. Academic Press, London, UK.
- PAYNE, R. & D. WEBB (1971). Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales in: Orientation: Sensory basis. *Annals of the New York Academy of Sciences* 88: 110–142.
- REYES, C., A. SCHIAVI, C.J. PÉREZ-GONZÁLEZ & N. AGUILAR DE SOTO (2011). Social structure and temporal variations in individual associations of Blainville's beaked whales (*Mesoplodon densirostris*) in El Hierro (Canary Islands). 25^a Conferencia de la Sociedad Europea de Cetáceos, ECS. Marzo 2011.
- REYES, C., A. SCHIAVI & N. AGUILAR DE SOTO (2012). Cetabase: a bilingual tool to enhance data sharing and public outreach on endangered species. 26th Conference of the European Cetacean Society. Ireland. March 2012.
- TYACK, P.L., M. JOHNSON, N. AGUILAR DE SOTO, A. STURLESE & P.T.M. Madsen (2006). Extreme diving of beaked whales. *Journal of Experimental Biology* 209: 4238-4253.

4. Reservas marinas, cambio climático y catástrofes naturales: El caso del Mar de Las Calmas en la isla de El Hierro

José Carlos Hernández y Sabrina Clemente

*Departamento de Biología Animal,
Universidad de La Laguna
jocarher@ull.es; mscllemen@ull.es*

Esperamos que no se hayan asustado por el título y hayan continuado leyendo algunas líneas más. Les prometemos que los términos utilizados en el título guardan una relación clara. En la naturaleza todo está relacionado de una forma u otra, aunque haya veces que no sea tan fácil encontrar esta relación. Éste es el principal objetivo de este capítulo, ilustrarles en las relaciones, naturales, ecológicas que ocurren en nuestro entorno marino. En este sentido, las reservas marinas, el cambio climático y las catástrofes naturales son procesos que han ocurrido y siguen ocurriendo en los fondos marinos del Mar de Las Calmas en la isla de El Hierro, y que poco a poco nos han ido instruyendo en el funcionamiento de los ecosistemas litorales de nuestras islas. Por ello, creímos conveniente contar esta historia del reciente evento volcánico en El Hierro, ofreciendo una perspectiva ecológica más amplia que nos ayude a comprender realmente la importancia que ha tenido esta erupción, no solo para la sociedad herreña sino también en el entendimiento de nuestros ecosistemas marinos.

Reservas marinas

Las reservas marinas, en España, son medidas de gestión de los recursos pesqueros, de los hábitats y de los ecosistemas que tienen por objetivo principal recuperar las poblaciones sobrepescadas, y así prolongar

la actividad pesquera artesanal en las zonas adyacentes. En diferentes regiones del mundo estas áreas marinas protegidas aumentan de forma considerable la abundancia y talla de diferentes tipos de especies de interés comercial (Halpern, 2003; Micheli *et al.*, 2004; Guidetti, 2007; Claudet *et al.*, 2008). Por supuesto, ésta es una manera muy simple de definir un instrumento que ha servido para mucho más que eso. Las reservas marinas y sus alrededores son espacios muy rentables económicamente dadas las distintas posibilidades de explotación que generan (Holmlund & Hammer, 1999), y los distintos sectores sociales implicados, desde la construcción de apartamentos hasta el turismo más sostenible, como el buceo. Además, las reservas marinas nos sirven de modelos naturales, puesto que la actividad humana queda limitada o excluida completamente, y esto nos ayuda a conocer cómo funcionan los ecosistemas marinos sin influencia antropogénica directa (Pinnegar *et al.*, 2000). Actualmente y dado el nivel de sobreexplotación al que hemos sometido a los océanos, este papel de las reservas marinas es incluso más importante puesto que apenas quedan lugares prístinos en el planeta como puntos de referencia (Dayton *et al.*, 1998).

Para ejemplificar este concepto de modelo natural vamos a recurrir a un caso muy hipotético, donde un extraterrestre llega a Canarias, pongamos que se llama “Cho-Marcial”. Si Cho-Marcial llegara hoy y buceara en los fondos rocosos de las islas, pensaría que los denominados “blanquiales”, esos fondos desprovistos de macroalgas erectas y de color blanquecino al estar cubiertos por algas costrosas ramoneadas (Hernández *et al.*, 2008a), son los ecosistemas típicos de Canarias. Sin embargo, si nos lleváramos a bucear a Cho-Marcial a la Reserva Marina del Mar de Las Calmas o a cualquiera de las otras dos reservas que tenemos actualmente en Canarias (La Graciosa e islotes al Norte de Lanzarote; La Palma), se encontraría con un ecosistema completamente diferente caracterizado por una cobertura de algas erectas importante y con un número de erizos muy reducido (Hernández *et al.*, 2008b; Sangil *et al.*, 2011). Esta visión completa de los ecosistemas marinos, solamente se puede apreciar cuando se cuenta con zonas protegidas que nos sirven de controles experimentales puesto que en ellas el esfuerzo pesquero es nulo. De esta manera, realizando comparaciones, hemos podido determinar como el esfuerzo pesquero sin control realizado en el resto de las costas de Canarias ha contribuido a la gran extensión de blanquiales que tenemos actualmente en nuestras costas (Clemente *et al.*, 2009, 2011) (Fig. 1).

La pesca tiene un efecto directo sobre las especies pescadas (Jackson *et al.*, 2001; Worm *et al.*, 2006), y por lo tanto, se convierte en una fuerza evolutiva de primer orden puesto que reduce significativamente la talla de las especies, ya que su principal objetivo son los organismos de gran tamaño (Pauly *et al.*, 1998). Por ello, las especies sometidas a explotación

se ven obligadas a aumentar la tasa de crecimiento y disminuir la edad a la cual maduran sexualmente. En términos reproductivos este fenómeno hace que tengamos cada vez peces más pequeños y una menor producción total de huevos. Un ejemplo claro de esto sería el siguiente: una hembra de pez de 61cm pone la misma cantidad de huevos que 212 de 42cm (PDT, 1990; Roberts & Polunin, 1991) (Fig. 2).

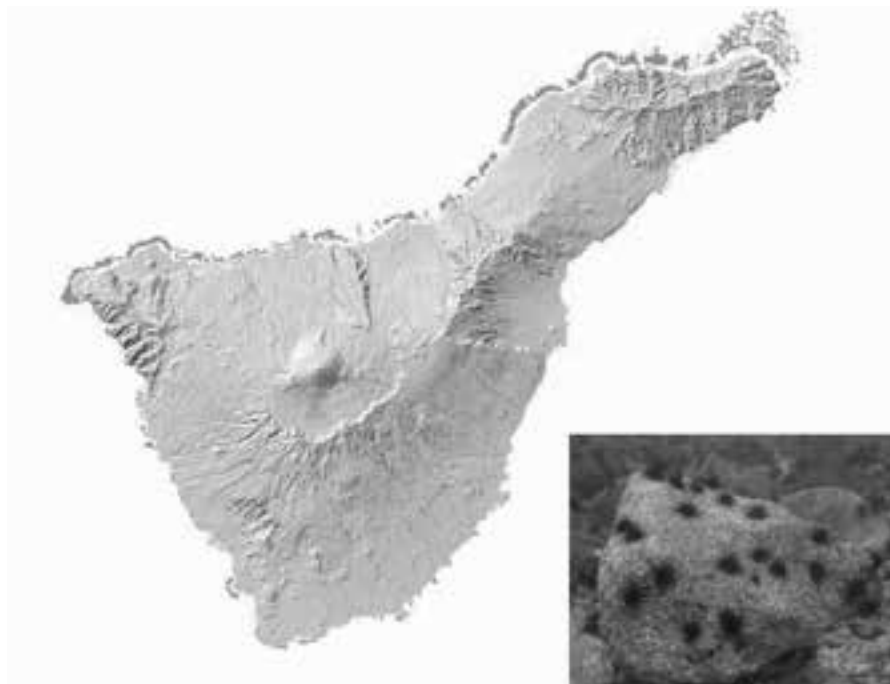


Fig. 1. Mapa bionómico de la isla de Tenerife donde se puede observar la extensión de fondo rocoso hasta 50 metros de profundidad ocupado por blanquizado (64,59%) (Fuente: <http://atlastenerife.es/portaIweb/>). Esta comunidad está dominada por el erizo de Lima *Diadema africanum*.

Otro efecto claro sobre las especies pescadas es la disminución de la diversidad genética (Smith *et al.*, 1991). Este reajuste del grupo de genes hace que las especies sean cada vez más vulnerables a las variaciones estacionales en los ecosistemas, por ejemplo a los aumentos de las temperaturas o a la escasez de nutrientes. Así pues, las especies que han sido sometidas a una explotación pesquera intensiva tienen una menor capacidad para adaptarse a los cambios y una mayor probabilidad de desaparecer localmente o extinguirse.

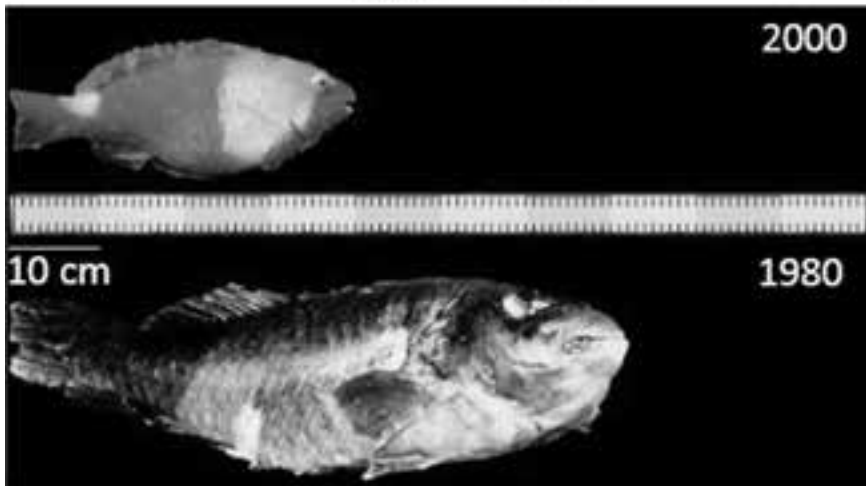


Fig. 2. Figura modificada de PDT (1990) donde se puede observar, en la parte superior, la importancia del tamaño de la hembra de pez en la producción de huevos (1x61cm = 212x42cm). En la parte inferior hemos representado el tamaño de una vieja (*Sparisoma cretense*) capturada en Los Gigantes (Tenerife) durante los años 80 y otra capturada en los años 2000.

Entre los daños colaterales ocasionados por las pesquerías, están aquellos que van más allá de la especie objetivo, como son los producidos por las artes en los hábitats, que llega a ser muy dañino en la pesca de arrastre, o los daños que alcanzan a otras especies que no son el objetivo de

la pesca, lo que denominamos “bycatches” o capturas accidentales (Crowder & Murawski, 1998).

En general, la pesca afecta directa e indirectamente a la diversidad de peces que podemos encontrar en los ecosistemas marinos, por lo que en zonas pescadas la riqueza está limitada. Uno de los primeros síntomas de sobrepesca es la desaparición de los grandes peces depredadores o la disminución de su tamaño (Pauly *et al.*, 1998; Jackson *et al.*, 2001). Estos grandes depredadores son los más susceptibles a la pesca, ya que suelen ser el objetivo principal de muchas pesquerías y se caracterizan por presentar un crecimiento lento y una edad de madurez tardía (Myers & Worm, 2003).

La protección que ofrecen las reservas marinas constituye entonces una salvaguarda de los hábitats, de la diversidad de peces y también de la potencialidad reproductiva de los mismos, por lo que se han convertido en una herramienta muy eficaz, reservorio de grandes reproductores, de diversidad genética y donde nos encontramos ecosistemas bien estructurados, parecidos a los prístinos. Además, existe una exportación de biomasa en forma de larvas y peces adultos desde las zonas protegidas de las reservas a las zonas adyacentes, donde se mejora considerablemente la pesca (Murawski *et al.*, 2005; Pérez-Ruzafa *et al.*, 2008) (Fig. 3).

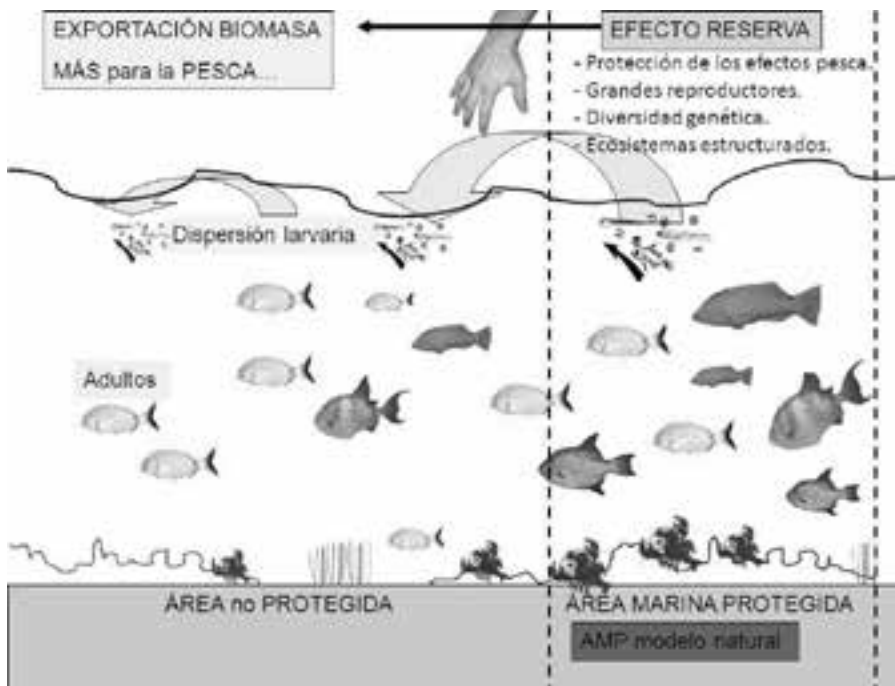


Fig. 3. Representación de los efectos biológicos de una reserva marina, donde se puede observar el efecto reserva en el tamaño y abundancia de los organismos, así como la exportación de biomasa larvaria y de adultos hacia la zona no protegida.

Por todo ello, las reservas marinas son un modelo natural inigualable e irremplazable que toda zona litoral explotada necesita.

En términos pesqueros la Reserva Marina del Mar de Las Calmas (Fig. 4) nos ha enseñado que ha sido una solución sin precedentes para aumentar las descargas de peces. Algunos ejemplos muy llamativos son las lapas (*Patella* spp) y las viejas (*Sparisoma cretense*) que han aumentado el doble



Fig. 4. Mapa de la isla de El Hierro donde se puede observar la localización de la Reserva Marina de La Restinga - Mar de Las Calmas y la sectorización de la misma (1. Zona de usos tradicionales; 2. Zona de usos restringidos -prohibición de la pesca recreativa; 3. Zona de reserva integral -prohibición total de la pesca). El triángulo representa la localización del volcán submarino.

desde que se ha protegido el área marina (Figs 5 y 6). Esta mejora no ha sido solo pesquera sino también ecológica, y es en estas zonas donde podemos ver una gran cantidad de grandes peces depredadores que han sido capaces de mantener a raya al erizo de Lima (*Diadema africanum*), voraz consumidor de macroalgas (Clemente *et al.*, 2010). En términos sociales, la reserva marina ha sido un impulso económico para las gentes de La Restinga en particular y para todo El Hierro en general. Los últimos estudios

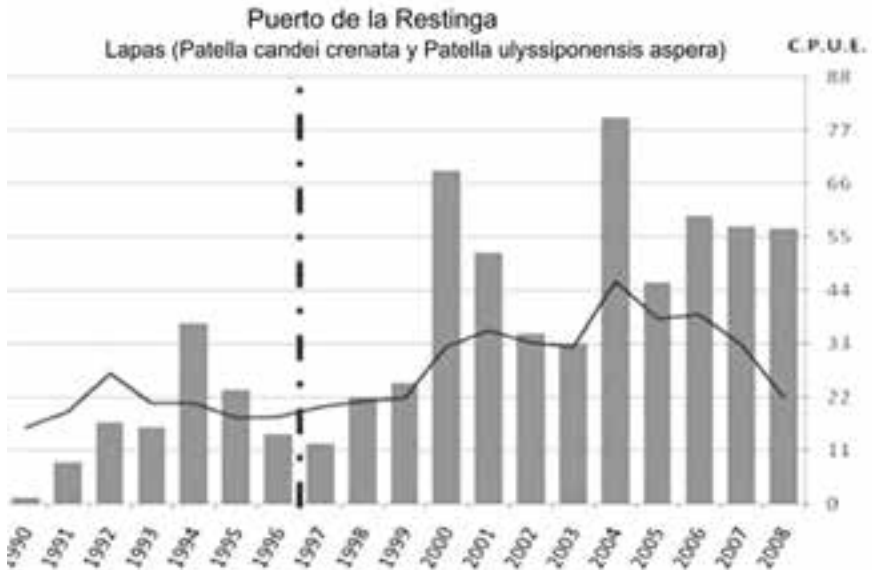


Fig. 5. Descargas en kilogramos de lapas en La Restinga antes y después de la creación de la Reserva Marina de interés pesquero de La Restinga – Mar de Las Calmas. La línea discontinua marca el año de puesta en marcha de la reserva (datos cedidos por el biólogo Carmelo Dorta).

realizados por De la Cruz Modino & Santana (2012), han demostrado como antes de la erupción submarina de los 5000 turistas que llegaban anualmente a El Hierro, 2700 eran buceadores que acudían a observar la riqueza

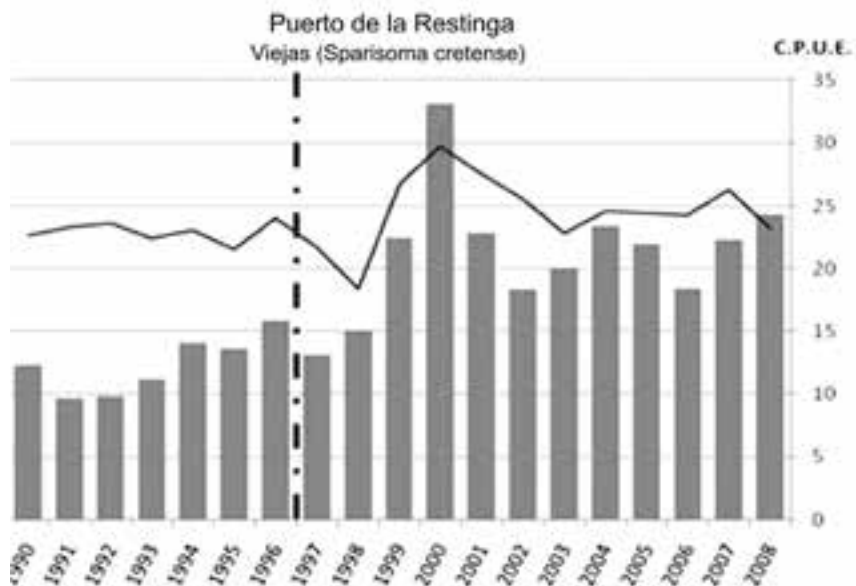


Fig. 6. Descargas en kilogramos de viejas en La Restinga antes y después de la creación de la Reserva Marina de interés pesquero de La Restinga – Mar de Las Calmas. La línea discontinua marca el año de puesta en marcha de la reserva (datos cedidos por el biólogo Carmelo Dorta).

y abundancia de peces de la Reserva Marina. Estos datos, correspondientes al año 2006, ya indicaban que esta actividad estaba generando unos 900.000 euros mientras que la pesca artesanal dejaba en la isla unos 700.000 euros.

Así pues el buceo se plantea como una actividad, alternativa a la pesca y sostenible, que puede favorecer la dinamización y diversificación económica de las zonas costeras de Canarias. Sin embargo, reducir todo a términos económicos es demasiado simplista, y nunca conviene perder de vista la importancia ecológica de la protección de la naturaleza y su uso sostenible para el bienestar humano sobre el planeta. Por lo que conservar es muy rentable en todos los aspectos ecológico, pesquero y social (Armsworth *et al.*, 2007), pero además se plantea como una alternativa fuerte al modelo turístico de “sol y playa” que se ha venido desarrollando en otras Islas.

Cambio climático

En los últimos 50 años, los humanos hemos impactado los ecosistemas marinos de una forma inimaginable. Entre los impactos más evidentes podemos enumerar hoy en día la sobreexplotación de especies, la alteración física de los ecosistemas, la contaminación (química y radioactiva), la introducción de especies exóticas y el cambio climático global, que principalmente se traduce en un incremento de la temperatura del agua, en la acidificación y el aumento del nivel del mar (Bianchi, 1997; Jackson *et al.*, 2001; Caldeira & Wicket, 2003; Islam & Tanaka, 2004; Micheli *et al.*, 2005; Orr *et al.*, 2005; Harley *et al.*, 2006; Worm *et al.*, 2006; Doney *et al.*, 2009). Esta compleja situación ha sido destacada últimamente en varios trabajos globales entre los que destacaría el de Halpern y colaboradores (2008), donde se presenta un mapa global de impactos sobre los ecosistemas marinos y se destaca que la mayoría de los océanos presentan el grado medio-alto.

En el mismo sentido, pero esta vez más centrados en la explotación de las poblaciones marinas, Swartz y colaboradores (2010) nos muestran como en tan solo 50 años (1950-2000) hemos extendido la explotación pesquera a todo el planeta, excepto en los polos, reduciendo de forma drástica los stocks pesqueros (Pauly *et al.*, 1998; Myers & Worm, 2003; Swartz *et al.*, 2010). Por si fuera poco, las predicciones de cambio climático proporcionadas por el panel intergubernamental para el estudio del cambio climático (IPCC, 2007) no son nada halagüeñas y se predice un aumento de la temperatura de 0,5-1°C para el año 2029 y unos 3-3,5°C para el 2099.

Y los lectores se preguntarán, ¿pero, en qué nos afectan estos cambios? Los impactos en los ecosistemas marinos tienen unas consecuencias claras, como es la disminución o alteración de la biodiversidad y con ello una disminución de los servicios de los océanos (Worm *et al.*, 2006). Entre estos servicios podemos destacar, por ejemplo, las pesquerías, las zonas de cría, la función de filtrado y purificación de las aguas, entre otros (Holmlund & Hammer, 1999; De Groot *et al.*, 2002). Así, el colapso de la biodiversidad marina previsto por Worm y colaboradores (2006) generará

además una serie de riesgos como el cierre de zonas de baño por floramientos de algas tóxicas o elevados niveles de eutrofización, mortalidades masivas de peces por el aumento de las zonas anóxicas (desprovistas de oxígeno), inundaciones de zonas costeras, invasión de especies exóticas, y la moratoria sobre recursos pesqueros. De manera que si no protegemos nuestros océanos y seguimos en la actual actitud pasiva y egoísta, estas serán las consecuencias, algunas de las cuales ya estamos empezando a observar en nuestros océanos (Bianchi, 1997; Díaz, 2001; Caldeira & Wicket, 2003; Islam & Tanaka, 2004; Orr *et al.*, 2005; Harley *et al.*, 2006; Lafferty, 2009).

Sin irnos más lejos, en Canarias, hemos visto como en los últimos 20-25 años los bosques de algas han reducido considerablemente su extensión y actualmente el 64,28% de los fondos rocosos de Tenerife (Fig 1), por ejemplo, están dominados por el erizo de Lima (Hernández *et al.*, 2008a). Este fenómeno ecológico tiene una importancia clave para nosotros los isleños puesto que son los bosques de algas los que generan riqueza y nos sirven para producir recursos pesqueros, como la vieja (Clemente *et al.*, 2010), pero también colaboran en la absorción del exceso de CO₂ que estamos, día a día, difundiendo en la atmósfera por el uso de combustibles fósiles (Bensoussan & Gatuso, 2007). Así pues, este desequilibrio en el que los erizos toman el control de los ecosistemas marinos tiene unas consecuencias perjudiciales para la estructura y funcionamiento de los mismos así como para los servicios que nos proveen.

El análisis de los registros de temperatura del mar nos muestra que en los últimos 20-25 años ha habido un calentamiento significativo del agua de mar, lo que ha favorecido a la expansión de los erizos y, probablemente, a la reducción de los bosques de algas, procesos éstos de difícil disociación (Hernández *et al.*, 2010) (Fig. 7). Si bien, y a pesar del aumento de las temperaturas que parece favorecer a los erizos, en zonas de reservas marinas donde abundan los depredadores clave del erizo se ha logrado frenar o mitigar la expansión de este herbívoro clave (Clemente *et al.*, 2009, 2011). Por lo que, éste es otro beneficio de la protección a tener en cuenta, ya que mediante la creación de reservas marinas y la protección de grandes depredadores estamos mitigando los efectos predecibles del cambio climático en Canarias (Fig. 8).

Catástrofes naturales

Por último, y arribando al objetivo principal del presente libro, quiero describirles brevemente cuales han sido los efectos ecológicos submarinos de la reciente erupción en la isla de El Hierro. Tras varios meses de preactividad volcánica, con más de diez mil terremotos y deformación significativa del terreno, el 12 de octubre de 2011 comienza la fase eruptiva submarina. El principal cono volcánico se localiza a 1,8 km de la costa sur

de la isla y se eleva desde 300 m de profundidad a sólo 88 m debajo de la superficie del mar (Fraile-Nuez *et al.*, 2012) (Fig. 9).

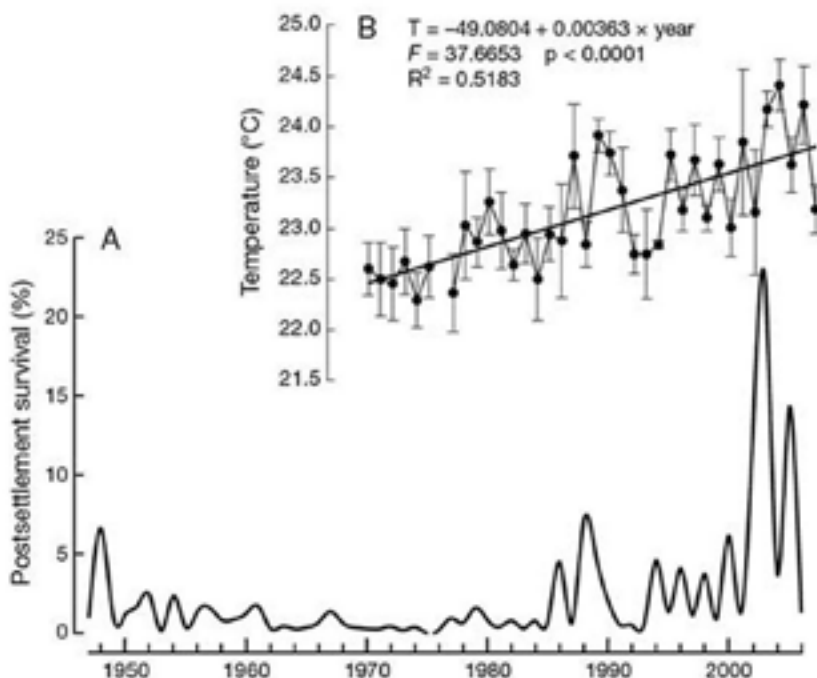


Fig. 7. Figura modificada de Hernández *et al.* (2010) donde se puede observar los picos de supervivencia postlarvaria del erizo *Diadema africanum* desde los años 40 hasta la actualidad en correlación con el aumento significativo de la temperatura veraniega del mar desde 1970

A los ocho días del inicio de la fase eruptiva detectamos la primera mortalidad masiva de peces de profundidad, relacionada con el fenómeno eruptivo inicial. Acompañando a ésta primera fase submarina profunda hubo una gran emisión de gases CO_2 , H_2S (sulfuro de hidrógeno/ácido sulfídrico), SO_3^{2-} (sulfitos), $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ (tetraionato de azufre) y metales como Cu, Cd, Pb y Al (Santana-Casiano *et al.*, 2013). Estas emisiones sulfurosas generaron una masa de agua de color verdoso del 23 al 31 de octubre que por efecto de las corrientes y mareas se retuvo en la zona del Mar de Las Calmas produciendo una segunda mortalidad masiva de peces, esta vez todos litorales, que llegaron a acumularse masivamente en la costa. Del 1 al 18 de noviembre la mancha vuelve a tocar tierra y hay un tercer episodio de mortalidad de peces de menor intensidad, puesto que casi la totalidad de la biomasa de peces del Mar de Las Calmas había muerto en la primera oleada

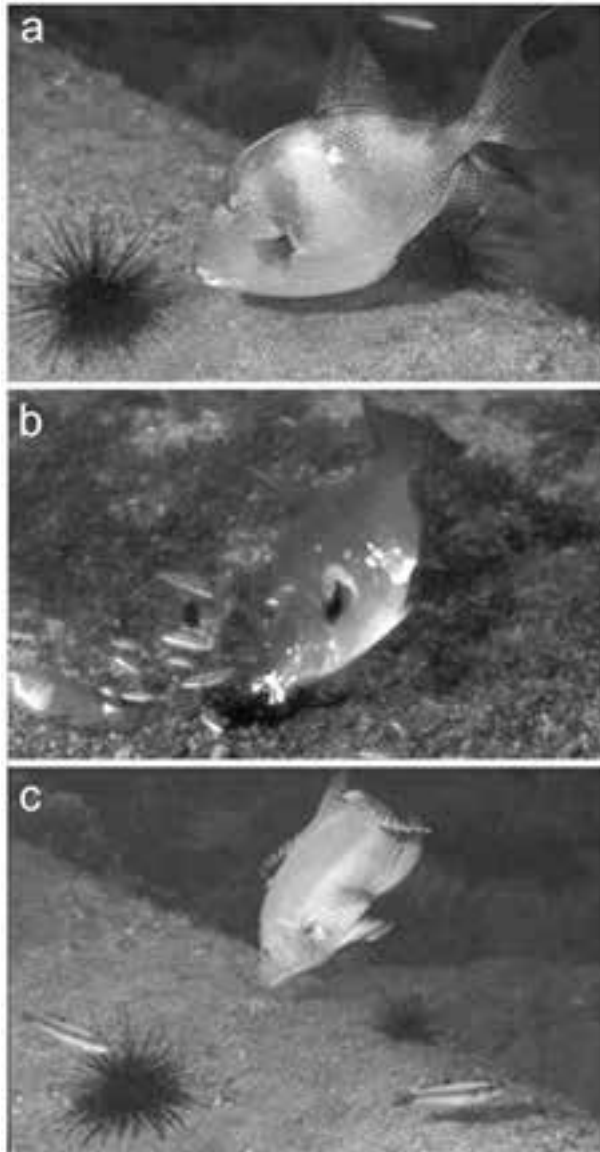


Fig. 8. Depredadores especializados en el erizo de Lima (*Diadema africanum*): a. Gallo cochino (*Balistes capriscus*). b. Gallo oceánico o aplomado (*Canthidermis sufflamen*) y c. Pejeperro (*Bodianus scrofa*).

de agua sulfurosa (Fig. 10). Por lo tanto, el área de influencia de la erupción en el litoral de la isla varió en el tiempo durante el proceso eruptivo debido principalmente a la deriva de estos parches de aguas anómalas siguiendo las corrientes y vientos dominantes. De esta forma, las comunidades litorales se

vieron expuestas a pulsos de condiciones físico-químicas extremas del agua de mar durante los cinco meses que duró el proceso eruptivo, poniendo en peligro la actividad normal y la composición de las comunidades marinas.

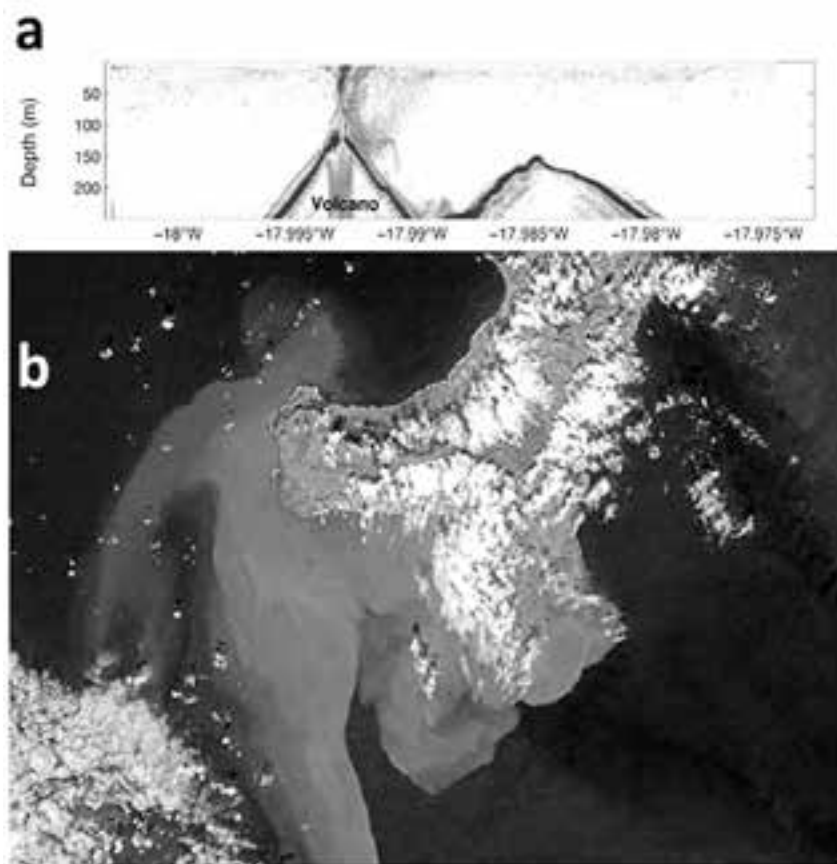


Fig. 9. (a) Ecograma del volcán submarino del Mar de Las Calmas (Modificado de Fraile-Nuez *et al.*, 2012). (b) Fotografía de satélite donde se puede observar la extensión de la masa de agua sulfurosa que afectó a la cara oeste de El Hierro durante el mes de octubre de 2010, después de la erupción submarina (Fuente: <http://www.rapideye.com/>).

Para nuestro equipo, que lleva trabajando más de 20 años en la zona, las primeras inmersiones realizadas justo después de que se permitiera el acceso a la zona afectada, fueron dramáticas y mostraron un cambio radical de la flora y fauna marina (Fig. 11). De los cambios más llamativos, destaco la capa de sedimento verdoso que cubría el fondo, la gran cobertura de algas oportunistas (ver Sangil, 2013) y la gran abundancia de moluscos del género *Aplysia*.



Fig. 10. Peces muertos durante la erupción submarina del volcán submarino del Mar de Las Calmas en octubre de 2011.

Otro hecho muy llamativo fue la gran cantidad de juveniles del erizo de Lima que llegaban a densidades de ocho individuos por metro cuadrado (Fig. 12), densidades nunca antes registradas para la zona (Hernández *et al.*, 2008a). Por lo tanto, nos encontramos con cambios relevantes en las comunidades marinas, tal y como se ha visto en procesos similares en otras partes del mundo (Hall-Spencer *et al.*, 2012), que constituían los primeros estadios en la trayectoria sucesional de cambio tras la perturbación volcánica.

El caso de los erizos fue bastante llamativo puesto que, como hemos comentado anteriormente se trata de una especie clave, capaz de modificar drásticamente la estructura de las comunidades algales por lo que su presencia en altas densidades causó alarma. La presencia de este erizo en las aguas del Mar de Las Calmas es conocida (Hernández *et al.*, 2008a), aunque su abundancia siempre fue baja, por debajo de un individuo por metro cuadrado. La elevada cantidad de juveniles encontrada justo después de la erupción sólo se explica debido a la completa desaparición de los depredadores naturales del erizo por efecto de la erupción submarina, lo que

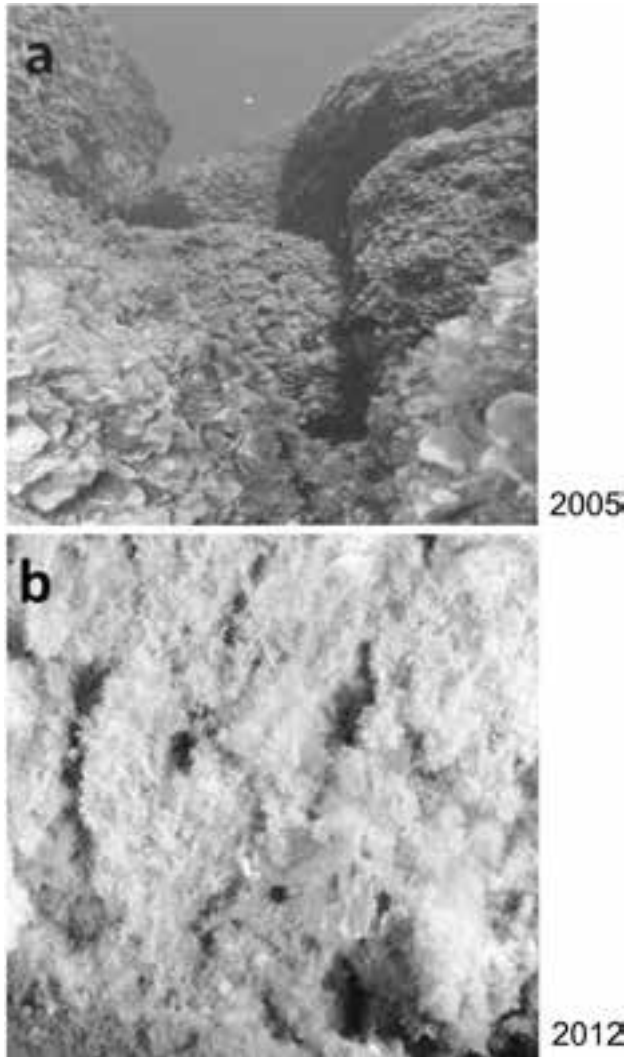


Fig. 11. Comunidad bentónica antes (2005) y después (2012) de la erupción submarina del volcán en el Mar de Las Calmas.

concuera con estudios previos que demuestran que perturbaciones puntuales pueden alterar profundamente la dinámica de las poblaciones de erizos y la intensidad de los procesos que las regulan como el reclutamiento y la depredación (Hereu *et al.*, 2012). Así, de una forma catastrófica se ha vuelto a demostrar el papel ecológico tan importante de la protección y la importancia de preservar el nivel trófico de los depredadores para conseguir el correcto equilibrio ecológico y funcionamiento de nuestros ecosistemas litorales.



Fig. 12. Reclutamiento masivo del erizo de Lima (*Diadema africanum*) en el Mar Las Calmas tras la erupción submarina.

Esta erupción ha servido para darnos cuenta del papel que juega la Reserva Marina del Mar de Las Calmas en La Restinga y en El Hierro, y de la importancia de conservar para generar riqueza ecológica y económica. Es necesario promover una red de reservas marinas que asegure la protección de una mayor y más variada zona de la costa, con mayor capacidad de adaptación a las perturbaciones, puesto que estos u otros fenómenos catastróficos pueden ocurrir y perjudicarnos directa o indirectamente a todos los canarios. Si bien la estructura de las comunidades marinas está influenciada por numerosas perturbaciones físicas y biológicas (Sousa, 2001; Paine & Levin, 1981), perturbaciones catastróficas de gran magnitud, como pueden ser los procesos volcánicos submarinos o deslizamientos de tierras, son poco frecuentes (Sousa, 2001). Por lo tanto, a nivel ecológico el caso de la erupción submarina de El Hierro ha constituido una oportunidad única para valorar las respuestas del ecosistema marino a la severa reducción de la mayor parte de los taxones.

Finalmente, a modo de conclusión, podemos afirmar que la multitud de estudios realizados en los fondos marinos de El Hierro nos han dado la oportunidad de vislumbrar lo que podría ser Canarias si apostáramos decididamente por un uso sostenible de nuestros ecosistemas marinos.

Bibliografía

- ARMSWORTH, P.R., K.M.A. CHAN, G.C. DAILY, P.R. EHRLICH, C. KREMEN, T.H. RICKETTS & M.A. SANJAYAN (2007). Ecosystem-service science and the way forward for conservation. *Conservation Biology* 21: 1383-1384.
- BENSOUSSAN, N. & J.P. GATTUSO (2007). Community primary production and calcification in a NW Mediterranean ecosystem dominated by calcareous macroalgae. *Marine Ecology Progress Series* 334: 37-45.
- BIANCHI, C.N. (1997). Climate change and biological response in the marine benthos. *Proceedings of the Italian Association of Limnology and Oceanography* 12: 3-20.
- CALDEIRA, K. & M. WICKET (2003). Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* 425: 365.
- CLAUDET, J., C.W. OSENBURG, L. BENEDETTI-CECCHI, P. DOMENICI, J.A. GARCÍA-CHARTON, Á. PÉREZ-RUZAFÁ, F. BADALAMENTI, J. BAYLE-SEMPERE, A. BRITO, F. BULLERI, J.-M. CULIOLI, M. DIMECH, J.M. FALCÓN, I. GUALA, M. MILAZZO, J. SÁNCHEZ-MECA, P.J. SOMERFIELD, B. STOBART, F. VANDEPERRE, C. VALLE & S. PLANES (2008). Marine reserves: size and age do matter. *Ecology Letters* 11: 481-489.
- CLEMENTE, S., J.C. HERNÁNDEZ & A. BRITO (2009). Evidence of the top-down role of predators in structuring sublittoral rockyreef communities in a Marine Protected Area and nearby areas of the Canary Islands. *ICES Journal of Marine Science* 66: 64-71.
- CLEMENTE, S., J.C. HERNÁNDEZ, A. RODRÍGUEZ & A. BRITO (2010). Identifying keystone predators and the importance of preserving functional diversity in sublittoral rocky-bottom areas. *Marine Ecology Progress Series* 413: 55-67.
- CLEMENTE S., J.C. HERNÁNDEZ & A. BRITO (2011). Context-dependent effects of marine protected areas on predatory interactions. *Marine Ecology Progress Series* 437: 119-133.
- CROWDER, L.B. & S.A. MURAWSKIB (1998). Fisheries Bycatch: Implications for Management. *Fisheries* 23: 8-17.
- DAYTON, P.K., M.J. TEGNER, P.B. EDWARDS & K.L. RISER (1998). Sliding baselines, ghosts, and reduced expectations in kelp forest communities. *Ecological Applications* 8: 309-322.
- DE GROOT, R.S., M.A. WILSON & R.M.J. BOUMANS (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41: 393-408.
- DE LA CRUZ MODINO, R. & A. SANTANA (2012). El turismo de buceo en La Restinga (Islas Canarias) y l'Estartit (Cataluña): APMs, clasificaciones e impactos. In: Beltrán, O., J.J. Pascual & I. Vaccaro (eds.), *Patrimonialización de la naturaleza. El marco social de las políticas ambientales*. pp. 223-244 Ankulegi Antropología Elkartea. Actas del Congreso de Antropología, San Sebastián, 2008.
- DÍAZ, R.J. (2001). Overview of Hypoxia around the World. *Journal of Environmental Quality* 30: 275-281.

- DONEY, S., V. FABRY, R. FEELY & J. KLEYPAS (2009). Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science* 1: 169-192.
- FRAILE-NUEZ, E., M. GONZÁLEZ-DÁVILA, J.M. SANTANA-CASIANO, J. ARÍSTEGUI, I.J. ALONSO-GONZÁLEZ, S. HERNÁNDEZ-LEÓN, M.J. BLANCO, A. RODRÍGUEZ-SANTANA, A. HERNÁNDEZ-GUERRA, M.D. GELADO-CABALLERO, F. EUGENIO, J. MARCELLO, D. DE ARMAS, J.F. DOMÍNGUEZ-YANES, M.F. MONTERO, D.R. LAETSCH, P. VÉLEZ-BELCHÍ, A. RAMOS, A.V. ARIZA, I. COMAS-RODRÍGUEZ & V.M. BENÍTEZ-BARRIOS (2012). The submarine volcano eruption at the island of El Hierro: physical-chemical perturbation and biological response. *Scientific Reports* 2: 486. DOI: 10.1038/srep00486.
- GUIDETTI, P. (2007). Predator diversity and density affect levels of predation upon strongly interactive species in temperate rocky reefs. *Oecologia* 154: 513-520.
- HALL-SPENCER, J.M., R. RODOLFO-METALPA, S. MARTIN, E. RANSOME, M. FINE, S.M. TURNER, S.J. ROWLEY, D. TEDESCO & M.-C. BUIA (2008). Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature* 454: 96-99.
- HALPERN, B.S. (2003) The impact of marine reserves: Do reserves work and does size matter? *Ecological Applications* 13:117-137
- HALPERN, B.S., S. WALBRIDGE, K.A. SELKOE, C.V. KAPPEL, F. MICHELI, C. D'AGROSA, J.F. BRUNO, K.S. CASEY, C. EBERT, H.E. FOX, R. FUJITA, D. HEINEMANN, H.S. LENIHAN, E.M.P. MADIN, M.T. PERRY, E.R. SELIG, M. SPALDING, R. STENECK, R. WATSON (2008). A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems. *Science* 319: 948-952.
- HARLEY, C.D.G., A.R. HUGHES, K.M. HULTGREN, B.G. MINER, C.J.B. SORTE, C.S. THORNER, L.F. RODRIGUEZ, L. TOMANEK & S.L. WILLIAMS (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters* 9: 228-241.
- HEREU, B., C. LINARES, E. SALA, J. GARRABOU, A. GARCIA-RUBIES, D. DIAZ & M. ZABALA (2012). Multiple Processes Regulate Long-Term Population Dynamics of Sea Urchins on Mediterranean Rocky Reefs. *PLoS ONE* 7(5): e36901. doi:10.1371/journal.pone.0036901.
- HERNÁNDEZ, J.C., S. CLEMENTE, C. SANGIL & A. BRITO (2008a). The key role of the sea urchin *Diadema* aff. *antillarum* in controlling macroalgae assemblages throughout the Canary Islands (eastern subtropical Atlantic): a spatio-temporal approach. *Marine Environmental Research* 66: 259-270.
- HERNÁNDEZ, J.C., S. CLEMENTE, C. SANGIL & A. BRITO (2008b). Actual status of the sea urchin *Diadema* aff. *antillarum* populations and macroalgal cover in marine protected areas compared to a highly fished area (Canary Islands–Eastern Atlantic Ocean). *Aquatic Conservation* 18:1091-1108.
- HERNÁNDEZ, J.C., S. CLEMENTE, D. GIRARD, Á. PÉREZ-RUZAFÁ & A. BRITO (2010). Effect of temperature on settlement and postsettlement survival in a barrens-forming sea urchin. *Marine Ecology Progress Series* 413: 69-80.
- HOLMLUND, C.M. & M. HAMMER (1999). Ecosystem services generated by fish populations. *Ecological Economics* 29: 253-268.
- IPCC (2007). *The fourth assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge.

- ISLAM, M.S. & M. TANAKA (2004). Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries and approach for management: a review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin* 48: 624-649.
- JACKSON, J.B.C., M.X. KIRBY, W.H. BERGER, K.A. BJORN DAL, L.W. BOTSFORD, B.J. BOURQUE, R.H. BRADBURY, R. COOKE, J. ERLANDSON, J.A. ESTES, T.P. HUGHES, S. KIDWELL, C.B. LANGE, H.S. LENIHAN, J.M. PANDOLFI, C.H. PETERSON, R.S. STENECK, M.J. TEGNER & R.R. WARNER (2001). Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science* 293: 629-638.
- LAFFERTY, K.D. (2009). The ecology of climate change and infectious diseases. *Ecology* 90: 888-900.
- MICHELI, F., B.S. HALPERN, L.W. BOTSFORD & R.R. WARNER (2004). Trajectories and correlates of community change in no-take marine reserves. *Ecological Applications* 14: 1709-1723.
- MICHELI, F., L. BENEDETTI-CECCHI, S. GAMBACCINI, I. BERTOCCI, C. BORSINI, G. CHATO OSIO & F. ROMANO (2005). Cascading human impacts, marine protected areas, and the structure of Mediterranean reef assemblages. *Ecological Monographs* 75: 81-102.
- MURAWSKI, S.A., S.E. WIGLEY, M.J. FOGARTY, P.J. RAGO & D.G. MOUNTAIN (2005). Effort distribution and catch patterns adjacent to temperate MPAs. *ICES Journal of Marine Science* 62: 1150-1167.
- MYERS, R.A. & B. WORM (2003). Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature* 423: 280-283.
- ORR, J., V. FABRY, O. AUMONT, L. BOPP, S. DONEY, R. FEELY, A. GNANADESIKAN, N. GRUBER, A. ISHIDA, F. JOOS, R.M. KEY, K. LINDSAY, E. MAIER-REIMER, R. MATEAR, P. MONFRAY, A. MOUCHET, R.G. NAJJAR, G.-K. PLATTNER, K.B. RODGERS, C.L. SABINE, J.L. SARMIENTO, R. SCHLITZER, R.D. SLATER, I.J. TOTTERDELL, M.-F. WEIRIG, Y. YAMANAKA & A. YOOL (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437: 681-686.
- PAINE, R.T. & S.A. LEVIN (1981). Intertidal Landscapes: Disturbance and the Dynamics of Pattern. *Ecological Monographs* 51:145-178.
- PAULY, D., V. CHRISTENSEN, J. DALSGAARD, R. FROESE & F. TORRES (1998). Fishing down marine food webs. *Science*, 279: 860-863.
- PÉREZ-RUZAFÁ, Á., E. MARTÍN, C. MARCOS, J.M. ZAMARRO, B. STOBART, M. HARMELIN-VIVIEN, S. POLTIA, S. PLANES, J.A. GARCÍA-CHARTON & M. GONZÁLEZ-WANGÜEMERT (2008). Modelling spatial and temporal scales for spill-over and biomass exportation from MPAs and their potential for fisheries enhancement. *Journal for Nature Conservation* 16: 234-255.
- PINNEGAR, J.K., N.V.C. POLUNIN, P. FRANCOUR, F. BADALAMENTI, R. CHEMELLO, M.-L. HARMELIN-VIVIEN, B. HEREU, M. MILAZZO, M. ZABALA, G. D'ANNA & C. PIPITONE (2000). Trophic cascades in benthic marine ecosystems: lessons for fisheries and protected-area management. *Environmental Conservation* 27: 179-200.
- PLAN DEVELOPMENT TEAM (1990). *The potential of marine fishery reserves for reef fish management in the U.S. southern Atlantic. Snapper-Grouper Plan*

- Development Team Report for the South Atlantic Fisheries Management Council*. NOAA Tech. Memo. NMFS-SEFC-261. National Oceanographic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service, Southeast Fisheries Center, Miami, Florida. 45 pp.
- ROBERTS, C.M. & N.V.C. POLUNIN (1991). Are marine reserves effective in management of reef fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 1: 65-91.
- SANGIL, C. (2013). Cambios en la biodiversidad vegetal submarina del Mar de Las Calmas tras la erupción volcánica de La Restinga: una oportunidad para profundizar en el conocimiento de los ecosistemas marinos de Canarias. En: Afonso-Carrillo, J. (ed.), *El Hierro: el nacimiento de un volcán*. Actas VIII Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de La Cruz, pp. 55-82.
- SANGIL, C., M. SANSÓN & J. AFONSO-CARRILLO (2011). Spatial variation patterns of subtidal seaweed assemblages along a subtropical oceanic archipelago: Thermal gradient vs herbivore pressure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 94: 322-333.
- SANTANA-CASIANO, J.M., M. GONZÁLEZ-DÁVILA, E. FRAILE-NUEZ, D. DE ARMAS, A.G. GONZÁLEZ, J.F. DOMÍNGUEZ-YANES & J. ESCÁNEZ (2013). The natural ocean acidification and fertilization event caused by the submarine eruption of El Hierro. *Scientific Reports* 3: 1140. doi:10.1038/srep01140.
- SMITH, P.J., R.I.C.C. FRANCIS & M. MCVEAGH (1991). Loss of genetic diversity due to fishing pressure. *Fisheries Research* 10: 309-316.
- SOUSA, W.P. (2001). Natural disturbance and the dynamics of marine benthic communities. In: Bertness, M.D. *et al.* (eds), *Marine Community Ecology*. pp. 85-130. Sinauer Associates: Sunderland.
- SWARTZ, W., E. SALA, S. TRACEY, R. WATSON & D. PAULY (2010). The Spatial Expansion and Ecological Footprint of Fisheries (1950 to Present). *PLoS ONE* 5(12): e15143. doi:10.1371/journal.pone.0015143.
- WORM, B., E.B. BARBIER, N. BEAUMONT, J.E. DUFFY, C. FOLKE, B.S. HALPERN, J.B.C. JACKSON, H.K. LOTZE, F. MICHELI, S.R. PALUMBI, E. SALA, K.A. SELKOE, J.J. STACHOWICZ, R. WATSON (2006). Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science* 314: 787-790.

5. La erupción volcánica de El Hierro: la importancia de vigilar los volcanes

Pedro A. Hernández

*Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN),
Antiguo Hotel Taoro, Parque Taoro 22, 38400 Puerto de la Cruz,
Tenerife, islas Canarias*

Desde 1997 el grupo volcanológico del ITER, ahora formando parte del Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN), ha estado apostando por un enfoque multidisciplinar para la vigilancia volcánica de Canarias, que debe implicar el uso conjunto de técnicas geofísicas, geoquímicas y geodésicas. Desde el punto de vista científico, la reciente crisis sismo-volcánica de El Hierro ha supuesto una gran oportunidad para avanzar en el conocimiento sobre procesos de reactivación magmática y eruptivos en islas volcánicas oceánicas. También ha permitido demostrar, una vez más, la importancia de los gases volcánicos como herramienta para vigilar los volcanes, fuerza motriz de las erupciones volcánicas. Aunque todavía algunos volcanólogos postulan que prestar atención a los gases en la vigilancia volcánica de islas oceánicas como Canarias carece de importancia, los datos del INVOLCAN indican todo lo contrario.

A raíz del comienzo de la actividad sísmica anómala en julio de 2011, el INVOLCAN mejoró el programa de vigilancia volcánica en la isla de El Hierro incrementando en número de estaciones geoquímicas y geodésicas así como materializando un programa geoquímico de vigilancia volcánica en modo discreto mediante campañas de medida de gases en el ambiente superficial de la isla, muestreo y análisis de aguas en pozos y galerías, y seguimiento termográfico de la superficie del mar sobre el foco eruptivo al sur de La Restinga. Una de los objetivos prioritarios de este programa de vigilancia volcánica ha sido el seguimiento de la evolución temporal de la tasa de emisión de dióxido de carbono por el

edificio insular de la isla de El Hierro así como el seguimiento en modo continuo de la emisión difusa de dióxido de carbono y el gas radón. Así mismo se ha prestado interés especial a la medida y seguimiento de la emisión difusa del gas helio por la isla.

Los resultados obtenidos del programa geoquímico que el INVOLCAN ha materializado en El Hierro durante la reciente crisis volcánica (Julio 2011-Abril 2012) han mostrado la gran utilidad de los gases volcánicos en vigilancia volcánica. Tanto en el modo continuo como en el modo discreto, se han observado claras señales precursoras de cambios y pulsos en la energía del sistema volcánico y su relación con la dinámica eruptiva. Estos resultados han sido publicados recientemente en revistas científicas internacionales de prestigio validando el trabajo realizado por el INVOLCAN.

Introducción

Canarias es la única región del territorio español donde existe volcanismo activo, habiéndose registrado diecinueve erupciones volcánicas durante los últimos quinientos años (Romero, 1991a y 2000). La actividad volcánica histórica de Canarias se ha caracterizado principalmente por erupciones de tipo efusivo y por la formación de coladas de lavas y conos de cinder como consecuencia de la acumulación de piroclastos de caída. Los efectos ocasionados por algunas de las erupciones históricas de Canarias han llegado a repercutir intensamente en el desarrollo económico regional del área afectada y, por ende, sobre la comunidad insular. La última erupción volcánica en Canarias ha tenido lugar en la isla de El Hierro entre octubre de 2011 y marzo de 2012, con la erupción submarina ocurrida a 2 km al sur de la costa de La Restinga. Esta erupción volcánica ha sido la primera en la historia reciente de Canarias en ser monitorizada instrumentalmente y científicamente.

Desde 1997 el grupo volcanológico del ITER (Instituto Tecnológico de Energías Renovables), ahora formando parte del Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN), ha estado apostando por la materialización de un enfoque multidisciplinar para la vigilancia volcánica de Canarias, que debe implicar el uso conjunto de técnicas geofísicas, geoquímicas y geodésicas. Esta apuesta es una de las acciones que recomienda la comunidad científica y política internacional a través de la IAVCEI (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior) y la UNESCO. En el caso concreto de El Hierro, desde el año 2003 el ITER-INVOLCAN ha hecho un esfuerzo en mejorar la vigilancia volcánica tanto desde el punto de vista de la geoquímica de gases como de la geodesia, tarea que se ha visto incrementada a raíz de la reciente crisis sismo-volcánica.

El programa geoquímico del INVOLCAN para la vigilancia volcánica en Canarias cuenta con un seguimiento y medida en modo continuo de parámetros de interés para la vigilancia a través de (i) una red geoquímica instrumental permanente impulsada en el año 1999 y compuesta por estaciones geoquímicas del ITER y de la Universidad de La Laguna (ULL). Esta red geoquímica está constituida por veinte estaciones: siete en Tenerife; cuatro en La Palma; ocho en El Hierro (Fig. 1) y una en Lanzarote y (ii) una red geodésica instrumental permanente impulsada en el año 2002 y compuesta por estaciones GPS del ITER, Gobierno de Canarias y la Universidad de Nagoya (Japón) (Sagiya *et al.*, 2012). Esta red geodésica está constituida por treinta y tres estaciones: once en Tenerife; tres en La Palma; siete en El Hierro (Fig. 1), una en La Gomera, cuatro en Gran Canaria, cuatro en Fuerteventura y tres en Lanzarote.



Fig. 1. Red instrumental geoquímica y geodésica permanente del INVOLCAN para la vigilancia volcánica en la isla de El Hierro.

Este programa cuenta también con un apartado sobre el seguimiento y medida en modo discreto de parámetros geoquímicos y geofísicos (temperatura principalmente) de interés para la vigilancia volcánica. Esta parte del programa sólo se ejecuta en las islas que han experimentado erupciones históricas en Canarias y/o que presentan indicadores de una actividad volcánica muy reciente: La Palma, El Hierro, Lanzarote y Tenerife.

En este artículo se mostrarán los resultados obtenidos tanto por la red geoquímica instrumental permanente instalada en la isla de El Hierro como por las campañas de campo en modo discreto realizadas en la isla entre julio de 2011 y abril de 2012. Estos resultados han evidenciado una clara y estrecha relación entre los cambios ocurridos en la actividad sismo-volcánica y en la emisión de gases volcánicos, habiendo sido claves para entender mejor el proceso volcánico que ha tenido y sigue teniendo lugar en la isla.

¿Por qué es importante el seguimiento y medida de los gases volcánicos?

Los volcanes se construyen y crecen por la acumulación de materiales alrededor de una fuente de emisión, ya sean materiales fragmentados conocidos como piroclastos, o bien lavas. Las explosiones volcánicas resultan del aumento súbito de volumen de los gases que se separan de los magmas cuando éstos ascienden a través de los conductos de un sistema volcánico y las erupciones volcánicas explosivas son gobernadas principalmente por los gases disueltos en el magma y la forma en que estos gases son separados del magma (exsolución) y liberados desde la cámara o reservorio magmático. Existe una amplia variedad de gases volcánicos contenidos en los magmas, y entre los más abundantes encontramos el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂) y el dióxido de azufre (SO₂). La medida y estudio de los gases volcánicos es muy importante ya que son la fuerza motriz de las erupciones volcánicas (si no hubiera gas disuelto en el magma no habrían erupciones) y nos permite entender la dinámica del ciclo eruptivo (pre-, eruptivo y post-) ya sea con métodos directos o métodos indirectos.

Las emisiones gaseosas en los volcanes ocurren de forma visible a través de los cráteres activos y hervideros (fumarolas, plumas volcánicas) y de forma no visible, a través de los suelos que forman los cráteres y los flancos del volcán (Fig. 2).

Durante los últimos veinte años, diversos estudios han puesto de manifiesto que la magnitud de las emanaciones no visibles puede ser del mismo orden o incluso superar a la de las emanaciones visibles (Allard *et al.*, 1991; Chiodini *et al.*, 1996, 1998, 2001, 2007; Chiodini & Frondini,

2001; Brombach *et al.*, 2001; Frondini *et al.*, 2004; Granieri *et al.*, 2006; Fridriksson *et al.*, 2006, Mori *et al.*, 2001; Pérez *et al.*, 2004, 2011; Rogie *et al.*, 2000, 2001; Salazar *et al.*, 2001; Hernández *et al.*, 1998, 2001a,b,c, 2003, 2006). Estas emanaciones no visibles se denominan emanaciones “difusas”, debido a que tienen lugar a través de grandes extensiones de la superficie y no son perceptibles a simple vista, produciendo concentraciones anómalas de ciertos gases en los suelos del volcán.

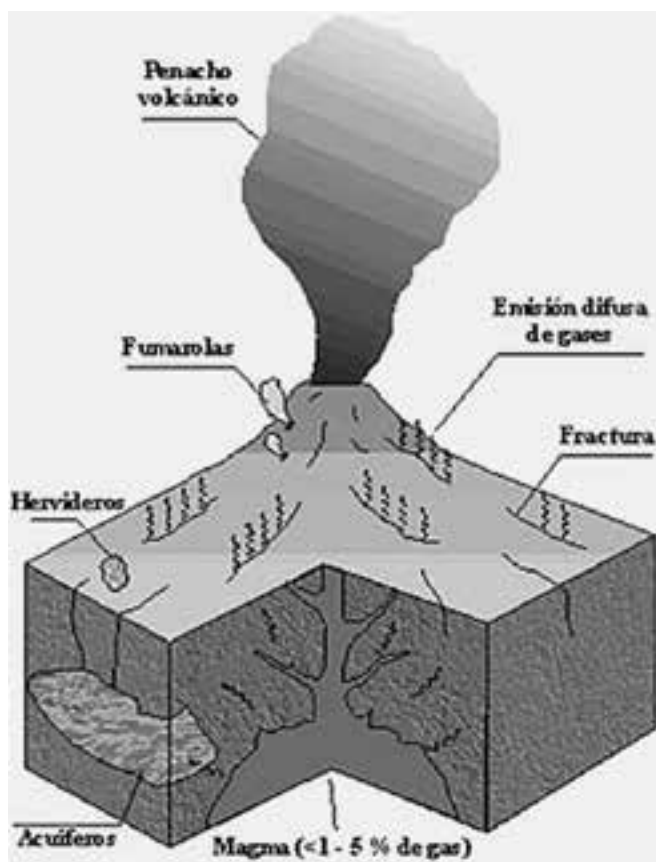


Fig. 2. Tipos de manifestaciones de gases presentes en un volcán.

En los últimos veinte años se ha demostrado que la desgasificación difusa a través del suelo de los flancos de un volcán es sensible a cambios en su actividad, y proporciona una herramienta muy útil y relativamente segura en las tareas de vigilancia volcánica (Hernández *et al.*, 2001b, 2012a, 2012b; Carapezza *et al.*, 2004; Cartagena *et al.*, 2004; Galindo *et al.*, 2004; Granieri *et al.*, 2006; Lopez *et al.*, 2004; Marrero *et al.*, 2008; Melián

et al., 2004, 2008, 2006, 2012; Mori *et al.*, 2002; Notsu *et al.*, 2005, 2006; Pérez *et al.*, 2004, 2012, 2013; Padrón *et al.*, 2012a, 2012b, 2008, 2013; Rogie *et al.*, 2001; Salazar *et al.*, 2004; Shimoike *et al.*, 2002). Los estudios de desgasificación difusa se han centrado principalmente en el CO₂ debido a que, después del vapor de agua, es la segunda especie gaseosa mayoritaria en los gases volcánicos y se caracteriza por su baja solubilidad en fundidos silicatados (Stolper & Holloway, 1988). El CO₂ en los gases volcánicos se considera una especie conservativa: cualquier variación en las proporciones relativas de otras especies respecto al CO₂ puede reflejar la aparición de procesos que están teniendo lugar en el sistema volcánico. Sin embargo, los estudios de desgasificación difusa de CO₂ presentan ciertos inconvenientes: en su camino de ascenso hacia la superficie, el CO₂ puede quedar retenido en los acuíferos presentes en la zona de interés, enmascarando así la verdadera magnitud de la desgasificación volcánica. Además, las emisiones difusas del CO₂ volcánico en superficie pueden presentar contaminaciones importantes de CO₂ procedente del aire y de los procesos biológicos que tienen lugar en el ambiente superficial de los volcanes (descomposición de materia orgánica, respiración de las raíces de las plantas,...).

Recientemente, los estudios de geoquímica de gases volcánicos están prestando atención especial al gas Helio (He) ya que se considera un indicador geoquímico casi ideal (Pogorski & Quirt, 1981) por ser químicamente inerte, físicamente estable, muy poco soluble en agua en condiciones ambientales y prácticamente no absorbible. La presencia de anomalías de He en superficie está relacionada principalmente con la migración de fluidos de origen profundo controlada por las características tectónicas de la zona. En los estudios sobre los gases que forman la atmósfera del suelo, generalmente el contenido en gas helio se presenta como la diferencia con el contenido de helio en la atmósfera, 5230 ± 10 ppb (Holland & Emerson, 1990; Gluekauf, 1946). Los enriquecimientos de helio en la atmósfera del suelo asociados a la presencia de fallas o reservorios de hidrocarburos, sistemas hidrotermales o cámaras magmáticas, pueden ser del orden de los miles de ppb. Las concentraciones de gas helio en la atmósfera superficial del suelo proporcionan información sobre la localización y características de la fuente de gas y de la fracturación de la corteza terrestre (Jones & Drozd, 1983; Butt & Gole, 1985; Roberts & Roen, 1985; Reimer, 1990; Klusman, 1993; Lombardi *et al.*, 1993; D'Alessandro & Parello, 1997; Padrón *et al.*, 2003; Hernández *et al.*, 2004).

El manto terrestre se encuentra enriquecido en el isótopo ³He primordial, el cual está todavía emanando desde el interior de la Tierra hacia la superficie. Una de las principales ventanas de desgasificación de los gases mantélicos son los volcanes, los cuales son una importante fuente de ³He a la atmósfera. La relación ³He/⁴He en muestras naturales es muy variable, y oscila en un rango entre 10⁻⁹ y 10⁻⁴ aproximadamente (Polak *et al.*, 1975;

Ozima & Podoseck, 2002). Los valores más bajos de esta relación isotópica se deben a la producción radiogénica de ^4He , mientras que los mayores valores son debidos a la emisión mantélica. En medio de ambos extremos se encuentra al valor para el aire: $1,39 \times 10^{-6}$, según Farley & Neroda (1998). Estas amplias variaciones han convertido a la relación $^3\text{He}/^4\text{He}$ en un excelente indicador de la contribución mantélica en muchos ambientes geológicos (Polak *et al.*, 1975; Craig & Lupton, 1981; Sano *et al.*, 1984; Allard, 1992; Hilton *et al.*, 1993; Ozima & Podoseck, 2002).

Las relaciones $^3\text{He}/^4\text{He}$ de los fluidos terrestres pueden ser explicadas en términos de mezcla de tres principales orígenes o reservorios: (a) la atmósfera, con un valor de $1,39 \times 10^{-6}$; (b) radiogénico o cortical, con un valor aproximado de 10^{-8} ; y (c) el manto, con una relación aproximada de 10^{-5} . De forma más estricta, este último reservorio puede dividirse en tres tipos: (c₁) MORB (Mid-ocean Ridge Basalts) correspondientes a un manto poco profundo y más desgasificado, con valores de $^3\text{He}/^4\text{He}$ alrededor de 1.1×10^{-5} (Ozima & Zashu, 1983; Ozima & Podoseck, 2002); (c₂) pluma, procedentes del manto inferior, menos desgasificado que el anterior, con valores superiores de $^3\text{He}/^4\text{He}$ que puede superar 5×10^{-5} (Kaneoka & Takao-ka, 1980; Kurtz *et al.*, 1982); y (c₃) subducción, con valores inferiores a los anteriores (alrededor de 8×10^{-6}) debido a un aporte de ^4He radiogénico procedente de los sedimentos oceánicos (Nagao *et al.*, 1981; Torgensen *et al.*, 1982).

Pérez *et al.* (1994), estudiaron las relaciones $^3\text{He}/^4\text{He}$ en las descargas volcánico-hidrotermales de las islas Canarias, encontrando una muy buena relación entre los valores de esta relación isotópica y las edades de las islas, con los máximos valores medidos en las islas de La Palma y El Hierro. Este resultado indica que El Hierro y La Palma presentan en la actualidad una mejor conexión con la anomalía del manto terrestre responsable del vulcanismo canario, y por esta razón han sido seleccionadas como objetos del presente proyecto de investigación. La figura 3 muestra la correlación existente entre las edades de las islas y la emisión de ^3He .

Finalmente, entre los gases volcánicos sulfurados, las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) y de sulfuro de hidrógeno (H_2S) son las principales fuentes de azufre a la atmósfera (Bates *et al.*, 1992; Berner & Berner, 1996). El producto de azufre dominante liberado a la superficie terrestre es controlado por una compleja combinación de condiciones ambientales tanto en el interior como en el exterior del volcán. Estas condiciones incluyen la presión y la temperatura, el tipo de roca encajante, y las reacciones químicas que se producen entre las sustancias que contienen azufre. Durante los últimos treinta años, los flujos volcánicos de SO_2 se han medido usando el CORrelation SPECTrometer (COSPEC) y TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). Estos detectores de luz ultravioleta (UV) han tenido un impacto enorme en el desarrollo de la vulcanología moderna,

permitiendo la valoración del flujo total global de volátiles de origen volcánico a la atmósfera (Allard *et al.*, 1994; Barrancos *et al.*, 2008; Hoff & Millan, 1981; Fischer *et al.*, 1994, 2002; Galle, 2003; Kazahaya *et al.*, 2004; Olmos *et al.*, 2007; Stoiber *et al.*, 1986; Taran *et al.*, 2002; Williams *et al.*, 1990). Recientemente se está utilizando un nuevo tipo de detector, el mini-DOAS, que representa una metodología analítica basada en la espectroscopía diferencial para determinar las emisiones de SO₂ en volcanes (Galle, 2003; Johansson *et al.*, 2009).

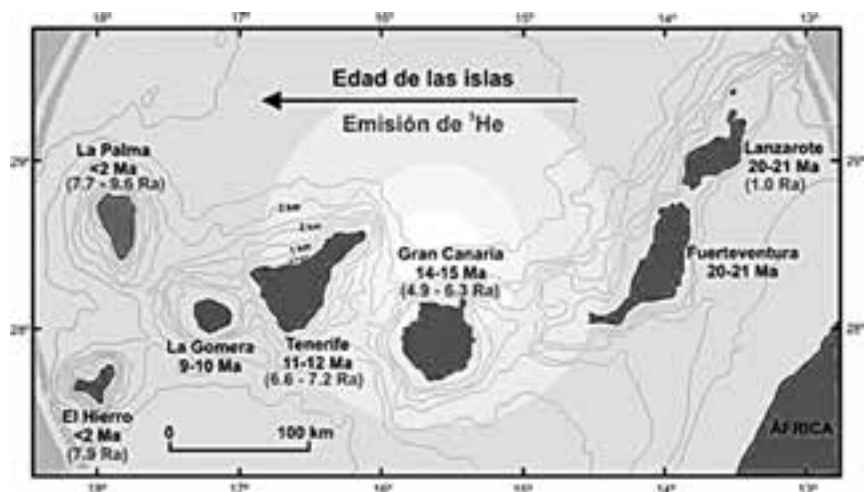


Fig. 3. Edades máximas medidas en el volcanismo emergido de las Islas Canarias y emisión de ³He, según Pérez *et al.*, 1994, siendo Ra = 1,39 x 10⁻⁶ la relación ³He/⁴He en el aire (Farley & Neroda, 1998). La isla de La Palma, donde se encuentra el volcán Cumbre Vieja muestra el mayor valor de esta relación isotópica medido en Canarias (Pérez *et al.*, 1994; Hilton *et al.*, 2000).

Principales características geológicas e hidrogeológicas de la isla de El Hierro

El Hierro es la isla más pequeña y suroccidental del archipiélago canario, con una superficie de 278 km². Representa la cima de un volcán en escudo elevándose desde el fondo del mar a una profundidad de 4000 m hasta un máximo de 1501 m sobre el nivel del mar. El Avance del Plan Hidrológico (1990) supuso un paso decisivo, tanto en el conocimiento de la geología de la isla como de sus características hidrogeológicas. Un resumen de este trabajo se publicó en 1995 bajo el título *El Agua en El Hierro* (Navarro & Soler, 1995). En él se describe la formación de la isla, la evolución del crecimiento insular, el deslizamiento de El Golfo y sus

consecuencias. Estudios posteriores han corroborado el trabajo y las conclusiones de los autores.

La principal característica volcano-tectónica de la isla es la presencia de tres dorsales volcánicas principales (*rifts*) (Fig. 4). Desde el punto de vista geológico, la isla de El Hierro es la más joven del archipiélago canario, con rocas subaéreas datadas en 1,12 Ma (Guillou *et al.*, 1996).

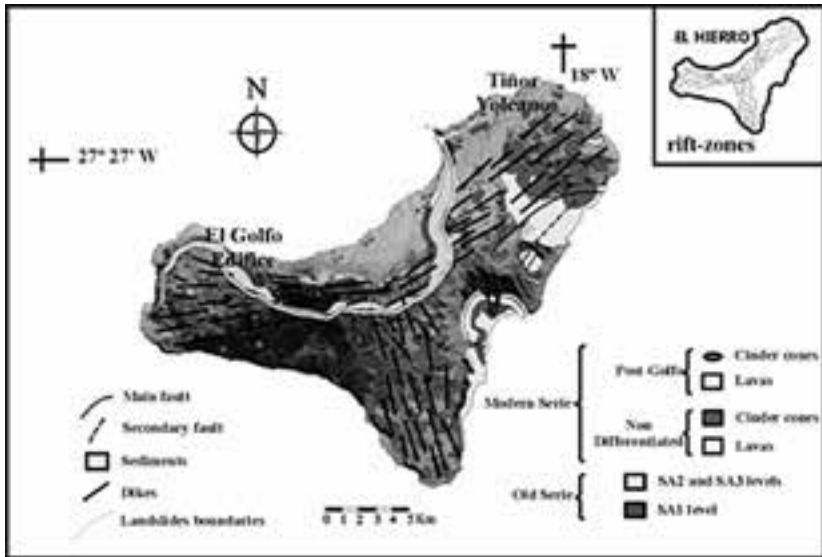


Fig. 4. Mapa volcano-estructural simplificado de la isla de EL Hierro (modificado de Navarro & Soler, 1995)

La datación radiométrica y estratigrafía magnética ha permitido una reconstrucción precisa de la evolución volcánica de la parte emergida de El Hierro (Guillou *et al.*, 1996; Carracedo *et al.*, 2001; Blanco-Montenegro *et al.*, 2008). Esta evolución puede resumirse en tres fases volcánicas principales: (i) el volcán Tiñor, (ii) el edificio El Golfo y (iii) el volcanismo tipo *rift* (Fig. 4). El volcán Tiñor, aflora en el flanco noreste de la isla, y corresponde a la primera etapa de crecimiento subaérea de El Hierro, entre 1,12 y 0,88 Ma. Posteriormente, entre 545 y 176 miles de años (ka) se desarrolla un nuevo edificio volcánico conocido como El Golfo, tras el derrumbe del edificio Tiñor que ocurrió alrededor de 882 ka, llenando el flanco NO formado por el colapso del volcán Tiñor. El edificio volcánico de El Golfo formó la mayor parte del grueso de la isla de El Hierro. El vulcanismo fisural aparece durante la última etapa de crecimiento de la isla, con la actividad simultánea de las tres dorsales volcánicas o *rifts* (Blanco-Montenegro *et al.*, 2008).

La actividad volcánica reciente en la isla de El Hierro ha tenido lugar preferentemente a lo largo de direcciones radiales, centrándose principalmente en las tres dorsales volcánicas con direcciones NE, S y SO respecto a la depresión de El Golfo. Antes de la erupción submarina ocurrida en 2011-2012 y durante los últimos 500 años (periodo histórico), Hernández Pacheco *et al.*, (1982), reportaron una sola erupción volcánica en 1793 en el oeste de la isla. La ocurrencia de esta erupción volcánica está actualmente cuestionada y se la asocia al edificio volcánico de Lomo Negro. Stroncik *et al.*, (2009) realizaron un estudio petrológico y termobarométrico de basanitas emitidas durante erupciones de conos volcánicos jóvenes situados a lo largo de los sectores submarinos de las tres dorsales volcánicas para reconstruir el sistema de alimentación y almacenamiento de magma debajo de la isla. Llegaron a la conclusión de que el magma parece almacenarse en pequeños cuerpos magmáticos intermitentes, pudiendo ser una característica común de las islas oceánicas alimentadas por penachos o plumas mantélicas con flujos relativamente bajos, resultando en una única fuente de magma limitada y periódica.

Respecto al sistema hidrológico de la isla de El Hierro, está caracterizado por la existencia de acuíferos costeros altamente explotados por la población y los usos agrícolas establecidos cerca del mar. Esto presenta una diferencia importante con respecto a otros tipos de acuíferos volcánicos. Las principales fuentes de aguas subterráneas corresponden a los depósitos basales a lo largo de la costa, que son muy escasos (Caldas & García, 1973). Las aguas basales se encuentran un poco contaminadas por el agua de mar, aunque el ión bicarbonato se encuentra en altas concentraciones sobre todo en la región occidental. En el caso de El Golfo de Frontera (Fig. 4), se encuentran formaciones geológicas más recientes y con mayor permeabilidad que favorecen la vulnerabilidad de la interfase agua dulce-agua de mar (Santamarta, 2006).

En El Hierro, las precipitaciones varían mucho dependiendo de la altitud, con un promedio anual estimado para toda la isla de 390 mm, y con una evapotranspiración que representa alrededor del 78% de la precipitación anual. En 1985, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1985) llevó a cabo un estudio hidrológico en la isla consistente en el análisis de 32 muestras de aguas subterráneas. Encontraron que la conductividad está estrechamente relacionada con la posición topográfica del lugar de extracción, con zonas montañosas caracterizadas por valores mínimos (150 $\mu\text{s/cm}$), y aguas ligeramente mineralizadas. Por el contrario, en zonas cerca de la costa, las aguas subterráneas superan los 1000 $\mu\text{s/cm}$, siendo en algunos casos altamente mineralizadas. Normalmente, la temperatura de las aguas subterráneas es menor en el centro de la isla y aumenta hacia la costa para llegar a los 19-23 °C, dependiendo de la temperatura media de la superficie. Sin embargo, en el extremo occidental

de la isla, se observa una anomalía térmica significativa, con el agua subterránea alcanzando hasta los 30 °C. Esta zona también se caracteriza por un alto contenido en bicarbonatos.

De acuerdo con el Plan Hidrológico Insular de El Hierro (PHIEH, 2002), el uso de las aguas subterráneas en la isla consiste en un total de 93 puntos de captación de aguas subterráneas, que incluyen pozos y galerías (49), pozos de control (30) y fuentes naturales (14). La figura 5 muestra la ubicación de los manantiales, así como los pozos y galerías productivas en la actualidad. Según el PHIEH, El Hierro consta de tres cuerpos principales de agua subterránea:

(I) Acuífero del Valle de El Golfo: A pesar de la homogeneidad geológica y la tasa de infiltración, en el Valle de El Golfo se pueden distinguir dos sectores con características químicas muy diferentes, sector Este con agua subterránea de buena calidad, y el Oeste, con aguas subterráneas con alto contenido de carbonatos y procesos de infiltración. Estas diferencias se deben a la infiltración de agua de alta calidad proveniente de la meseta de Nisdafe a través de la base de la pared oriental del Valle de El Golfo, la única zona en la que, por la orientación de los diques y las grietas abiertas, el valle está conectado con el resto de la isla (Fig. 5). Sin embargo, en el lado occidental del Valle de El Golfo, el agua procedente de las precipitaciones se infiltra en un sector con fuertes emisiones de CO₂ (vulcanismo en la cabecera del Valle de El Golfo), generando un aumento en el contenido de bicarbonatos.



Fig. 5. Principales cuerpos de agua subterránea en la isla de El Hierro.

(II) Acuífero Valverde-Sector Occidental: El sector oeste es la zona de máxima infiltración, descargando agua subterránea en el Valle de El Golfo y siguiendo el camino marcado por los diques y fisuras a lo largo de la dorsal volcánica y cruzando el basamento sin descarga de CO₂ (Fig. 5). Este hecho hace que el agua subterránea en este sector esté casi libre de bicarbonatos. Sin embargo, la descarga de aguas subterráneas hacia el NE cruza una zona afectada por la emisión de CO₂ de origen profundo.

(III) Acuífero Julan-Sector Sur: Este área de recarga es la más pequeña, con una dirección de descarga hacia el sur. El contenido inicial de bicarbonatos aumenta al cruzar la zona de actividad volcánica más reciente, empeorando la calidad del agua. Por otro lado, la alta permeabilidad de la zona favorece la intrusión de agua de mar en las zonas de captación del agua a lo largo de la costa.

Cronología de la erupción submarina de 2011-2012

Desde los comienzos de esta crisis sismo-volcánica, el equipo científico del INVOLCAN ha redoblado sus esfuerzos en materia de vigilancia volcánica desplegando sobre el terreno una ingente cantidad de instrumentación y realizando numerosas campañas científicas de seguimiento y medida de parámetros de interés para la vigilancia volcánica que no se pueden obtener a través de redes instrumentales permanentes, así como toda la sabiduría adquirida por este grupo durante los últimos 15 años en los más de 20 países en los que ha prestado sus servicios, allá donde hay un volcán activo. Esta ingente cantidad de trabajo ha podido materializarse gracias al proyecto MAKAVOL “Fortalecimiento de las capacidades de I+D+i+d para contribuir a la reducción del Riesgo Volcánico en la Macaronesia (MAC/3/C161)” que está siendo cofinanciado por el programa de cooperación transnacional de la Unión Europea Madeira-Canarias-Azores (MAC 2007-2013) y a la colaboración de los Cabildos Insulares de Tenerife y El Hierro y la Universidad de La Laguna. El concienzudo estudio de la composición química e isotópica de los gases volcánicos, la fuerza motriz de las erupciones, a través del muestreo en miles de puntos a lo largo de estos meses, el seguimiento en modo continuo de la emisión difusa de gases y la observación precisa de las deformaciones del terreno gracias a la colaboración del Dr. Takeshi Sagiya, de la Universidad de Nagoya, Japón, llevó al equipo científico del INVOLCAN a la conclusión de que un proceso de reactivación magmática estaba en curso, y que éste podría culminar con una erupción volcánica.

Después de más de doscientos años de reposo, a finales de julio de 2011, las dos estaciones sísmicas desplegadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) desde el inicio de la década de 1990, registraron un

incremento significativo en el número de terremotos de baja magnitud ($M < 2,5$), estando estos principalmente localizados al norte de la isla y a una profundidad entre 8 y 15 km, indicando el inicio de una actividad sismo-volcánica inusual en El Hierro. El catálogo de terremotos del IGN durante el período julio 2011-marzo 2012 incluye más de 12.000 eventos (Fig. 6), el mayor de magnitud 4,6 ocurrido el 11 de noviembre de 2011.

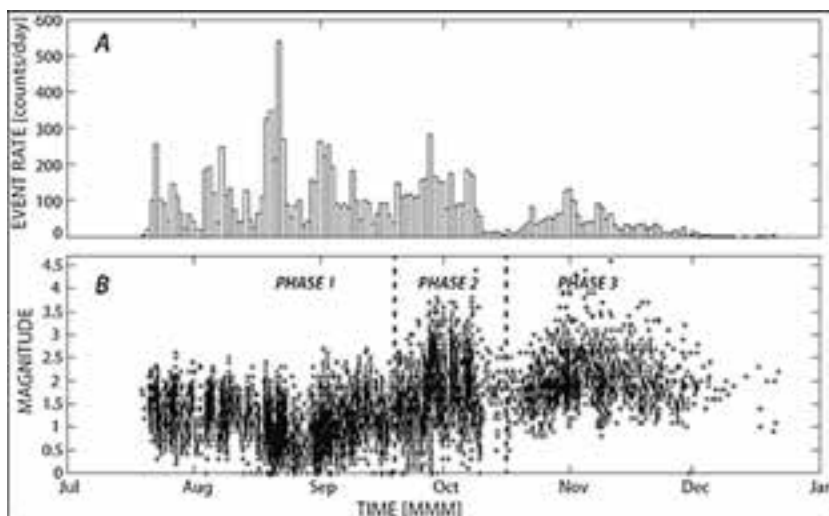


Fig. 6. (A) Número de terremotos diarios entre julio de 2011 y enero de 2012. (B) Distribución temporal de las magnitudes sísmicas entre julio de 2011 y enero de 2012. FASE 1, 2 y 3 están marcadas por líneas verticales gruesas y discontinuas (modificado de Ibañez *et al.*, 2012; Fuente original de los datos IGN).

Después de casi tres meses de intensa actividad sísmica, el 10 de octubre de 2011 a las 05:15 (UTC), el carácter dominante de la sismicidad cambió de terremotos discretos a tremor continuo, confirmándose el 12 de octubre de 2011 el comienzo de la erupción submarina por la aparición de una “mancha” en la superficie del mar a unos 2 km al sur de la pequeña localidad pesquera de La Restinga.

Algunos autores (De la Nuez Pestana, 2012; López *et al.*, 2012; Martí *et al.*, 2013) han publicado que la fecha del comienzo de la erupción fue el 10 de octubre debido a que es cuando comienza el tremor, confundiendo la existencia de tremor volcánico con el comienzo de una erupción. El tremor volcánico es una señal sísmica que puede durar horas e incluso días y que está relacionada con el movimiento de fluidos (magma, gases) dentro del volcán. El ascenso del magma desde varios kilómetros de profundidad hacia la superficie puede tardar horas o incluso días, produciendo este tipo de señal sísmica. En el caso de la erupción de El Hierro, el tremor volcánico

comenzó a registrarse el 10 de octubre, y muy probablemente el ascenso asísmico (no se registraron apenas sismos volcano-tectónicos) del magma tuvo lugar entre este día y el 12 de octubre, día en el que aparece la primera evidencia de la erupción submarina. Este fenómeno se ha observado en muchos volcanes del planeta, en especial el volcán Etna en Sicilia, Italia.

Jesús Ibañez (Ibañez *et al.*, 2012), realizaron un estudio de investigación en colaboración con científicos del ITER, y de las universidades de Alaska Fairbanks, Granada y Almería, de la sismicidad, centrado en el análisis y la evolución del parámetro b , que es la pendiente de la ecuación formulada por Richter en 1958 y que relaciona la frecuencia con la magnitud de los terremotos. En zonas de actividad tectónica, el valor de b es casi siempre cercano a 1,0; sin embargo, en áreas volcánicas, los valores de b son mayores, llegando incluso a 2,5. En este trabajo científico, publicado por la revista *Geophysical Journal International*, se ha agrupado la secuencia sísmica registrada durante la crisis sismo-volcánica de El Hierro en tres fases distintas, las cuales corresponden a clusters geográficos bien separados y de distintos regímenes sísmicos (Fig. 6). El valor medio estimado del parámetro b durante toda la serie sísmica ha sido de $1,18 \pm 0,03$, con una magnitud sísmica de 1,3 para todo el catálogo entre julio de 2011 y enero de 2012. Este estudio destaca las grandes diferencias encontradas en el parámetro b durante las fases inicial y final de la erupción submarina de El Hierro, así como que la actividad inicial pre-eruptiva estuvo caracterizada por valores de b cercanos a 2,25, mientras que en la fase tercera y final, este valor estuvo en torno a 1,25. El patrón temporal del valor b fue atípico y esencialmente inverso a lo que se esperaba y sugiere que durante la primera fase los terremotos reflejaron la migración del magma desde zonas del manto superior a profundidades cercanas a la corteza oceánica. El área donde el magma intruyó inicialmente en la corteza fue una zona de transición caracterizada por una alta fracturación, lo que favoreció que los valores iniciales del parámetro b fueran altos. Los terremotos de mayor magnitud registrados en la segunda fase parecen reflejar la relajación alrededor del reservorio de magma que alimentó la erupción, dando lugar por lo tanto a valores de b menores. Este estudio destaca que la casi ausencia de sismicidad superficial por encima de los 8 kilómetros días antes del comienzo de la erupción submarina el 12 de octubre de 2011 fue resultado del ascenso sísmico del magma por zonas de debilidad estructural. Sin embargo, las etapas posteriores de actividad volcánica se caracterizaron por una sismicidad más profunda y menor número de terremotos aunque de mayor magnitud. Esta fase parece haber representado la relajación de la roca encajante alrededor del reservorio magmático que alimentó la erupción.

Durante la erupción submarina, se produjo una amplia zona caracterizada por la decoloración del agua de mar (Fig. 7), con una gama de

colores desde el verde claro al marrón oscuro. Esta decoloración se debió a la intensa descarga de fluidos hidrotermales de alta temperatura, así como de gases magmáticos y fragmentos de lava humeante.



Fig. 7. Foto aérea de la zona de la erupción submarina al sur de La Restinga tomada desde un helicóptero de la Guardia Civil.

Desde el comienzo de este espectáculo natural, y durante los cinco meses que duró la erupción submarina, el personal científico del INVOLCAN, con la inestimable y profusa ayuda de la Unidad de Helicópteros de la Guardia Civil de la Zona de Canarias, ha sido los ojos a través de los que miles de personas en todo el planeta han podido seguir, de manera actualizada, el transcurrir del fenómeno. Fotografías que nos muestran un océano en ocasiones hirviente, en ocasiones trufado de vivos colores y formas circulares.

Respecto a la red geodésica permanente instalada en El Hierro (no se tratará en este artículo), registró entre agosto y finales de septiembre de 2011 una inflación significativa del terreno debajo de la isla de El Hierro, zona que concuerda con la ubicación de los epicentros de la sismicidad en el mismo período. Antes del comienzo de la erupción submarina el 12 de octubre, se registraron también señales geoquímicas precursoras de la erupción como respuesta a los cambios de esfuerzo/deformación ocurridos tanto a través de la red geoquímica instrumental permanente como de las campañas geoquímicas realizadas en modo discreto.

Metodología

El trabajo que en materia de vigilancia volcánica lleva realizando en la isla de El Hierro la División de Medio Ambiente del ITER (ahora formando parte del INVOLCAN) podemos clasificarlo en dos grupos: *Modo discreto* (mediante la realización de campañas de campo con centenares de medidas en toda la isla), y *Modo continuo* (mediante la instalación, puesta en funcionamiento y operación de estaciones automáticas geoquímicas).

Modo discreto

Desde 1998, el Grupo Vulcanológico del ITER ha monitorizado la emisión difusa de CO₂ de la isla de El Hierro. Debido a la inexistencia de emanaciones visibles de gas en el ambiente superficial de la isla, los estudios de desgasificación difusa se han convertido en la herramienta geoquímica más útil para vigilar la actividad volcánica en El Hierro.

El método utilizado para la medida del flujo difuso de CO₂ ha sido el de la “cámara de acumulación” (Parkinson, 1981). Para ello se seleccionaron unos 600 puntos de medida distribuidos lo más homogéneamente posible a lo largo del territorio insular. En cada campaña, los puntos de medida se localizan siempre con un GPS portátil ya que las coordenadas de los puntos son siempre las mismas. Las mediciones de flujo difuso de CO₂ se realizan in situ por medio de un sensor de infrarrojos no dispersivo (NDIR; analizador de CO₂ LICOR-800), con un rango de medición de 0 a 2000 ppm (Fig. 8). Las mediciones consisten en la colocación de la cámara de acumulación en el suelo, y obligar a hacer recircular el gas en un bucle cerrado entre la cámara y el analizador. En el ordenador de mano, se registra el aumento de la concentración de CO₂ en función del tiempo, lo que permite al operador calcular el flujo de difuso de CO₂ en cada punto de medida. Los resultados de flujo difuso de CO₂ de cada una de las campañas se utilizaron para construir los mapas de distribución espacial mediante una simulación secuencial Gaussiana (SGS) a través del programa gsim (Cardellini *et al.*, 2003).

Así mismo, en cada punto de medida se midió la temperatura del suelo a 15 y 40 cm de profundidad por medio del termopar y se tomaron muestras de gas a 40 cm de profundidad (Fig. 9) para el posterior análisis de la composición química e isotópica.

En el período de verano de 2003, se realizó la primera campaña de emisión difusa de helio mediante el análisis del contenido de helio del gas de suelo en los 600 puntos de muestreo situados homogéneamente en toda la superficie de la isla. Desde el comienzo de la crisis sismo-volcánica entre 2011 y 2012, se han materializado otros catorce estudios de emisión de helio con la misma densidad de muestreo. Así mismo, se ha realizado un seguimiento regular de la relación isotópica ³He/⁴He en los gases disueltos

en el agua del pozo San Simón. La razón de este seguimiento es que el isótopo ^3He está considerado como el mejor trazador geoquímico de actividad magmática.



Fig. 8. Cayetano Guillén realizando medidas de flujo difuso de CO_2 mediante un equipo portátil.

Los datos isotópicos son siempre corregidos teniendo en cuenta la contribución atmosférica (Craig *et al.*, 1981) y fueron analizados en los laboratorios del Centro de Investigación Geoquímica de la Universidad de Tokio en Japón. El pozo San Simón, ubicado en el noroeste de la isla, ha demostrado ser un punto muy sensible debido a la interacción del CO_2 que emana de fuentes profundas del edificio volcánico. En cada punto de

muestreo, las muestras de gas del suelo se recogieron a 40 cm de profundidad utilizando una sonda de acero inoxidable, almacenado las muestras en recipientes previamente evacuados y analizando posteriormente la concentración de helio en un plazo de 24 horas por medio de un espectrómetro de masas cuadrupolar (QMS; modelo de Pfeiffer Omnistar 422). La precisión de la concentración de helio determinada por el instrumento se estima en ± 300 ppb. Los datos de concentración de helio del suelo se utilizan luego para estimar el flujo difusivo de helio en cada punto a través de la ley de Fick.



Fig. 9. Germán Padilla realizando la toma de muestras de gases en la atmósfera del suelo.

Modo continuo

Respecto al modo continuo, el 25 de septiembre de 2003 se instaló la primera estación automática de flujo difuso de CO_2 (HIE01) en los Llanos de Guillén (Fig. 10), donde se produce la intersección de los tres ejes volcánicos de la isla. Los estudios previos de flujo difuso de CO_2 indicaban que el lugar elegido para la instalación correspondía a una de las zonas con mayores valores de flujo difuso de CO_2 (Martínez-Zubieta, 2001; Padrón *et al.*, 2008b.) Una vez iniciada la crisis sismo-volcánica de 2011 y con el objetivo de reforzar la red de vigilancia que el INVOLCAN tenía desplegada en la isla, el 7 de octubre de 2011 se instaló una segunda estación geoquímica automática (HIE07) cerca de la ensenada de Tacorón, al sur la isla de El Hierro (Fig. 11), casi una semana antes del comienzo de la erupción submarina.



Fig. 10. Imagen de la estación geoquímica automática HIE01 en Llanos de Guillén.



Fig. 11. Imagen de la estación geoquímica automática HIE07 en Tacorón.

Ambas estaciones miden cada hora el flujo difuso de CO_2 y H_2S , así como las concentraciones de CO_2 y H_2S , contenido de agua del suelo y la temperatura atmosférica y parámetros ambientales como la velocidad y dirección del viento, temperatura del aire y la humedad, lluvia y la presión barométrica. Los parámetros meteorológicos se miden 1 m por encima del suelo y el contenido de agua del suelo y la temperatura del suelo se miden a 40 cm de profundidad, registrándose todos simultáneamente con las medidas de flujo de CO_2 y H_2S . Ambas medidas se realizan siguiendo el método de la cámara de acumulación (Parkinson, 1981). Los flujos de CO_2 y H_2S en la HIE01 se midieron por medio de un LICOR Li-820 y un Dräger Polytron II, respectivamente. En el caso de la HIE07, los flujos de CO_2 y H_2S en la HIE01 se midieron por medio de un Dräger Polytron IRCO2 LPHASENSE y un sensor de $\text{H}_2\text{S-A1}\alpha$, respectivamente. Todos los datos se almacenan en tarjetas de memoria SD y reenvían vía telemetría GSM a la sede del INVOLCAN.

Finalmente y con el objetivo de proporcionar un enfoque geoquímico multiparamétrico, en agosto de 2005 se instalaron dos estaciones geoquímicas, HIE02 en el pozo San Simón y HIE03 en La Restinga, para medir las actividades de ^{222}Rn y ^{220}Rn por medio de sensores de radón tipo SARAD RTM-2010-2 (Figs 12 y 13).

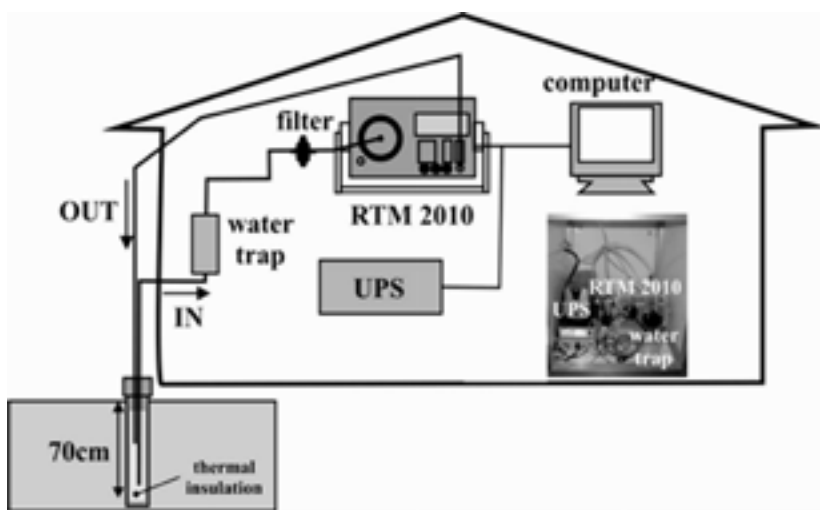


Fig. 12. Esquema de una estación geoquímica en modo continuo para la medida de las actividades de ^{222}Rn y ^{220}Rn en el suelo (modificado de Padilla *et al.*, 2013).

Siguiendo el esquema de la figura 12, el gas del suelo se recoge en una cámara cilíndrica de PVC de 75 cm de largo por 15 cm de diámetro, e

insertada a una profundidad de 75 cm en el suelo con sus paredes aisladas térmicamente para evitar la influencia de las fluctuaciones de temperatura del aire en las emisiones de radón del suelo. Se bombea gas de suelo (3 L/min) de forma continua a través de un tubo de poliamida al lugar donde se instala el sensor y después se envía de vuelta a la cámara cilíndrica de PVC. La trampa de agua se coloca antes que el sensor de radón para evitar la entrada de agua en el instrumento. La estación HIE02 (Fig. 13) y la HIE03 se encuentran a 18 y 2,2 km del foco de la erupción submarina. En ambas estaciones, el radón del suelo se mide sobre una base horaria.



Fig. 13. Imagen de la estación geoquímica automática HIE02 en el pozo San Simón.

Resultados e interpretación

En un ámbito global existen muchos sistemas volcánicos activos como el de la isla de El Hierro donde apenas existen o incluso no llegan a observarse manifestaciones de emanaciones de gases visibles al ojo humano (penachos, fumarolas, hervideros, etc); por lo tanto, los resultados de estos trabajos de investigación contribuyen a resaltar la importancia y la utilidad de los estudios de emisión difusa de gases volcánicos en los programas geoquímicos destinados al fortalecimiento de los trabajos de vigilancia volcánica.

Desde el comienzo de la actividad sísmica anómala en la isla de El Hierro en julio de 2011, el INVOLCAN se desplaza a El Hierro para reforzar las tareas de vigilancia volcánica haciendo énfasis en el modo

discreto. Se organizan varios grupos de trabajo de campo para materializar las tareas de toma de muestras de gases y medida del flujo difuso de CO₂ a lo largo de toda la geografía insular de la isla. Gracias a este esfuerzo de los miembros del INVOLCAN, se han podido obtener claras señales geoquímicas precursoras de los cambios energéticos del sistema, incluyendo el comienzo de la erupción. El INVOLCAN en todo momento mantuvo informado a la Dirección del Plan de Emergencia (PEVOLCA) comunicando vía interna todos los pronósticos relacionados con futuros cambios en la actividad. El programa de vigilancia que el INVOLCAN materializó en El Hierro ha demostrado la eficacia de vigilar desde un enfoque multidisciplinar los volcanes, haciendo especial énfasis a los gases, la fuerza motriz de las erupciones.

Algunos miembros de la comunidad científica española han cuestionado el trabajo que el equipo científico del ITER-INVOLCAN ha estado realizando en Canarias, llegando incluso a afirmar que *“Los gases apenas significan nada en este tipo de volcanismo. En la fase preeruptiva lo importante es la sismicidad y el abombamiento del terreno...”* (Carracedo, entrevista en *La Provincia*, 11.10.2011; [<http://comunidad.laprovincia.es/entrevista-chat/3235/Encuentro-digital/Juan-Carlos-Carracedo-/entrevista.html>]).

Según Carracedo, en zonas volcánicas como Canarias, prestar atención a los gases en la vigilancia volcánica carece de importancia. Sin embargo, el prestigioso volcanólogo Robert Tilling, a quien Carracedo siempre lo pone como su referente científico, afirma en el libro *“Eruptions of Hawaiian volcanoes—past, present, and future: U.S. Geological Survey”*, territorio volcánico con muchas similitudes al canario, que: *“The combination of seismic and ground-deformation monitoring has proved to be the most useful and reliable method in the short-term forecasting of Kilauea eruptions. However, some other techniques being developed or tested show promise and should increase future forecasting capabilities. These newer methods include the monitoring of changes in the composition and volume of volcanic gas emissions, such as sulfur dioxide, carbon dioxide, hydrogen, helium, and radon”*. Steve Sparks, expresidente de la Asociación Internacional de Volcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI), afirma en una publicación en 2003 (Sparks, 2003) que: *“Monitoring involves geophysical or geochemical techniques that detect magma movements and associated sub-surface interactions, and can record eruptive activity”*. Por lo tanto, resulta muy sorprendente que hoy en día algunos volcanólogos insistan en quitar importancia al uso de la geoquímica de gases como herramienta para la vigilancia volcánica en islas oceánicas.

Desde el comienzo de la actividad sísmica anómala en julio de 2011, se estuvieron realizando campañas de campo de forma continuada con objeto de tener una importación casi diaria de la tasa de emisión de CO₂. En la figura 14, se muestra la evolución temporal de la tasa de emisión difusa de

CO₂ y la energía sísmica liberada entre julio de 2011 y abril de 2012. Después de una tendencia descendente en la emisión difusa de CO₂, a partir del 29 de septiembre de 2011 comienza a registrarse un aumento brusco de la misma alcanzando su valor máximo entre el 10-11 de octubre del mismo año, uno o dos días antes del comienzo de la erupción submarina al sur de La Restinga, el 12 de octubre. Esta clara señal geoquímica precursora comenzó aproximadamente dos semanas antes del comienzo de la erupción, poniendo de manifiesto la importancia de vigilar los volcanes con métodos geoquímicos.

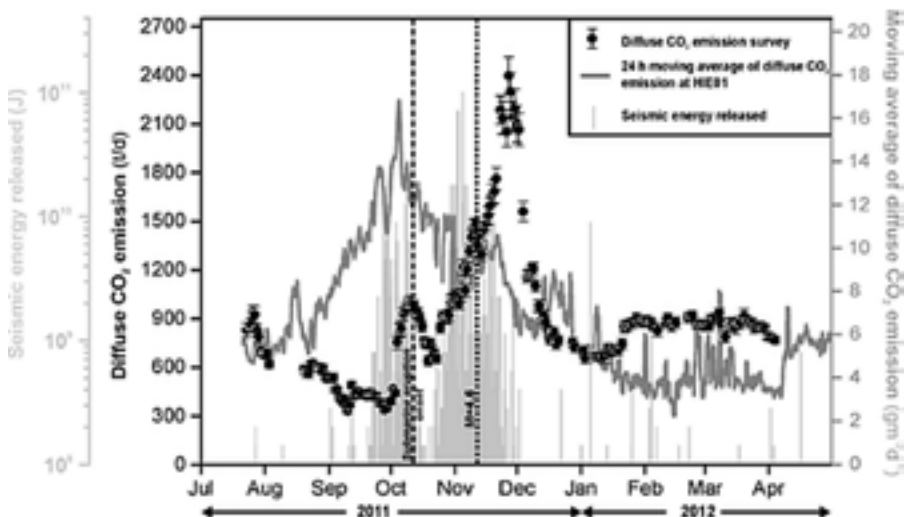


Fig. 14. Evolución temporal de la tasa de emisión difusa de CO₂ medida en la Isla de EL Hierro y evolución temporal de la emisión difusa de CO₂ medida en la estación geoquímica instrumental HIE01 entre julio de 2011 y abril de 2012 (fuente datos sísmicos del IGN).

Pasado el 11 de octubre, la tasa de emisión difusa de CO₂ vuelve a disminuir de forma continuada sin llegar nunca a valores previos al 29 de septiembre. El ascenso del magma, su descompresión en su viaje a la superficie y por consiguiente la exsolución de los gases disueltos en el magma (recordemos que el CO₂ después del H₂O es el principal componente gaseoso de los fundidos silicatados y se caracteriza por una baja solubilidad) son los procesos físicos que explican este aumento en la emisión difusa de CO₂. Cabe destacar que, aunque la mayoría de las medidas de flujo difuso de CO₂ se realizaron relativamente lejos del foco eruptivo, esta metodología geoquímica ha demostrado ser muy sensible a cambios de esfuerzos en el subsuelo de la isla.

Curiosamente, el IGN desplegó también un equipo técnico y humano para realizar medidas de flujo difuso de CO₂ en la isla de El Hierro. Su trabajo se limitó a cubrir áreas específicas de la isla, sin tener en cuenta la importancia de hacerlo en todo el territorio insular, más aún cuando el foco eruptivo ocurría fuera de la parte emergida de la isla. López *et al.* (2012) afirman que el IGN no fue capaz de encontrar una clara correlación entre la actividad volcánica pre-eruptiva y los datos gravimétricos y los geoquímicos, especialmente en lo que se refiere a datos hidrogeoquímicos. Si el IGN, organismo que tiene las competencias de vigilancia en este país encomendadas por un Real Decreto de reestructuración del Ministerio de Fomento del año 2004, hubiera actuado como un organismo integrador, las tareas de vigilancia volcánica durante la reciente crisis sismo-volcánica de El Hierro se podían haber realizado con más eficacia. La coordinación y el asesoramiento del IGN con el INVOLCAN (y otras instituciones y organismos públicos) hubieran sido decisivos debido a la larga y más que demostrada experiencia que en tareas de vigilancia volcánica mediante métodos geoquímicos tiene el grupo volcanológico del ITER (ahora formando parte del INVOLCAN).

Por otra parte, De la Nuez (2012), puso en duda la eficacia del trabajo que en geoquímica de gases ha realizado el INVOLCAN durante la crisis sismo-volcánica de El Hierro. Sin embargo, las afirmaciones (en cursiva) que realiza en su artículo pueden ser contundentemente refutadas:

1) *“El aumento significativo de la emisión difusa tiene lugar casi un mes después del inicio de la erupción, lo cual indica que este método no ha servido como señal precursora previa”*. Si nos fijamos en la figura 14, después del comienzo de la erupción submarina el 12 de octubre de 2011, se produce un descenso en la tasa de emisión difusa de CO₂ hasta aproximadamente el 19 del mismo mes, para seguidamente comenzar a incrementarse hasta llegar a los máximos valores de emisión de CO₂ durante todo este periodo, 2398 t/d el 27 de noviembre del mismo año. Este aumento espectacular en la tasa de emisión difusa de CO₂ no está relacionado con la erupción del 12 de octubre sino más bien con un aumento en la permeabilidad debido a la fracturación de la corteza producida por la intensa actividad sísmica ocurrida en noviembre. De hecho, el 11 de noviembre se registró el terremoto de mayor magnitud (M=4,6). Este aumento de permeabilidad se vio corroborado por un incremento en la componente cortical del gas helio como veremos más adelante. Ortiz *et al.* (2012) afirman que en noviembre de 2012 se produjo un segundo proceso eruptivo al norte de la isla de El Hierro, que resuelve algunos de los enigmas más importantes desde la ocurrencia del sismo de magnitud 4,6 (11 de noviembre de 2011). La desaparición repentina de la sismicidad en el norte de la isla se pudo deber a la apertura de una nueva boca eruptiva, proceso similar al que ocurrió con la sismicidad en el sur

después de la erupción en el Mar de Las Calmas. Por lo tanto, este pico en la emisión difusa de CO₂ puede ser además la evidencia geoquímica de este segundo proceso eruptivo al norte de la isla.

2) *“Del análisis del aumento de la señal de CO₂ se pueden realizar al menos dos deducciones; la primera de ellas es que el muestreo de principios de noviembre no parece similar ni equiparable a los muestreos anteriores, ya que el sistema de muestreo de CO₂ en suelos que se utiliza hace muy difícil que se puedan obtener centenares de muestras al día. La segunda deducción que se puede desprender del gráfico es que el máximo de CO₂ se obtiene cuando prácticamente no hay sismos, por lo que difícilmente se puede establecer una correlación entre la erupción-sismicidad y la emisión difusa de CO₂”.*

Igualmente De la Nuez (2012), pone de manifiesto su desconocimiento de cómo se realizan las campañas de medida de flujo difuso de CO₂. Con objeto de obtener un valor de la tasa de emisión difusa de CO₂ casi diario, cada día se computa la tasa de emisión con las 50-70 medidas que diariamente pueden hacerse en el campo. Con este sistema de rotación es posible estimar cada día la tasa de emisión de CO₂, y lógicamente no realizando 600 medidas diarias ya que logísticamente y humanamente es imposible. Respecto a la segunda deducción, ya fue explicada en el comentario anterior.

3) *“Para una explicación mas apropiada del aumento de la emisión difusa de CO₂ en noviembre, los datos de gases deberían contrastarse, además, con otros parámetros como presión atmosférica, temperatura o humedad del suelo, que podrían ayudar a explicar esas variaciones de CO₂ a lo largo del tiempo”.*

Variables meteorológicas como la presión atmosférica, o físicos del suelo como la temperatura y humedad no ejercen una influencia significativa en el flujo difuso de CO₂ como para explicar las variaciones que se observan en el flujo difuso de CO₂. En la figura 15 se representa la evolución temporal de la tasa de emisión difusa de CO₂ entre julio de 2011 y abril de 2012 en la isla de El Hierro y la presión barométrica registrada por la estación geoquímica automática HIE01. La presión barométrica (principal variable que afecta al flujo difuso de CO₂) no presenta variaciones significativas durante el periodo de estudio como para explicar un cambio en los valores de flujo en los 600 puntos de medida. Lo mismo ocurre con las otras variables como la humedad del suelo (variación de un 7% durante el periodo de estudio) y el la temperatura del suelo (variación entre 24 y 12 °C durante el periodo de estudio).

Finalmente, De la Nuez (2012) afirma en una de sus conclusiones: *“Por el contrario, el análisis de CO₂ difuso en suelos de toda la isla no ha mostrado resultados significativos en la predicción de la erupción, ni relación con la sismicidad, y requiere mas estudios para explicar la*

existencia del aumento de dicho gas justo cuando disminuye la sismicidad?. Esta conclusión carece de fundamento científico. Si bien es cierto que cuando su artículo fue publicado los artículos del INVOLCAN no habían terminado el proceso de revisión y publicación, los trabajos de geoquímica de gases que el INVOLCAN ha realizado durante la crisis sismo-volcánica de El Hierro han servido para obtener las señales precursoras de la erupción y cambios de energía del sistema más claras, como así lo demuestran los informes internos enviados a la Dirección del Plan de Emergencias (PEVOLCA). Estas señales geoquímicas precursoras de cambios en la actividad volcánica, además se han obtenido tanto en el modo discreto (campañas de flujo difuso de CO₂ y He) como en modo continuo (series temporales de flujo difuso de CO₂ y H₂S así como de las actividades del gas radón y torón) y han sido publicadas en revistas científicas internacionales de prestigio (Pérez *et al.*, 2012, Padrón *et al.*, 2013, Padilla *et al.*, 2013), prueba inequívoca del trabajo científico de vigilancia volcánica bien hecho.

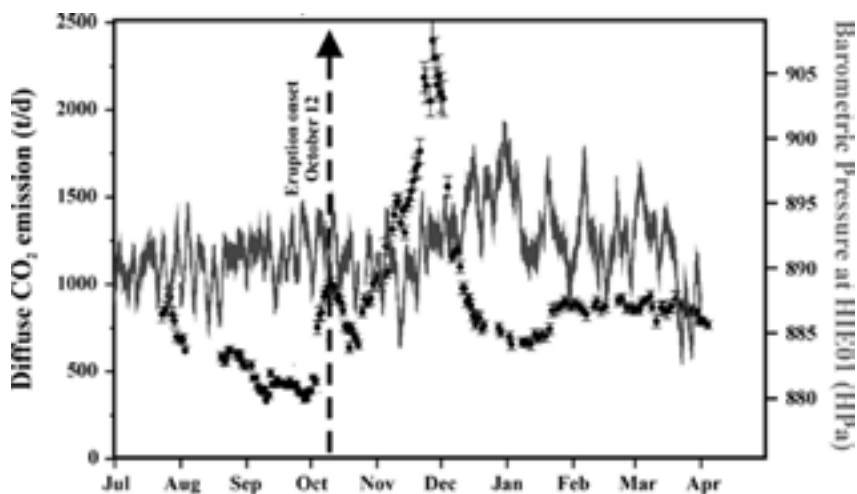


Fig. 15. Evolución temporal de la tasa de emisión difusa de CO₂ entre julio de 2011 y abril de 2012 en la isla de El Hierro y presión barométrica registrada por la estación geoquímica automática HIE01.

A diferencia del CO₂, el segundo componente mayoritario de los gases volcánicos y el más estudiado en los procesos de desgasificación difusa en sistemas volcánicos activos, las propiedades geoquímicas del helio presentan las ventajas de una menor interacción con las rocas circundantes y acuíferos en su movimiento hacia la superficie como consecuencia de su carácter noble o inerte y la baja solubilidad del helio en las aguas subterráneas.

El trabajo de investigación que el INVOLCAN ha materializado durante la crisis sismo-volcánica de El Hierro representa el primer estudio intenso y extenso de emisión difusa de helio realizado en un sistema volcánico activo insular que ha sido escenario de una erupción volcánica en su flanco submarino relativamente cerca de su costa. Los resultados de este trabajo científico, publicado en la revista científica *Geology* muestran el comportamiento geoquímico de la emisión difusa de helio por el sistema volcánico insular de El Hierro durante la reciente reactivación magmática, y más concretamente en relación a la erupción submarina ocurrida al sur de La Restinga (Padrón *et al.*, 2013).

Antes de la erupción submarina, se registró un incremento muy significativo de la emisión difusa de helio en el sistema volcánico insular de El Hierro que pasó de 11 ± 1 a 30 ± 2 kilogramos diarios (Fig. 16), así como cambios muy significativos en la fracción magmática de estas emanaciones. Para mediados de septiembre de 2011, unas cuatro semanas antes del inicio de la erupción submarina al sur de La Restinga, la emisión difusa de helio había ya experimentado un importante incremento, alcanzando los 24 ± 1 kilogramos diarios, así como en la firma isotópica del helio disuelto en las

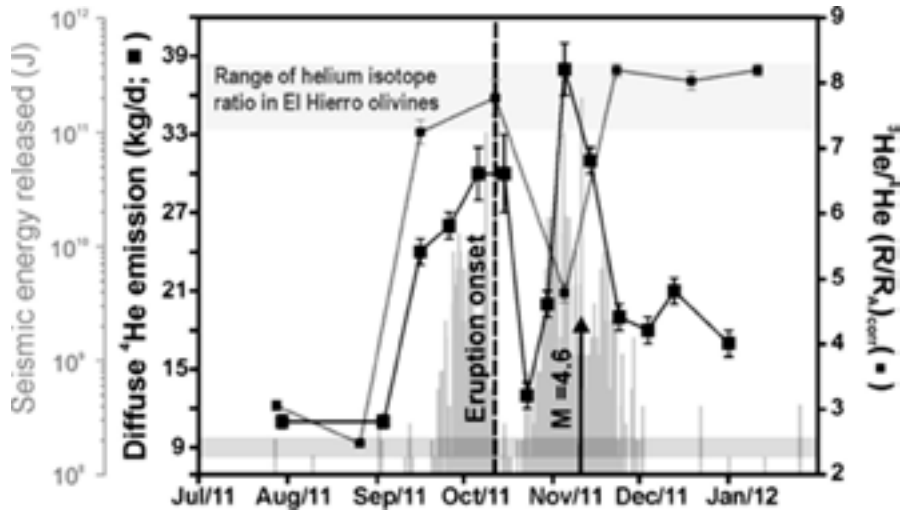


Fig. 16. Evolución temporal de la energía sísmica liberada (gris claro), emisión difusa de helio en toda la isla (cuadrados grandes) y la relación isotópica $^3\text{He}/^4\text{He}$ corregida en las aguas subterráneas del pozo San Simon (cuadrados pequeños). R_A indica la relación de $^3\text{He}/^4\text{He}$ atmosférica. Los errores en los valores de emisión difusiva de helio son 1 sigma de 50 realizaciones equiprobables por SGS. La banda gris en la parte superior representa el rango de las relaciones $^3\text{He}/^4\text{He}$ medidas en fenocristales de olivino en lavas de El Hierro (Day & Hilton, 2011), 07.02 a 08.02 R_A (modificado de Padrón *et al.*, 2013).

aguas subterráneas de El Hierro que pasaron de valores $2,48 \pm 0,07$ Ra a $7,3 \pm 0,2$ Ra (Ra = relación isotópica del helio en al aire atmosférico). Estas observaciones son consistentes con una importante presión de gases volcánicos-magmáticos en el subsuelo y su posterior fuga a través de la superficie de la isla previamente al proceso eruptivo.

Las altas presiones de los gases volcánicos en el magma rodeado por una corteza menos deformada y fracturada podría ser responsable de la alta tasa de emisión de helio-magmático durante el primer segmento de la actividad que culminó con la erupción submarina, mientras que el segundo segmento, y debido a una extensa deformación de la corteza y por consiguiente una mayor fracturación, se produjo una disminución de la presión del gas en el magma y por consiguiente un aporte mucho menor de helio de origen magmático, tal y como se observa en la figura 17.

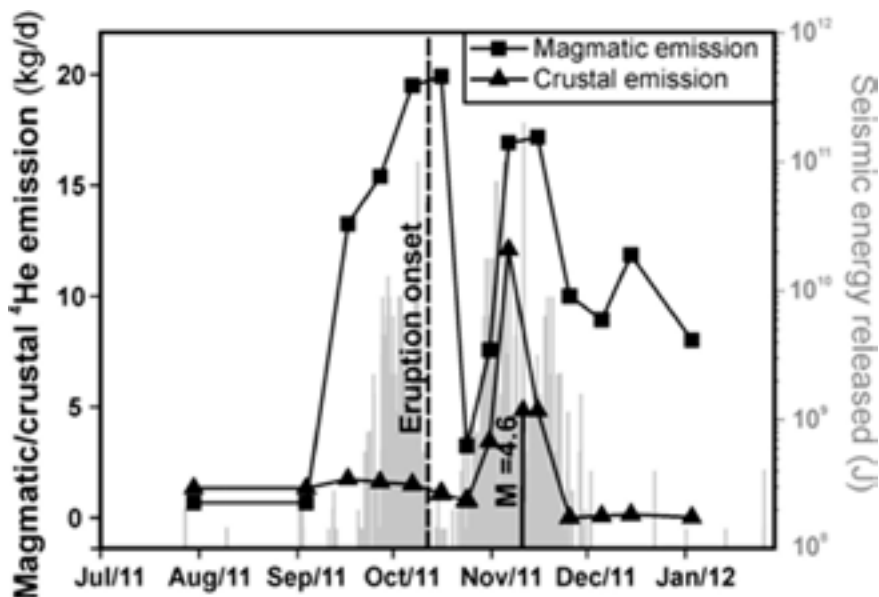


Fig. 17. Evolución temporal de las emisiones de helio magmáticas (cuadrados) y corticales (triángulos) entre julio de 2011 y febrero de 2012 y la energía sísmica liberada (barras de color gris claro, fuente IGN) (modificado de Padrón *et al.*, 2013).

La red permanente de estaciones geoquímicas que el ITER ya operaba en El Hierro logró detectar cambios significativos en la emisión difusa de CO₂ en la estación HIE01 antes de la ocurrencia de varios eventos sísmicos durante el año 2004. Estos cambios significativos en la emisión difusa de CO₂ se produjeron trece y nueve días antes la ocurrencia de dos eventos sísmicos de magnitud 2,3 y 1,7 el 23 de marzo y 15 de abril,

respectivamente, alcanzando un valor máximo de 51,1 y 46,2 g m⁻² d⁻¹, respectivamente, cinco y ocho días antes de los dos eventos sísmicos (Fig. 18).

La estación HIE01 fue trasladada posteriormente a otra localización cercana a la original (unos 400m) debido a problemas de conectividad. La red geoquímica instrumental fue ampliada más adelante a raíz de la crisis sismo-volcánica que comenzó en julio de 2011. Respecto al seguimiento en modo continuo del flujo difuso de CO₂ y H₂S en las estaciones HIE01 y HIE07, durante el período de reactivación volcánica, los valores de flujo difuso de CO₂ registrados en HIE01 oscilaron entre valores no detectables y 18,9 g m⁻² d⁻¹, con un promedio de 8,0 g m⁻² d⁻¹. Desde el comienzo del periodo de observación al 10 de agosto de 2012, la serie temporal de flujo difuso de CO₂ se caracteriza por una baja variabilidad de los valores de flujo de CO₂ que muestran un valor medio de 5,6 g m⁻² d⁻¹. Del 10 al 17 de agosto, se observa un fuerte aumento en el flujo difuso de CO₂, alcanzando un valor de 11 g m⁻² d⁻¹. Este pico en el flujo difuso de CO₂ se observó un día antes de la que se produjera la actividad sísmica más intensa en cuanto a número de eventos sísmicos durante el período de estudio, con 1863 eventos sísmicos entre el 18 de agosto y 23 de agosto de 2011.

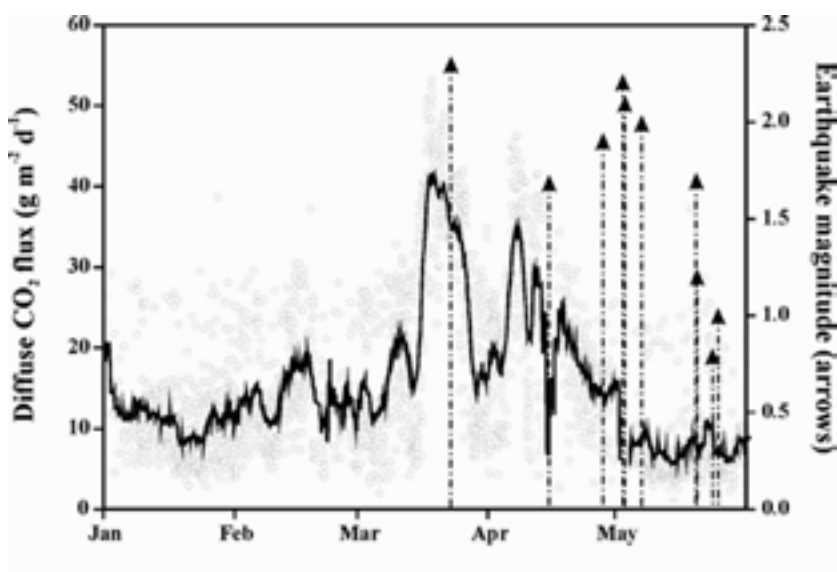


Fig. 18. Evolución temporal del flujo difuso de CO₂ en la estación geoquímica automática HIE01 entre enero y mayo de 2004 y sismos registrados durante este periodo (modificado Padrón *et al.*, 2007).

Más tarde, del 23 de agosto al 5 de octubre se observa un aumento continuo en la serie temporal flujo difuso de CO₂, alcanzando el máximo

valor medido durante este estudio, $18,9 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. El pico se produce una semana antes del inicio de la erupción submarina al sur de la isla de El Hierro. Respecto a la estación HIE07, se observa un fuerte aumento en la emisión difusa de H_2S entre la instalación el 7 de octubre de 2011 y el comienzo del proceso eruptivo, con valores que oscilan entre <2 y $42 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. El comportamiento de la serie temporal H_2S de la estación HIE07 los días que precedieron a la erupción volcánica mostró variaciones semidiurnas, con máximos relativos medidos 18:00-20:00 horas. Estos valores máximos relativos aumentaron de 11, el 8 de octubre a las 19:00 horas, a $42 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, el 11 de octubre a las 19:00 horas.

En la figura 19 se muestra la evolución temporal del flujo difuso de CO_2 en la estación automática HIE01. Esta estación permitió detectar señales geoquímicas precursoras de la erupción submarina de El Hierro, 40 días antes de que se produjera. El interés de los resultados de este trabajo científico publicado recientemente por la revista internacional *Geophysical Research Letters* se debe a la detección en tierra de señales geoquímicas precursoras de una erupción volcánica ocurrida en el mar, por la red geoquímica instrumental permanente que el ITER-INVOLCAN tiene operativas en El Hierro desde 2003 para contribuir a la mejora y optimización de la vigilancia volcánica de la isla (Pérez *et al.*, 2012).

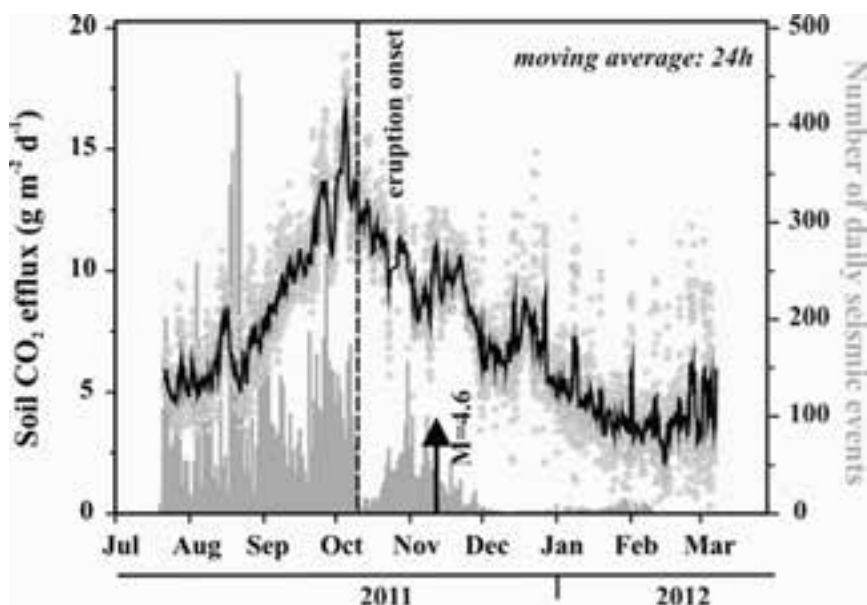


Fig. 19. Serie temporal del flujo difuso de CO_2 medido en la estación geoquímica instrumental HIE01. La media móvil corresponde a 24h. Datos sísmicos IGN (modificado de Pérez *et al.*, 2012).

La señal precursora detectada en esta estación consistió en el registro de un incremento paulatino desde una media móvil diaria de 5,4 gramos por metro cuadrado a finales de agosto de 2011, a 16,7 gramos de CO₂ por metro cuadrado el 5 de octubre de 2012, siete días antes de ocurrir la erupción submarina al sur de La Restinga y cinco días antes del registro de la señal de tremor volcánico.

Otra de las señales geoquímicas precursoras de la erupción submarina de El Hierro fue registrada por la estación geoquímica HIE07 situada en Tacorón a unos 4 kilómetros de distancia de la erupción submarina (Fig. 20). En este caso se registró una tendencia ascendente del flujo difuso de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en la estación geoquímica HIE07 durante los cuatro días antes de ocurrir la erupción submarina con registros de valores de media móvil diaria de 7,9 miligramos por metro cuadrado (registrado el 8 de octubre de 2011) a una media móvil diaria de 20,0 miligramos por metro cuadrado (datos del 11 de octubre).

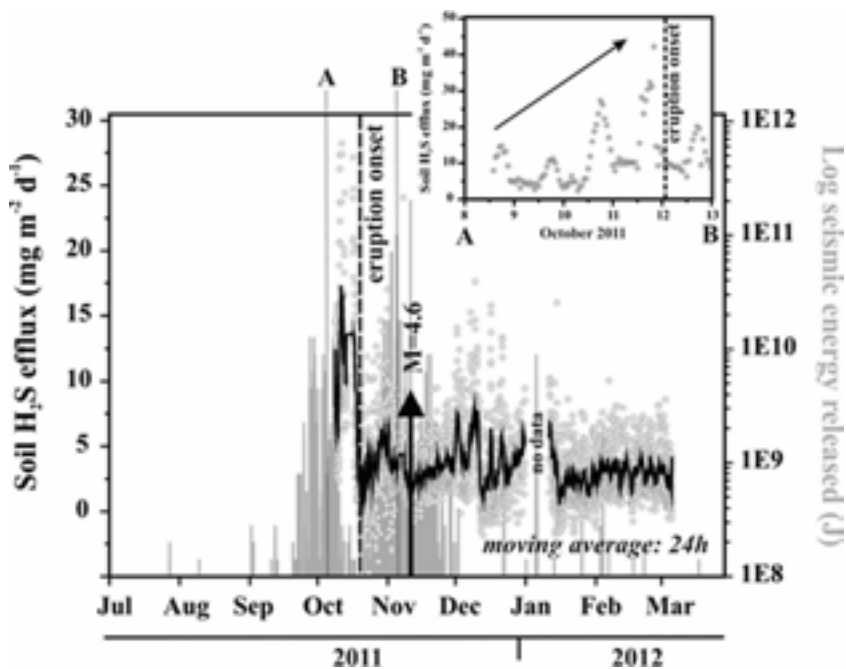


Fig. 20. Serie temporal del flujo difuso de H₂S medido en la estación geoquímica instrumental HIE07. La media móvil corresponde a 24h. Datos sísmicos IGN (modificado de Pérez *et al.*, 2012).

El análisis riguroso de los registros de emisión de gases y meteorológicos por la estación geoquímica HIE01 y la HIE07 mediante el filtrado de la señal utilizando un Análisis de Regresión Múltiple (ARM)

confirman que esta tendencia ascendente del flujo difuso de CO₂, durante más de cuarenta días antes de la erupción, así como la señal o pico de flujo difuso de H₂S previo al comienzo de la erupción, no estuvieron controlados por fluctuaciones de variables meteorológicas y sí por los cambios internos ocurridos en el sistema volcánico insular de El Hierro durante su fase pre-eruptiva (Fig. 21).

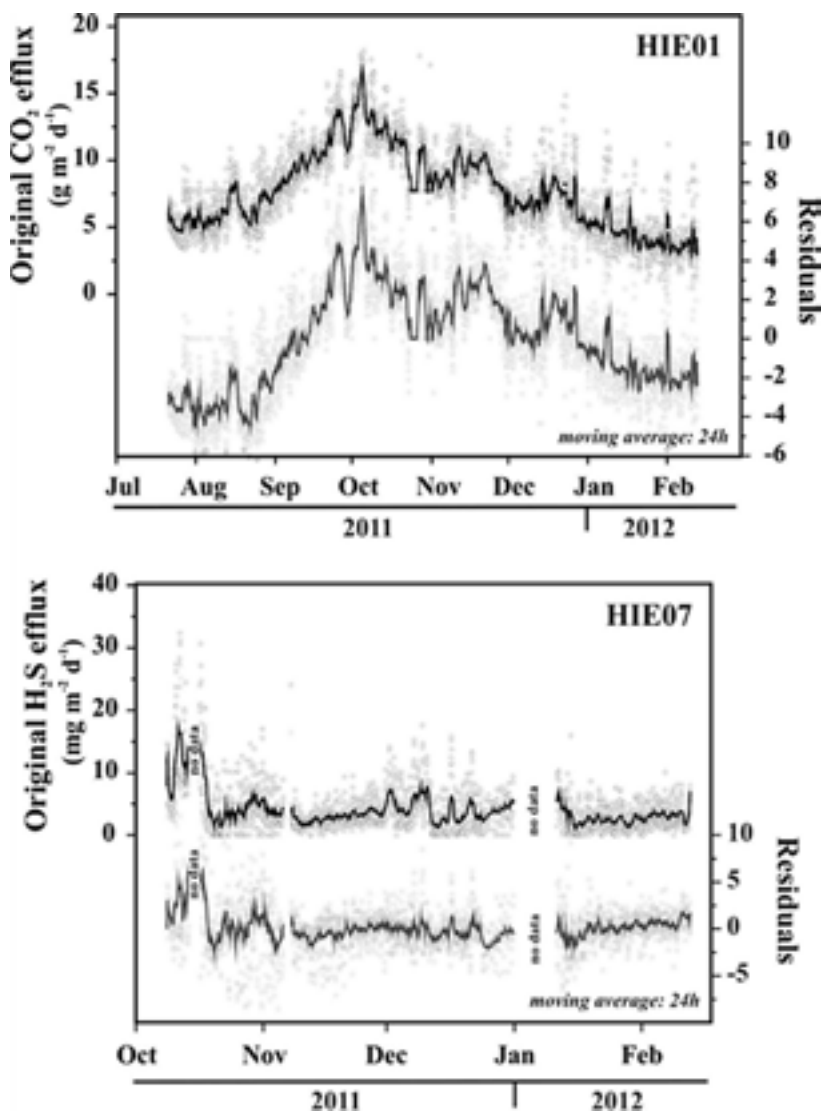


Fig. 21. Resultados del Análisis de Regresión Múltiple (ARM) aplicado a las series temporales del flujo difuso de CO₂ medido en HIE01 y del flujo difuso de H₂S medido en HIE07. La media móvil corresponde a 24h (modificado de Pérez *et al.*, 2012).

A diferencia de las señales geofísicas precursoras más evidentes de la reciente erupción submarina de El Hierro (la señal de tremor volcánico) registradas dos días antes del inicio de la erupción y cinco días antes de la aparición de material volcánico flotando en el mar, las señales geoquímicas precursoras de la erupción submarina de El Hierro llegaron a registrarse durante cuarenta días antes de ocurrir la misma, alcanzando su valor máximo siete días antes de la erupción submarina y quince días antes de la aparición de las “restingolitas”.

Respecto al seguimiento de la actividad de los gases radón y torón, entre el 15 de agosto y el 4 de octubre de 2011, la estación geoquímica HIE02 (Fig. 22) registró un incremento muy significativo de la actividad del gas radón (^{222}Rn) en el ambiente superficial, alcanzando un valor máximo de 16.460 Bq/m^3 ; muy superior al valor medio registrado por esta estación entre el 1 de julio y el 15 de agosto de 2011 (121 Bq/m^3). En el caso de la estación geoquímica HIE03 (Fig. 23) el valor máximo de actividad del gas radón (^{222}Rn) se registró el 3 de octubre de 2011 alcanzando los 1595 Bq/m^3 . Ambos picos de actividad de gas radón (^{222}Rn) se observaron ocho y nueve días antes del comienzo de la erupción submarina al sur de La Restinga.

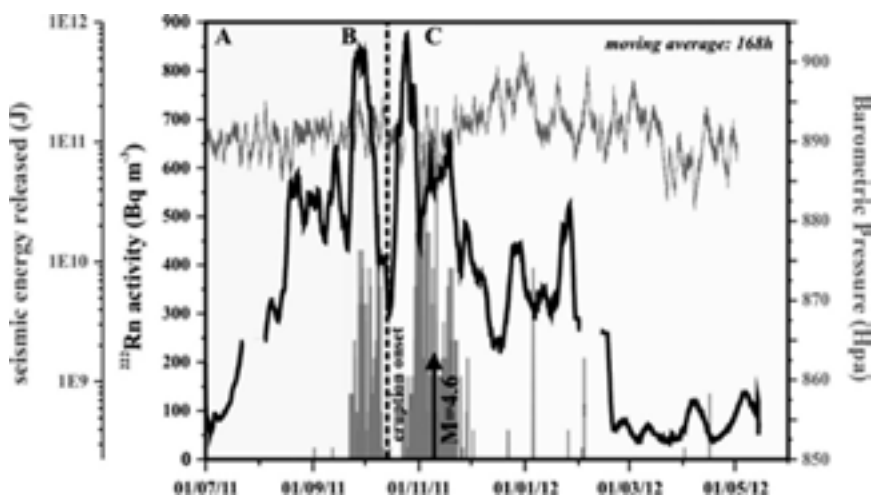


Fig. 22. Serie temporal de la actividad del gas radón medido en la estación geoquímica instrumental HIE02. La media móvil corresponde a 168h. Datos sísmicos IGN (modificado de Padilla *et al.*, 2013).

Según los autores de este trabajo publicado en *GCube*, el análisis estadístico de las variaciones temporales observadas en la actividad de gas radón (^{222}Rn) no son debidas a fluctuaciones de variables meteorológicas, y por el contrario, se encuentran estrechamente relacionadas con los cambios

observados en la energía sísmica liberada durante este periodo del proceso de reactivación magmática previo a la erupción submarina al sur de La Restinga (Padilla *et al.*, 2013).

Los procesos de fracturación de las rocas volcánicas como consecuencia de la actividad sísmica y la presión de los gases volcánicos en profundidad parecen haber sido los principales mecanismos responsables de estas emanaciones difusas de radón (^{222}Rn) anómalas registradas antes de la erupción submarina de El Hierro en el 2011. Por lo tanto, los resultados de este trabajo contribuyen a enfatizar el uso potencial de estas emanaciones difusas de gases nobles como el radón (^{222}Rn) para la vigilancia volcánica y la predicción de erupciones volcánicas.

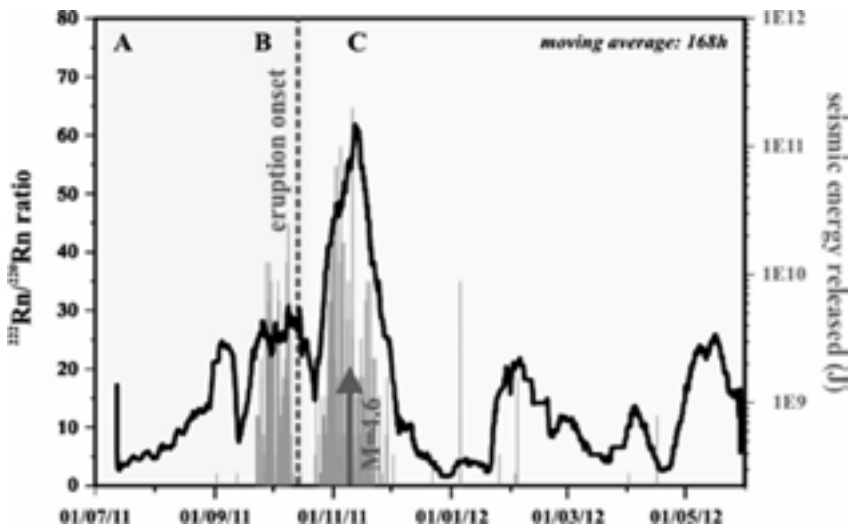


Fig. 23. Serie temporal de la actividad del gas radón medido en la estación geoquímica instrumental HIE03. La media móvil corresponde a 168h. Datos sísmicos IGN (modificado de Padilla *et al.*, 2013).

Conclusiones

Desde el punto de vista científico la reciente crisis sismo-volcánica de El Hierro ha supuesto una gran oportunidad para avanzar en el conocimiento sobre procesos de reactivación magmática y eruptivos en islas volcánicas. El programa geoquímico que el INVOLCAN ha materializado durante la reciente crisis sismo-volcánica de la isla de EL Hierro ha demostrado la importancia una vez más de vigilar los gases volcánicos, fuerza motriz de las erupciones volcánicas. Sin embargo, desde el punto de vista político-científico ha sido una oportunidad perdida para materializar las decisiones unánimes de las Cámaras Legislativas de nuestro país que

desde el año 2005 están instando a la Administración General del Estado, de la Comunidad Autónoma de Canarias y de los Cabildos Insulares a que todos los recursos humanos y técnicos destinados a la gestión científica del riesgo volcánico se agrupen bajo un mismo paraguas con la finalidad de maximizar los recursos públicos, y este paraguas es el INVOLCAN o Centro Nacional de Volcanología, dado que el riesgo volcánico se delimita sólo a Canarias.

Finalmente, el Instituto Geográfico Nacional (IGN), que desde que en 2005, en medio de la crisis sismo-volcánica de Tenerife, logró las competencias en vigilancia y alertas volcánicas en España por la vía de un Real Decreto de reestructuración del Ministerio de Fomento y no mediante uno específico para el riesgo volcánico, ha intentando limitar la actividad científica del grupo del ITER y ha bloqueado sistemáticamente la creación de un centro nacional de volcanología, ante la inacción del Ejecutivo Canario. La crisis sismo-volcánica de El Hierro pilló al IGN con una red sísmica de mínimos y sin estaciones geoquímicas ni geodésicas en la isla, amén de un personal, desde los cargos de responsabilidad, hasta los más bajos, sin experiencia en vigilancia volcánica.

Agradecimientos

En primer lugar agradecer al equipo humano del INVOLCAN coordinado por mi compañero y amigo Nemesio Pérez por su esfuerzo, dedicación y buen hacer durante la reciente crisis sismo-volcánica de El Hierro. Este trabajo de investigación fue financiado por el proyecto MAKAVOL del MAC 2007-2013 Programa de Cooperación Transnacional de la Unión Europea; por el proyecto HELIO ProID20100158 de la Agencia Canaria de la Sociedad de Investigación, Innovación e Información, Gobierno de Canarias; por el proyecto ALERTA y ALERTA II (financiado por INTERREG IIIB Azores-Canarias-Madeira), Dirección General de Universidades e Investigación del Gobierno de Canarias en el marco del proyecto PI2001/025, y por el Cabildo Insular de Tenerife (España). También doy especialmente las gracias a Antonio Álvarez Díaz por proporcionarnos apoyo logístico y por su amistad, así como al Cabildo de El Hierro y el personal de la Seguridad y el Centro de Coordinación de Emergencias de la isla de El Hierro (CECOI). Finalmente y no por ello menos importante quiero agradecer en nombre de INVOLCAN a Julia Sisi y Dan Casado, por su tremenda hospitalidad, a Jesús Quintero y Magaly, del Ayuntamiento de El Pinar, a José Luis Peraza y Lola que siempre nos han acogido en su casa, a Francis de la Ferretería Morales en Frontera, a los dueños del Bar Restaurante La Salud por su inestimable ayuda y a los Apartamentos Casa Salmor, a quienes estamos infinitamente agradecidos. Finalmente, quiero reseñar especialmente nuestro agradecimiento a la colaboración, dedicación y buen hacer de los miembros de la Unidad de Helicópteros de la Guardia Civil de la Zona de Canarias, y de forma muy especial a Antonio Márquez, gran profesional y mejor amigo, quienes desde el General Jefe de la Zona hasta el último de sus pilotos o mecánicos, han apostado por este proyecto científico desde el primer momento, poniendo de su parte mucho más que

lo que el deber les exige, demostrado que la profesionalidad que distingue a todos los miembros de la Benemérita está más que justificada.

Referencias

- ALLARD, P. (1992). Global emissions of helium-3 by subaerial volcanism. *Geophys. Res. Lett.* 19 (14): 1479-1481.
- ALLARD, P., J. CARBONELLE, D. DAJLEVIC, J. LE BRONEC, P. MOREL, M.C. ROBE, J.M. MAURENAS, R. FAIVRE-PIERRET, D. MARTIN, J.C. SABROUX & P. ZETWOOG (1991). Eruptive and diffuse emissions of CO₂ from Mount Etna. *Nature* 351: 387-391.
- ALLARD, P., J. CARBONELLE, N. MÉTRICH, H. LOYER & P. ZETWOOG (1994). Sulphur output and magma degassing budget of Stromboli volcano. *Nature* 368: 326-330.
- BARRANCOS J., J.I. ROSELLÓ, D. CALVO, E. PADRÓN, G. MELIÁN, P.A. HERNÁNDEZ, N.M. PÉREZ, M.M. MILLÁN & B. GALLE (2008). SO₂ emission from seven active volcanoes measured simultaneously by COSPEC and mini-DOAS. *Pure and Applied Geophysics*, Special Issue "Terrestrial Fluids, Earthquakes and Volcanoes: The Hiroshi Wakita vol. III" 165: 115-133.
- BLANCO-MONTENEGRO, I., I. NICOLOSI, A. PIGNATELLI *et al.* (2008). Magnetic imaging of the feeding system of oceanic volcanic islands: El Hierro (Canary Islands). *Geophysical Journal International* 173: 339-350.
- BROMBACH, T., J.C. HUNZIKER, G. CHIODINI, C. CARDELLINI & L. MARINI (2001). Soil diffuse degassing and thermal energy fluxes from the southern Lakki plain, Nisyros (Greece). *Geophys Res Lett.* 28: 69-72.
- BUTT, C.R.M. & M.J. GOLE (1985). Helium in soil and overburden gas as an exploration pathfinder – an assessment. *J. Geochem. Explor.* 24: 141-173.
- CALDAS, F. & V. PÉREZ GARCÍA (1973). Las aguas subterráneas de la isla del Hierro. *Anales de Edafología y Agrobiología* 32(1-2): 75-87.
- CARAPEZZA, M.L., S. INGUAGGIATO, L. BRUSCA & M. LONGO (2004). Geochemical precursors of the activity of an open-conduit volcano: The Stromboli 2002–2003 eruptive events. *Geophys. Res. Lett.* 31, L07620, doi:10.1029/2004GL019614.
- CARRACEDO, J.C., E.R. BADIOLA, H. GUILLOU, J. DE LA NUEZ & F.J. PÉREZ-TORRADO (2001). Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canary Islands. *Estud. Geol.* 57: 175-273.
- CARTAGENA, R., R. OLMOS, D.L. LÓPEZ, T. SORIANO, F. BARAHONA, P.A. HERNÁNDEZ & N.M. PÉREZ (2004). Diffuse soil degassing of carbon dioxide, radon, and mercury at San Miguel volcano, El Salvador. In: Rose, W.I., J.J. Bommer, D.L. López, M.J. Carr & J.J. Major (eds), *Natural Hazards in El Salvador. Geol. Soc. Am.*, Special Paper. 375: 203-212.
- CHIODINI, G. & F. FRONDINI (2001). Carbon dioxide degassing from the Albani Hills volcanic region, Central Italy. *Chem. Geol.* 177: 67-83.
- CHIODINI, G., A. BALDINI, F. BARBERI, M.L. CARAPEZZA, C. CARDELLINI, F. FRONDINI, D. GRANIERI & M. RANALDI (2007). Carbon dioxide degassing at

- Latera caldera (Italy): Evidence of geothermal reservoir and evaluation of its potential energy. *J. Geophys. Res.* 112, B12204, doi:10.1029/2006JB004896.
- CHIODINI, G., R. CIONI, M. GUIDI, B. RACO & L. MARINI (1998). Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Appl. Geochem.* 13: 543-552.
- CHIODINI, G., F. FRONDINI & B. RACO (1996). Diffuse emission of CO₂ from the Fossa crater. Vulcano Island (Italy). *Bull. Volcanol.* 58: 41-50.
- CHIODINI, G., F. FRONDINI, C. CARDELLINI, D. GRANIERI, L. MARINI & G. VENTURA (2001). CO₂ degassing and energy release at Solfatara volcano, Campi Flegrei, Italy. *J. Geophys. Res.* 106 (B8): 16213-16221.
- CRAIG, H. & J.E. LUPTON (1981). Helium-3 and mantle volatiles in the ocean and the oceanic crust. In: C. Emiliani (ed.), *The Sea*, Vol. 7, *The Oceanic Lithosphere*, 391-428, John Wiley, New York.
- D'ALESSANDRO, W. & F. PARELLO (1997). Soil gas prospection of He, ²²²Rn and CO₂: Vulcano Porto area, Aeolian Islands, Italy. *Appl. Geochem.*, 12, 213-224.
- DE LA NUEZ, J. (2012). La erupción submarina de La Restinga (El Hierro) *Boletín de la Real Sociedad Económica de Amigos del País de Tenerife* 1: 47-76.
- FARLEY, K.A. & E. NERODA (1998). Noble gases in the Earth's mantle. *Ann. Rev. Earth Plan. Sci.* 26: 189-218.
- FISCHER, T., K. ROGGENSACK & P. KYLE (2002). Open and almost shut case for explosive eruptions: vent processes determined by SO₂ emission rates at Karymsky volcano, Kamchatka. *Geology* 30(12): 1059-1062.
- FISCHER, T.P., M.M. MORRISEY, M.L. CLAVACHE, D. GOMEZ, R. TORRES, J. STIX & S.N. WILLIAMS (1994). Correlations between SO₂ flux and long-period seismicity at Galeras volcano. *Nature* 368: 135-137.
- FRIDRIKSSON, T., B.R. KRISTJÁNSSON, H. ÁRMANNSSON, E. MARGRÉTAR-DÓTTIR, S. ÓLAFSDÓTTIR & G. CHIODINI (2006). CO₂ emissions and heat flow through soil, fumaroles, and steam heated mud pools at the Reykjanes geothermal area, SW Iceland. *Appl. Geochem.* 21: 1551-1569.
- FRONDINI, F., G. CHIODINI, S. CALIRO, C. CARDELINI, D. GRANIERI & G. VENTURA (2004). Diffuse CO₂ degassing at Vesuvio, Italy. *Bull. Volcanol.* 66: 642-651.
- GALINDO, I., G. MELIÁN, J.M.L. SALAZAR, P.A. HERNÁNDEZ, N.M. PÉREZ, C. RAMÍREZ, M. FERNÁNDEZ, G.E. ALVARADO & H. SUMINO (2004). Emisión difusa de dióxido de carbono en el volcán Irazú, Costa Rica. *Rev. Geol. Am. Cent.* 30: 157-165.
- GALLE, B. (2003). A miniaturised ultraviolet spectrometer for remote sensing of SO₂ fluxes: a new tool for volcano surveillance. *J. Volcan. Geotherm. Res.* 119(1-4): 241-254.
- GLUEKAUF, E. (1946). A microanalysis of helium and neon contents of air. *Proc. Roy. Soc. London*, A-185: 98-119.
- GRANIERI, D., M.L. CARAPEZZA, G. CHIODINI, R. AVINO, S. CALIRO, M. RANALDI, T. RICCI & L. TARCHINI (2006). Correlated increase in CO₂ fumarolic content and diffuse emission from La Fossa crater (Vulcano, Italy): Evidence of volcanic unrest or increasing gas release from a stationary deep magma body? *J. Geophys. Res. Lett.* 33: L13316.

- GUILLOU, H., J.C. CARRACEDO, F. PÉREZ-TORRADO & E. RODRÍGUEZ BADIOLA (1996). K-Ar ages and magnetic stratigraphy of a hotspot-induced, fast grown oceanic island: El Hierro, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 73: 141-155.
- HERNÁNDEZ, P.A., N.M. PÉREZ, J.M.L. SALAZAR, M. SATO, K. NOTSU & H. WAKITA (2000b). Soil gas CO₂, CH₄, and H₂ distribution in and around Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 103: 425-438.
- HERNÁNDEZ, P.A., K. NOTSU, H. OKADA, T. MORI, M. SATO, F. BARAHONA & N.M. PÉREZ (2006). Diffuse emission of CO₂ from Showa-Shinzan, Hokkaido, Japan: a sign of volcanic dome degassing. PAGEOPH Topical Volume "Terrestrial fluids, earthquakes and volcanoes: The Hiroshi Wakita Volume I", 163: 869-882.
- HERNÁNDEZ, P.A., G. PADILLA, E. PADRÓN, N.M. PÉREZ, D. CALVO, D. NOLASCO, G. MELIÁN, J. BARRANCOS, S. DIONIS, F. RODRÍGUEZ & H. SUMINO (2012a). Analysis of long- and short-term temporal variations of the diffuse CO₂ emission from Timanfaya volcano, Lanzarote, Canary Islands. *App. Geochem.* 27(12): 2486-2499.
- HERNÁNDEZ, P.A., N.M. PÉREZ, T. FRIDRIKSSON, J. EGBERT, E. ILYINS-KAYA, A. THÁRHALLSSON, G. ÍVARSSON, G. GÍSLASON, I. GUNNARS-SON, B. JÓNSSON, E. PADRÓN, G. MELIÁN, T. MORI & K. NOTSU (2012b). Diffuse volcanic degassing and thermal energy release from Hengill volcanic system, Iceland. *Bull. Volcanol.* 74(10): 2435-2448.
- HERNÁNDEZ, P.A., G. NATALE, F. TSUNOMORI, K. SUGIYAMA, T. ITO, K. NOTSU, & H. OKADA (2000a). Preliminary results of diffuse emissions of CO₂ and fluid pressure gradient measurements at Tarumae volcano, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.* 27: 121-125.
- HERNÁNDEZ, P.A., G. NATALE, F. TSUNOMORI, K. SUGIYAMA, T. ITO, K. NOTSU, H. OKADA & N.M. PÉREZ (2001a). Preliminary results of diffuse emissions of CO₂ and soil gas pressure gradient measurements at Tarumae volcano, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.* 46: 121-125.
- HERNÁNDEZ, P.A., K. NOTSU, J.M. SALAZAR, T. MORI, G. NATALE, H. OKADA, G. VIRGILI, Y. SHIMOIKE, M. SATO, & N.M. PÉREZ (2001b). Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. *Science* 292: 83-86.
- HERNÁNDEZ, P.A., K. NOTSU, M. TSURUMI, T. MORI, M. OHNO, Y. SHIMOIKE, J. SALAZAR & N.M. PÉREZ (2003). Carbon dioxide emissions from soils at Hakkoda, north Japan. *J. Geophys. Res.* 108(B4): 2210.
- HERNÁNDEZ, P.A., N.M. PÉREZ, J.M. SALAZAR, S. NAKAI, K. NOTSU & H. WAKITA (1998). Diffuse emissions of carbon dioxide, methane, and helium-3 from Teide volcano, Tenerife, Canary Islands. *Geophys. Res. Lett.* 25: 3311-3314.
- HERNÁNDEZ, P.A., N.M. PÉREZ, J.M.L. SALAZAR, M. REIMER, K. NOTSU & H. WAKITA (2004). Radon and helium in soil gases at Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 131: 59-76.
- HERNÁNDEZ, P.A., J.M. SALAZAR, Y. SHIMOIKE, T. MORI, K. NOTSU & N.M. PÉREZ (2001c). Diffuse emission of CO₂ from Miyakejima volcano, Japan. *Chem. Geol.* 177: 175-185.

- HERNÁNDEZ PACHECO, A. & M.C. VALS (1982). The historical eruptions of La Palma Island (Canarias), *Arquipelago, Rev. Univ. Azores. Ser. C. Nat.*, 3: 83-94.
- HILTON, D.R., K. HAMMERSCHMIDT, S. TEUFEL & H. FRIEDRICHSEN (1993). Helium isotope characteristics of Andean geothermal fluids and lavas. *Earth Planet. Sci. Lett.* 120: 265-282.
- HILTON, D.R., C.G. MACPHERSON & T.R. ELLIOTT (2000). Helium isotope ratios in mafic phenocrysts and geothermal fluids from La Palma, the Canary Islands (Spain): Implications for HIMU mantle sources. *Geochim. Cosmochim. Acta* 64(12): 2119-2132.
- HOFF, R.M. & M.M. MILLAN (1981). Remote SO₂ measurements using COSPEC. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 31: 381-384.
- HOLLAND, P.W. & D.E. EMERSON (1990). The global helium-4 content of near surface atmospheric air. In: *Geochemistry of gaseous elements and compounds*, Theophrastus Pub. S.A., Athens.
- IBÁÑEZ, J.M., S. DE ANGELIS, A. DÍAZ-MORENO, P. HERNÁNDEZ, G. ALGUACIL, A. POSADAS & N. PÉREZ (2012). Insights into the 2011–2012 submarine eruption off the coast of El Hierro (Canary Islands, Spain) from statistical analyses of earthquake activity. *Geophys. J. Int.* 191: 659–670.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España). (1985). *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España*. 1985 ed.
- JOHANSSON, M., B. GALLE, Y. ZHANG, C. RIVERA, D. CHEN & K. WYSER (2009). The dual-beam mini-DOAS technique-measurements of volcanic gas emission, plume height and plume speed with a single instrument. *Bull. Volcanol.* 71(7): 747-751.
- JONES, V.T. & R.J. DROZD (1983). Prediction of oil or gas potential by near-surface geochemistry. *AAPG Bull.* 67(6): 932-952.
- KANEOKA, I. & N. TAKAOKA (1980). Rare gas isotopes in Hawaiian ultramafic nodules and volcanic rocks: constrains on genetic relationship. *Science* 208: 1366-1368.
- KAZAHAYA, K., H. SHINOHARA, K. UTO, M. ODAI, Y. NAKAHORI, H. MORI, H. IINO, M. MIYASHITA & J. HIRABAYASHI (2004). Gigantic SO₂ emission from Miyakejima volcano, Japan, caused by caldera collapse. *Geology* 32: 425-428.
- KLUSMAN, R.W. (1993). *Soil gas and related methods for natural resource exploration*. Wiley, New York, 483 pp.
- KURTZ, M.D., W.J. JENKINS & S.R. HART (1982). Helium isotopic systematic of oceanic islands and mantle heterogeneity. *Nature* 297: 43-47.
- LÓPEZ, C. *et al.* (2012). Monitoring the unrest of El Hierro (Canary Islands) before the onset of the 2011 submarine eruption. *Geophys. Res. Lett.* 39: L13303, doi:10.1029/2012GL051846.
- LÓPEZ, D.L., L. RANSOM, N.M. PÉREZ, P.A. HERNÁNDEZ & J. MONTE-RROSA (2004). Dynamics of diffuse degassing at Ilopando Caldera, El Salvador. In: Rose, W.I., J.J. Bommer, D.L. López, M.J. Carr & J.J. Major (eds), *Natural Hazards in El Salvador. Geol. Soc. Am., Special Paper* 375: 191-202.
- MARRERO, R., C. LÓPEZ, L. DINA, P.A. HERNÁNDEZ & N.M. PÉREZ (2008). Carbon dioxide discharged through the Las Cañadas aquifer, Tenerife, Canary Islands.

- In "Terrestrial fluids, earthquakes and volcanoes: The Hiroshi Wakita Volume II", *Pure Appl. Geophys.* (PAGEOPH) 165: 147-172.
- MARTÍ, J., V. PINEL, C. LÓPEZ, A. GEYER, R. ABELLA, M. TÁRRAGA, M.J. BLANCO, A. CASTRO & C. RODRÍGUEZ (2013). Causes and mechanisms of the 2011-2012 El Hierro (Canary Islands) submarine eruption. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, doi:10.1002/jgrb.50087.
- MARTÍNEZ-ZUBIETA, A. (2001). Desgasificación difusa de dióxido de carbono, radón y metano en El Hierro, Islas Canarias. Master Thesis. Universidad de La Laguna, pp. 82.
- MELIÁN, G., F. TASSI, N.M. PÉREZ, P.A. HERNÁNDEZ, F. SORTINO, O. VASELLI, E. PADRÓN, D. NOLASCO, J. BARRANCOS, G. PADILLA, F. RODRÍGUEZ, S. DIONIS, D. CALVO, K. NOTSU & H. SUMINO (2012). A magmatic source for fumaroles and diffuse degassing from the summit crater of Teide volcano (Tenerife, Canary Islands): geochemical evidence for the 2004-05 seismic-volcanic crisis. *Bull. Volcanol.* 74(6), 1465-1483.
- MELIÁN, G. (2008). Emisión difusa de dióxido de carbono y otros volátiles en el volcán Poás, Costa Rica, América Central. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna, 442 págs.
- MELIÁN, G., I. GALINDO, N.M. PÉREZ, P.A. HERNÁNDEZ, J.M.L. SALAZAR, M. FERNÁNDEZ, C. RAMÍREZ, R. MORA & G. ALVARADO (2004). Emisión difusa de hidrógeno en el volcán Poás, Costa Rica. *Rev. Geol. Am. Cent.* 30: 167-177.
- MELIÁN, G., R. MARRERO, D. NOLASCO, J. BARRANCOS, D. CALVO, N.M. PÉREZ, I. GALINDO, P.A. HERNÁNDEZ & W. STRAUCH (2006). Diffuse CO₂ emission dynamics and relation to the eruptive cycle at Cerro Negro volcano, Nicaragua, Central America. 300th Anniversary Volcano International Conference Commemorating the 1706 Arenas Negras Eruption, Garachico, Tenerife, Canary Islands, Spain. Poster.
- MORI T., K. NOTSU, P.A. HERNÁNDEZ, J.M.L. SALAZAR, N.M. PÉREZ, G. VIRGILI, Y. SHIMOIKE & H. OKADA (2002). Continuous monitoring of soil efflux of volcanic CO₂ from the summit region of Usu volcano. *Japan. Bull. Volcanol. Soc. Jpn.* 47: 339-345.
- MORI, T., P.A. HERNÁNDEZ, J.M. SALAZAR, N.M. PÉREZ & K. NOTSU (2001). An in-situ method for measuring CO₂ flux from hydrothermal fumaroles. *Chem. Geol.* 177: 85-99.
- NAGAO, K., N. TAKAOKA & O. MATSUBAYASHI (1981). Rare gas isotopic composition in natural gases of Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.* 53: 175-188.
- NAVARRO, J.M. & C. SOLER (1995). *El agua en EL Hierro*. Cabildo Insular de EL Hierro, 97 pp.
- NOTSU, K., T. MORI, S. CHANCHAH DO VALE, H. KAGI & T. ITO (2006). Monitoring quiescent volcanoes by diffuse CO₂ degassing: case study of Mt. Fuji, Japan. *Pure Appl. Geophys.* 163: 825-835.
- NOTSU, K., K. SUGIYAMA, M. HOSOE, A. UEMURA, Y. SHIMOIKE, F. TSUNOMORI, H. SUMINO, J. YAMAMOTO, T. MORI & P.A. HERNÁNDEZ (2005). Diffuse CO₂ efflux from Iwojima volcano, Izu-Ogasawara arc, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 139: 147-161.

- OLMOS, R., J. BARRANCOS, C. RIVERA, F. BARAHONA, D.L. LÓPEZ, B. HENRÍQUEZ, A. HERNÁNDEZ *et al.* (2007). Anomalous Emissions of SO₂ During the Recent Eruption of Santa Ana Volcano, El Salvador, Central America. *Pure and App. Geophys.* 164(12): 2489-2506.
- ORTIZ, R., M. BERROCOSO, S. DE LA CRUZ-REYNA, J.M. MARRERO & A. GARCÍA (2012). Seismic evidence of a second submarine eruption in the north of El Hierro Island. EGU2012-1807.
- OZIMA, M. & F.A. PODOSEK (2002). *Nobel Gas Geochemistry*, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 286 pp.
- OZIMA, M. & S. ZASHU (1983). Noble gases in submarine pillow volcanic glasses. *Earth Planet. Sci. Lett.* 62: 24-40.
- PADILLA, G., P.A. HERNÁNDEZ, E. PADRÓN, J. BARRANCOS, N.M. PÉREZ, G. MELIÁN, D. NOLASCO, S. DIONIS, F. RODRÍGUEZ, D. CALVO & I. HERNÁNDEZ (2013). Soil gas radon emissions and volcanic activity at El Hierro (Canary Islands): The 2011-2012 submarine eruption. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, doi: 10.1029/2012GC004375 (in press).
- PADRÓN E., P.A. HERNÁNDEZ, T. TOULKERIDIS, N.M. PÉREZ, R. MARRERO, G. MELIÁN, G. VIRGILI & K. NOTSU (2008b). Diffuse CO₂ emission rate from Pululahua and the lake-filled Cuicocha calderas, Ecuador. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* Special Issue, Ecuadorian Andes Volcanoes. 176: 163-169.
- PADRÓN E., G. MELIÁN, R. MARRERO, D. NOLASCO, J. BARRANCOS, G. PADILLA, P.A. HERNÁNDEZ & N.M. PÉREZ (2008a). Changes on diffuse CO₂ emission and relation to seismic activity in and around El Hierro, Canary Islands. *Pure and Applied Geophysics*, Special Issue "Terrestrial Fluids, Earthquakes and Volcanoes: The Hiroshi Wakita vol. III" 165: 95-114.
- PADRÓN E., N.M. PÉREZ, P.A. HERNÁNDEZ, H. SUMINO, G. MELIÁN, J. BARRANCOS, D. NOLASCO & G. PADILLA (2012a). Helium emission at Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Chem. Geol.* 312-313: 138-147.
- PADRÓN, E., N.M. PÉREZ, P.A. HERNÁNDEZ, H. SUMINO, G. MELIÁN, J. BARRANCOS, D. NOLASCO, G. PADILLA, S. DIONIS, F. RODRÍGUEZ, I. HERNÁNDEZ, D. CALVO, M.D. PERAZA & K. NAGAO (2013). Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest. *Geology* 41(5): 539-542. doi:10.1130/G34027.1.
- PADRÓN, E., P.A. HERNÁNDEZ, N.M. PÉREZ, T. TOULKERIDIS, G. MELIÁN, J. BARRANCOS, G. VIRGILI, H. SUMINO & K. NOTSU (2012b). Fumarole/plume and diffuse CO₂ emission from Sierra Negra caldera, Galapagos archipelago. *Bulletin of Volcanology* 74(6): 1509-1519.
- PADRÓN, E., D.L. LÓPEZ, M.I. MAGAÑA, R. MARRERO & N.M. PÉREZ (2003). Diffuse degassing and relation to structural flow path at Ahuachapán geothermal field, El Salvador. *Geotherm. Res. Council Trans.* 27: 325-330.
- PARKINSON, K.J. (1981). An improved method for measuring soil respiration in the field. *J. Appl. Ecol.* 18: 221-228.
- Pérez N.M. & P.A. HERNÁNDEZ (2007). Earthquake forecasting research in active volcanic areas by means of diffuse CO₂ emission studies. In: Sen, P. & N.K. Das (eds.), *Geochemical Precursors for Earthquakes*. pp: 94-103. Macmillan Advanced Research Series.

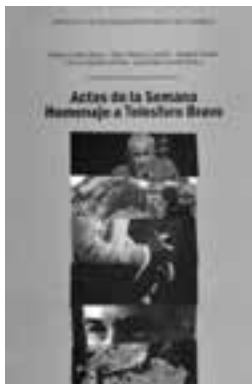
- PÉREZ N.M., P.A. HERNÁNDEZ, E. PADRÓN, R. CARTAGENA, R. OLMOS, F. BARAHONA, G. MELIÁN, P. SALAZAR & D.L. LÓPEZ (2006). Anomalous diffuse CO₂ emission prior the January 2004 short-term unrest at San Miguel volcano, El Salvador, Central America. PAGEOPH Topical Volume "Terrestrial fluids, earthquakes and volcanoes: The Hiroshi Wakita Volume I", 163: 883-896.
- PÉREZ, N.M., G.D. PADILLA, E. PADRÓN, P.A. HERNÁNDEZ, G.V. MELIÁN, J. BARRANCOS, S. DIONIS, D. NOLASCO, F. RODRÍGUEZ, D. CALVO & Í. HERNÁNDEZ (2012). Precursory diffuse CO₂ and H₂S emission signatures of the 2011–2012 El Hierro submarine eruption. *Canary Islands, Geophys. Res. Lett.* 39, L16311, doi:10.1029/2012GL052410.
- PÉREZ, N.M., P.A. HERNÁNDEZ, G. MELIÁN, D. NOLASCO, J. BARRANCOS, G. PADILLA, D. CALVO, F. RODRÍGUEZ, S. DIONIS & G. CHIODINI (2013). An increasing trend of diffuse CO₂ emission from Teide volcano (Tenerife, Canary Islands): geochemical evidence of magma degassing episodes. *J. Geol. Soc.* (in press).
- PÉREZ, N.M., J.M.L. SALAZAR, P.A. HERNÁNDEZ, T. SORIANO, D.L. LÓPEZ & K. NOTSU (2004). Diffuse CO₂ and ²²²Rn degassing from San Salvador volcano, El Salvador, Central América. In: Rose, W.I., J.J. Bommer, D.L. López, M.J. Carr & J.J. Major (eds), *Natural Hazards in El Salvador. Geol. Soc. Am.*, Special Paper 375: 227-236.
- PÉREZ, N.M., H. WAKITA, S. NAKAI, Y. SANO & S.N. WILLIAMS (1994). ³He/⁴He isotopic ratios in volcanic hydrothermal discharges from the Canary Islands, Spain: implications on the origin of the volcanic activity. *Mineral. Mag.*, 58A: 709-710.
- POGORSKY, L.A. & G.S. QUIRT (1981). Helium emanometry in exploring for hydrocarbons: part I. In: *Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas II-* South. Methodist Univ. Press., pp. 124-135.
- POLAK, B.G., V.I. KONONOV, I.N. TOLSTIKHIN, B.A. MAMYRIN & L.V. KHABARIN (1975). The helium isotopes in thermal fluids. In: Johnson, A.I. (ed.), *Terrestrial and Chemical Problems of Thermal Waters*, Publication No. 119, pp. 15-29. Grenoble: International Association of Hydrological Science.
- REIMER, G.M. (1990). Helium soil-gas survey of the Crowpoint area, New Mexico: evaluation of the regional distribution. In: *Geochemistry of gaseous elements and compounds*, Theophrastus Pub. S.A., Athens.
- ROBERTS, A.A. & J.B. ROEN (1985). Near-surface helium anomalies associated with faults and gas accumulations in western Pennsylvania. *U.S. Geol. Survey open file report* 85-546.
- ROGIE, J.D., D.M. KERRICK, G. CHIODINI & F. FRONDI (2000). Flux measurements of nonvolcanic CO₂ emission from some vents in central Italy. *J. Geophys. Res.* 105: 8435-8445.
- ROGIE, J.D., D.M. KERRICK, M.L. SOREY, G. CHIODINI & D.L. GALLOWAY (2001). Dynamics of carbon dioxide emission at Mammoth Mountain, California. *Earth Planet. Sci. Lett.* 188: 535-541.
- ROMERO, C. (2000). Actividad volcánica histórica en las islas Canarias. En *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica*. pp 115-128. Eds. Cient:

- Mar Astiz y Alicia García. Serie Casa de Los Volcanes. Servicio publicaciones del Cabildo Insular de Lanzarote. Madrid.
- ROMERO, C. (1991). *Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario*. Consejería Política Territorial del Gobierno de Canarias. Tenerife. Dos volúmenes, 1407 pp.
- SAGIYA, T., J. BARRANCOS, D. CALVO, E. PADRÓN, G. PADILLA, P.A. HERNÁNDEZ, N.M. PÉREZ & J. M.P. SUÁREZ (2012). Crustal deformation during the 2011 volcanic crisis of El Hierro, Canary Islands, revealed by continuous GPS observation. *Japan Geoscience Union Meeting 2012*. SVC50-12:104:5-23-16:45-17:00.
- SALAZAR, J.M.L., P.A. HERNÁNDEZ, N.M. PÉREZ, G. MELIÁN, J. ÁLVAREZ & K. NOTSU (2001). Diffuse emission of carbon dioxide from Cerro Negro volcano, Nicaragua, Central America. *Geophys. Res. Lett.* 28: 4275-4278.
- SALAZAR, J.M.L., P.A. HERNÁNDEZ, N.M. PÉREZ, R. OLMOS, F. BARAHONA, R. CARTAGENA, T. SORIANO, D.L. LÓPEZ, H. SUMINO & K. NOTSU (2004). Spatial and temporal variations of diffuse CO₂ degassing at Santa Ana-Izalco-Coatepeque volcanic complex, El Salvador, Central America. In: Rose, W.I., J.J. Bommer, D.L. López, M.J. Carr & J.J. Major (eds), *Natural Hazards in El Salvador*. *Geol. Soc. Am. Special Paper* 375: 135-146.
- SANO, Y., Y. NAKAMURA, H. WAKITA, A. URABE & T. TOMINAGA (1984). Helium-3 emission related to volcanic activity. *Science* 224: 150-151.
- SANTAMARTA, J.C. (2006). El agua en la isla de El Hierro. Desalación versus captaciones subterráneas. Ponencia III; Modelos de Gestión del agua. Actas Congreso Internacional del Agua. Universidad de Sevilla, Sevilla.
- SHIMOIKE, Y., K. KAZAHAYA & H. SHINOHARA (2002). Soil gas emission of volcanic CO₂ at Satsuma-Iwojima volcano, Japan. *Earth Plan. Space* 54: 239-247.
- SPARKS, R.S.J. (2003). Forecasting volcanic eruptions. *Earth Plan. Sci. Lett.* 210: 1-15.
- STOIBER, R.E., S.N. WILLIAMS & B.J. HUEBERT (1986). Sulfur and halogen gases at Masaya caldera complex, Nicaragua: total flux and variations with time. *J. Geophys. Res.* 91:12215-12231.
- STOLPER, E. & J.R. HOLLOWAY (1988). Experimental determination of the solubility of carbon dioxide in molten basalt at low pressure. *Earth. Plan. Sci. Lett.* 87: 397-408.
- STRONCIK, N.A., A. KLÜGEL & T.H. HANSTEEN (2009). The magmatic plumbing system beneath El Hierro (Canary Islands): constraints from phenocrysts and naturally quenched basaltic glasses in submarine rocks. *Contrib. Mineral Petrol.* 157: 593-607.
- TARAN, Y., J. GAVILANES & A. CORTES (2002). Chemical and isotopic composition of fumarolic gases and the SO₂ flux from Volcán de Colima, México, between the 1994 and 1998 eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 117: 105-119.
- TILLING, R.I., C. HELIKER & D.A. SWANSON (2010). Eruptions of Hawaiian volcanoes - past, present, and future: U.S. Geological Survey. *General Information Product* 117, 63 p.

- TORGENSEN, T., J.E. LUPTON, D. SHEPPARD & W. GIGGENBACH (1982), He isotope variations in the thermal areas of New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 12: 283-298.
- WILLIAMS, S.N., N.C. STURCHIO, M.L. CALVACHE, R.F. MENDEZ, A.C. LONDONCO & N.P. GARCÍA (1990). Sulfur dioxide from Nevado del Ruiz volcano, Colombia: total flux and isotopic constraints on its origin. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 42: 53-68.

INSTITUTO DE ESTUDIOS HISPÁNICOS DE CANARIAS

Títulos previos de la colección 'Actas Semana Científica Telesforo Bravo'



Actas de la Semana Homenaje a Telesforo Bravo
(2006) – 147 pp.
[ISBN 84-611-0482-X]

Jaime Coello Bravo - El hombre que hablaba con las piedras. Una visión de la vida de Telesforo Bravo.

Julio Afonso-Carrillo - Amenazas a la diversidad de plantas marinas por el desarrollo urbano en el litoral: el ejemplo de Puerto de la Cruz.

Aurelio Martín - Aportaciones de D. Telesforo Bravo al conocimiento de la fauna de vertebrados terrestres de las islas Canarias.

Lázaro Sánchez-Pinto - Don Telesforo y la Macaronesia.

Juan Jesús Coello Bravo - Telesforo Bravo y la teoría de los deslizamientos gravitacionales.



Reflexiones sobre una naturaleza en constante evolución (2007) – 155 pp.
[ISBN 978-84-61189-571]

Luis Espinosa García - Recordando a Telesforo Bravo.

Joaquín Araujo - ¿Es compatible turismo y medio ambiente?

Octavio Rodríguez Delgado - El paisaje vegetal de Las Cañadas: su transformación por la intervención humana.

Guillermo Delgado - Colonización y evolución de vertebrados canarios: reptiles, aves y mamíferos.

Eustaquio Villalba - Evolución del conocimiento geológico de Tenerife.



Naturaleza amenazada por los cambios en el clima
(2008) – 147 pp.
[ISBN 978-84-61264-568]

Emilio González Reimers - Paleodieta y paleonutrición.

Antonio Machado Carrillo - Estudiando a los chascones, récord de biodiversidad en Canarias.

Marta Sansón - Arrecifes y manglares: ecosistemas en la frontera entre la tierra y el mar.

Marcelino del Arco Aguilar - La flora y la vegetación canaria ante el cambio climático actual.

Alberto Brito - Influencia del calentamiento global sobre la biodiversidad marina de las islas Canarias.



Misterios de la Gea: Descifrando los enigmas ocultos en rocas, gases, agua y fuego (2009) – 172 pp.
[ISBN 978-84-613-4817-6]

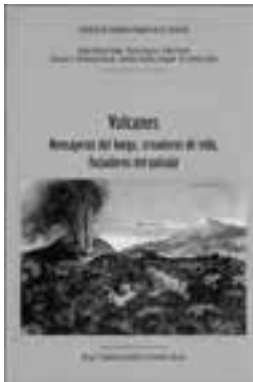
Francisco Anguita - Marte y la Tierra: historia de dos planetas.

Edelmira Luis Brito - Los recursos hídricos de La Caldera de Taburiente.

Antonio Eff-Darwich - Tenerife bajo las leyes de la física.

Esther Martín González - El legado paleontológico de nuestras islas: un patrimonio a conservar.

Nemesio M. Pérez - Emisiones difusas, dispersas y silenciosas de dióxido de carbono en los volcanes.



Volcanes: Mensajeros del fuego, creadores de vida, forjadores del paisaje (2010) – 156 pp.
[ISBN 978-84-614-3579-1]

Esther Beltrán Yanes - Conviviendo con volcanes en el Valle de Santiago: el paisaje de la comarca de Santiago del Teide antes de la erupción del Chinyero en 1909.

Segio Socorro - Cavidades volcánicas de Canarias. Tipos y génesis.

Pedro Oromí - La fauna subterránea de Canarias: un viaje desde las lavas hasta las cuevas.

Consuelo E. Hernández Padrón - El desconocido y sorprendente mundo de los líquenes que pueblan las lavas.

Salvador Ordóñez Delgado – Estudio de la erupción del Chinyero por Lucas Fernández Navarro, una investigación vulcanológica pionera.

M. Carmen Solana - Peligros asociados a las erupciones de Tenerife, su impacto y reducción en caso de erupción futura.



Biodiversidad: Explorando la red vital de la que formamos parte (2011) – 190 pp.
[ISBN 978-84-615-3089-2]

José María Landeira – Plancton: un universo marino diverso y desconocido.

Esperanza Beltrán Tejera – Los hongos: notables protagonistas en la biodiversidad canaria.

Leopoldo Moro, Juan José Bacallado y Jesús Ortea – Babosas marinas de las islas Canarias.

Wolfredo Wildpret de la Torre – Reflexiones sobre la biodiversidad canaria en el año internacional de la biodiversidad.

Javier Reyes – Sebadales: explosión de biodiversidad en desiertos de arena submarinos.



Agricultura en Canarias: Conciliando tradición y ciencia (2012) – 174 pp.
[ISBN 978-84-616-0641-2]

Domingo Ríos Mesa – Las papas antiguas de Canarias: origen y diversidad.

Inmaculada Rodríguez Torres – Patrimonio vitícola de Canarias.

Raimundo Cabrera Pérez – Control de plagas agrícolas: una historia de ida y vuelta.

Fernando Sabaté Bel – Recuerdos del futuro: la experiencia vernácula y la sostenibilidad.

María del Carmen Jaizme-Vega – La vida en el suelo. Papel de los microorganismos en la agroecología.

INSTITUTO DE ESTUDIOS HISPÁNICOS DE CANARIAS



FUNDACIÓN
MAPFRE
GUANARTEME