

Naturaleza amenazada por los cambios en el clima

Editado
por
Julio Afonso-Carrillo

Actas III Semana Científica Telesforo Bravo
INSTITUTO DE ESTUDIOS HISPÁNICOS DE CANARIAS
2008

© Los autores
© De esta edición: 2008, 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

Primera edición: octubre 2008

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

Depósito Legal: TF 1682/2008

ISBN: 978-84-612-6456-8

Presentación

Con '*Naturaleza amenazada por los cambios en el clima*', lema elegido para la convocatoria del pasado año de la III SEMANA CIENTÍFICA TELESFORO BRAVO, el Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias se adhirió a las numerosas voces que en los últimos años tratan de concienciar sobre este grave problema al que se enfrenta la humanidad. El denominado calentamiento global no es otra cosa que el progresivo incremento de la temperatura del planeta, que aunque para algunos parezca sutil, de apenas unos grados, provocará cambios importantes en el clima, afectará a la distribución y la supervivencia de las especies, incluyendo, naturalmente, al hombre.

En la actualidad, muy pocos discuten este cambio en las temperatura del planeta, aunque hay disputa sobre la velocidad en la que se está produciendo, si se le puede atribuir la frecuencia con la que algunos fenómenos atmosféricos (temporales, inundaciones, sequías) ocurren en lugares donde no eran habituales; y sobretodo, acerca del papel que las actividades humanas juegan en este incremento de la temperatura. Aunque en el pasado La Tierra ha sufrido repetidas veces grandes variaciones en sus climas, todo parece apuntar a que en la actualidad está ocurriendo un calentamiento global mucho más rápido de lo esperado. Pero además, los resultados de múltiples estudios científicos relacionan ciertas actividades llevadas a cabo por el hombre con este incremento en la temperatura. En este sentido, hay que destacar tanto las emisiones hacia la atmósfera de dióxido de carbono resultado de la quema de combustibles fósiles, como la de otros gases de efecto invernadero, que se han incrementado en más de un 70% en las últimas décadas.

Las evidencias indican que los efectos del calentamiento global ya se están mostrando en paisajes naturales de todo el mundo. Uno de los más evidentes es el deshielo que afecta a los glaciares y a los polos, y que no sólo está elevando el nivel del mar sino produciendo alteraciones en el

clima de muchas regiones. Así, imágenes sobre algunos fenómenos climatológicos extremos (lluvias torrenciales, inundaciones, olas de calor) resultan relativamente habituales en los informativos de las televisiones, particularmente porque están teniendo lugar en regiones donde resultan inusuales. Es obvio que todas estas catástrofes repercuten de forma directa sobre las actividades humanas y por sus efectos sobre la salud, la agricultura, el abastecimiento de agua, y otros sectores económicos, están siendo y serán particularmente dramáticos para los países más pobres.

La III SEMANA CIENTÍFICA TELESFORO BRAVO, como un foro de encuentro y de reflexión sobre medio ambiente, que pretende fomentar el intercambio de ideas, la discusión y la defensa de la naturaleza, dedicó algunas de las sesiones al tema del cambio climático. En la primera sesión Emilio González-Reimers analizó la nutrición y la dieta de los primitivos pobladores de Canarias, y constituyó un homenaje a la figura del investigador portuense que inspira la celebración de estas jornadas. Aunque Telesforo Bravo no participó en este tipo de estudios, sí inculcó al autor, el amor a la Naturaleza y el aprender a observarla, buscando información en lo visible y en lo que está más allá de lo visible. En la segunda sesión, Antonio Machado recreó el mundo de la investigación alrededor de un grupo de pequeños insectos, destacando que la información acumulada en la actualidad sobre muchos grupos de organismos no es todavía suficientemente buena, por lo que no es adecuado avanzar conclusiones definitivas sobre amenazas o eventuales impactos del cambio climático, en tanto no se consolide su conocimiento. La tercera sesión, estuvo dedicada a los ecosistemas que se establecen entre la tierra y el mar, y en ella Marta Sansón puso de relieve que sobretodo los situados en las regiones tropicales (manglares y arrecifes) son particularmente sensibles a los cambios en el clima. Marcelino del Arco intervino en la cuarta sesión, en la que demostró que utilizando parámetros climáticos e índices bioclimáticos es posible realizar una predicción de los posibles efectos que el cambio climático actual podría tener sobre la flora y vegetación canaria. Finalmente, en la sesión que cerró el ciclo de conferencias, Alberto Brito examinó los posibles efectos del calentamiento global sobre los ecosistemas marinos. En estos ambientes, destacó los cambios que se están produciendo en la temperatura del mar, particularmente en las regiones subtropicales y templadas, y como influyen en los organismos marinos.

Como en las convocatorias anteriores, en la organización del ciclo de conferencias por parte del Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias participaron Jaime Coello Bravo, Jerónimo de Francisco Navarro e Iris Barbuzano Delgado, junto con el autor de estas líneas. Además, el IEHC contó con la colaboración desinteresada de la Asociación Viera y Clavijo para la Enseñanza de las Ciencias, de la Fundación Telesforo Bravo – Juan Coello y del patrocinio de la Fundación Mapfre Guanarteme. Nuestro

reconocimiento y agradecimiento a todos ellos, puesto que sin su colaboración este tercer ciclo de conferencias no hubiera sido posible. El IEHC también quiere dejar constancia de gratitud tanto a los conferenciantes, que aceptaron gustosamente a participar y a preparar las contribuciones que aparecen recopiladas en estas páginas, como a nuestros socios y a todas aquellas personas preocupadas por la naturaleza que asistieron en nuestra sede a las diferentes sesiones.

La III SEMANA CIENTÍFICA TELESFORO BRAVO fue presentada a los medios de comunicación en una rueda de prensa celebrada en la sede del IEHC el martes 6 de noviembre de 2007. Días después, el viernes 9, Francisco García-Talavera fue el encargado de realizar la presentación del libro de Actas de la II Semana Científica Telesforo Bravo, titulado *Reflexiones sobre una naturaleza en constante evolución*. A partir del lunes 12 de noviembre se puso en marcha el programa diseñado, con intervenciones diarias en horario de 19:00 a 21:00 horas en el salón de actos de nuestra sede. Las conferencias fueron las siguientes:

Lunes, 12 noviembre 2007.

Emilio González Reimers: "Nutrición y dieta a partir de los restos esqueléticos".

Martes, 13 noviembre 2007.

Antonio Machado: "Los chascones de Canarias".

Miércoles, 14 noviembre 2007.

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

Jueves, 15 noviembre 2007.

Marcelino del Arco: "La flora y la vegetación canaria ante el cambio climático actual".

Viernes, 16 noviembre 2007.

Alberto Brito: "Influencia del calentamiento global sobre la biota marina de las islas Canarias".

La ubicación en el tiempo del ciclo de conferencias fue afortunada puesto que el *cambio climático* fue materia de información preferente en todos los medios de comunicación a lo largo de la semana. Así, la prensa nacional del domingo 18 de noviembre se hacía eco del informe final del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), que estaban debatiendo en Valencia los delegados de 130 países. El informe comenzaba afirmando que "El calentamiento del clima es inequívoco, y ya es evidente

por el aumento de la temperatura media global del aire y los océanos, la amplia fusión del hielo y la nieve y el aumento global del nivel del mar". Además, el documento resaltaba la existencia de impactos, como el aumento del nivel del mar, que "ya son inevitables" y que "durarán siglos". El texto aprobado afirmaba: "11 de los últimos 12 años (1995-2006) están entre los 12 más cálidos en los registros instrumentales de la superficie terrestre (desde 1850)" y el ritmo actual de calentamiento –0,13 grados cada década– es mayor que el que el IPCC calculó en 2001. La temperatura ha subido más en el hemisferio norte y especialmente en el Ártico "que se ha calentado a una velocidad que dobla la del resto del planeta". El aumento ha sido tan fuerte que "las observaciones desde 1961 muestran que la temperatura en el océano ha aumentado a profundidades de al menos 3.000 metros y el océano ha estado absorbiendo más del 80% del calor añadido en el sistema climático". La subida en el mar ha sido muy pequeña, pero calentar el océano requiere una cantidad inmensa de energía. Al calentarse, el mar aumenta de volumen y su nivel sube 3,1 milímetros al año de media desde 1993.

Es evidente que el cambio climático está ya en marcha, pero debemos recordar que todavía no es demasiado tarde para actuar. Todos podemos contribuir a elaborar soluciones para este grave problema al que se enfrenta la humanidad. Por ello, pequeños cambios en nuestros hábitos cotidianos son importantes.

Por último, reafirmar que los textos que se han reunido en la presente publicación constituyen un tributo por parte del IEHC de reconocimiento y de recuerdo hacia el profesor Telesforo Bravo.

Julio Afonso Carrillo
Vicepresidente del IEHC

ÍNDICE

Págs.

1. Paleodieta y paleonutrición, por CELESTINO GONZÁLEZ-REIMERS	9 – 41
2. Estudiando a los chascones, récord de biodiversidad en Canarias, por ANTONIO MACHADO CARRILLO	43 – 68
3. Arrecifes y manglares: ecosistemas en la frontera entre la tierra y el mar, por MARTA SANSÓN	69 – 104
4. La flora y la vegetación canaria ante el cambio climático actual, por MARCELINO DEL ARCO AGUILAR	105 – 140
5. Influencia del calentamiento global sobre la biodiversidad marina de las islas Canarias, por ALBERTO BRITO	141 – 161

1. Paleodieta y paleonutrición

Emilio González-Reimers

Catedrático de Medicina Interna, Universidad de La Laguna, Tenerife.

Telesforo Bravo fue ante todo un amante de la Naturaleza. Conocedor de las rocas y de la orogénesis, testigo del nacimiento de volcanes (como el San Juan o el Teneguía) y de su colapso (como el del lejano St Helen), comprendió muy bien que los tiempos geológicos, aunque a veces instantáneamente cataclísmicos, nada tienen que ver con los tiempos humanos, como tampoco es comparable su potencia devastadora, sus efectos sobre el paisaje, el clima, la vida del hombre. Probablemente el guanche también tuvo oportunidad de ver alguna erupción, quizás incluso alguna erupción gigante, que le hizo comprender, tal vez mejor que a nosotros, qué lugar ocupaban en su mundo. No podemos conocer –podemos fantasear, intuir, pero no conocer– lo que el guanche pensó en aquel momento o el impacto que tuvo sobre sus creencias, sobre sus costumbres: de su cultura ancestral quedan apenas unos cuantos artefactos y sus restos esqueléticos. Tal vez parezca poco para reconstruir su mundo, pero de su análisis podemos extraer valiosa información. Por eso nos centraremos en esta breve revisión en la descripción de algunas alteraciones presentes en el esqueleto que pueden informarnos acerca de su estado nutricional y de la dieta que consumieron. Por motivos de extensión no podemos exponer en profundidad todas ellas; por eso sólo citaremos de pasada algunas, como hipoplasias del esmalte o el estudio de los oligoelementos óseos, y analizaremos algo más en detalle qué información puede aportar el estudio de la masa ósea.

Sirva además la misma como homenaje a Telesforo: aunque no participó en este tipo de estudios, sí que nos inculcó, junto a Celestino González Padrón y a Sventenius, el amor a la

Naturaleza y el aprender a observarla, buscando información en lo visible y en lo que está más allá de lo visible.



Telesforo Bravo, siempre enseñando, esta vez durante la excavación del depósito funerario infantil de la Montaña Cascajo en 1977.

Dieta y nutrición

Debemos diferenciar ambos conceptos. **Dieta** es lo que ingerimos, mientras que **nutrición** es un estado fisiológico caracterizado por la normalidad de parámetros antropométricos y distribución de compartimentos corporales (masa magra, grasa, proteínas viscerales). Estos tres compartimentos son metabólicamente activos y están en equilibrio entre sí. El estado nutricional va a condicionar nuestra capacidad para responder a una infección u otro problema orgánico importante, incluyendo, por ejemplo, un ayuno prolongado, o una relativa escasez de recursos. Por otro lado, la obesidad acarrea también una serie de riesgos para la salud como hipertensión, diabetes, enfermedad cardiovascular o cáncer. Por eso, porque es la situación que se asocia a la mayor supervivencia, se ha definido el concepto de peso ideal, o mejor, índice de masa corporal [peso en kg dividido por la talla (en metros) al cuadrado] óptimo, cuyo valor está entre 20 y 25 kg/m².

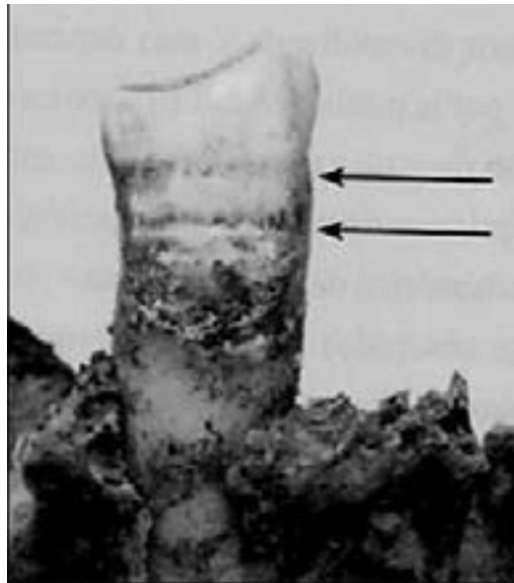
No es pertinente que hablemos aquí de los cambios metabólicos que tienen lugar en un proceso agudo, intenso y de corta duración: se acompañan de intensas alteraciones analíticas y de un perfil hormonal concreto que queda un poco al margen de lo que vamos a tratar. Más bien queremos centrarnos en los mecanismos adaptativos que se ponen en marcha cuando un individuo se enfrenta a una situación más o menos crónica de desequilibrio entre aporte de nutrientes y gasto calórico.

Adaptación al ayuno

En situaciones de precariedad (desequilibrio entre aporte y consumo), hay prioridades metabólicas tales como producción de glucosa (combustible imprescindible para determinadas células del organismo), síntesis de factores de coagulación (sin los que sufriríamos hemorragia incoercible ante el mínimo traumatismo, incluso el caminar), síntesis de proteínas de transporte (de hormonas, vitaminas, etc.), o síntesis de reactantes de fase aguda (imprescindibles para combatir los gérmenes que invaden constantemente nuestro organismo; por ejemplo, al masticar pueden entrar hasta 100.000 bacterias al torrente sanguíneo). El hígado se encarga de la síntesis de todas estas sustancias prioritarias, sirviéndose para ello de los aminoácidos disponibles, que, por lo tanto, no se utilizan para otros fines. Todo este proceso está finamente regulado por un eje hormonal complejo.

No quedan pues aminoácidos disponibles para la síntesis de otras proteínas. Así, vemos como la masa muscular del individuo decrece, su piel pierde elasticidad, cae el cabello, se alteran las uñas y el hueso. Se comprende con facilidad que todas estas alteraciones son más evidentes si el

compromiso entre aporte y demanda de nutrientes tiene lugar durante el periodo de crecimiento.



Efectos de la malnutrición sobre los tejidos duros. En la imagen superior se aprecian dos tibias con líneas transversales radioopacas (líneas de Harris). En la figura inferior se aprecia la impronta de la malnutrición en el diente (flechas), en forma de bandas de hipoplasia.

¿Por qué se afecta el hueso?

Es necesario recordar brevemente algunos conceptos básicos sobre el metabolismo óseo para así entender sus alteraciones durante la malnutrición. El tejido óseo está compuesto por sales de fosfato cálcico (predominante, en un 85%; también carbonato cálcico (10%), fluoruro cálcico y fosfato magnésico) dispuestas sobre una matriz proteica rica en

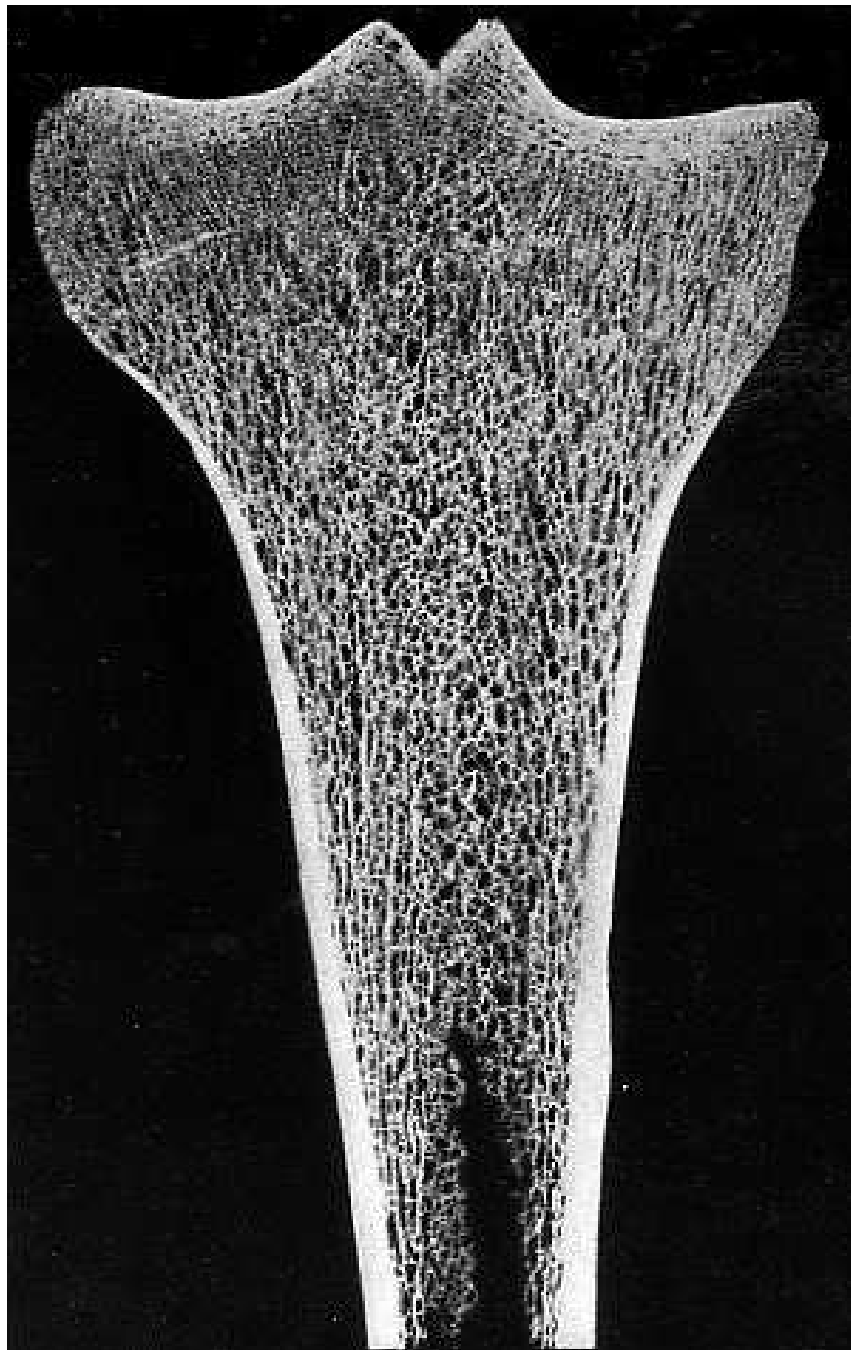
fibras colágenas denominada **osteoide**. La conjunción de estructuras minerales y estructuras orgánicas confiere al hueso sus especiales características de rigidez, y su capacidad de resistencia a la torsión, presión, flexión y tracción, a las que está continuamente sometido por el hecho de caminar, o simplemente, por el hecho de tener que vencer la fuerza gravitatoria. Pero el hueso no cumple sólo una función de sostén: es una estructura metabólicamente activa, en constante equilibrio con el medio interno, ya que es el principal reservorio de calcio y de fósforo, y la principal reserva alcalina del organismo. Consideremos en este sentido que el mantenimiento a corto plazo del producto calcio-fosfórico se debe a la inmediata precipitación o disolución de sales de fosfato cálcico en los capilares óseos (donde están en equilibrio metaestable), que permite la corrección inmediata de pequeñas oscilaciones de cualquiera de los dos elementos. O, por ejemplo, cómo gracias al tampón óseo no se agota totalmente el bicarbonato en la insuficiencia renal crónica, a pesar de que el riñón insuficiente es incapaz de eliminar todos los ácidos derivados del metabolismo. Además, cuantitativamente, el hueso constituye una reserva proteica importante: un 20% del peso del hueso está formado por agua, pero un 26-27% del peso seco está constituido por proteínas, un 95% de las cuales es colágena.

Para cumplir su función metabólica el hueso está continuamente **remodelándose**, es decir, destruyéndose en unos sitios (reabsorción) y formándose en otros. Durante el periodo de desarrollo, el hueso crece en longitud y anchura, adquiriendo una configuración propia para cada hueso (y para cada especie); domina durante ese periodo la síntesis sobre la reabsorción. Una vez **modelado** el hueso y terminado, el **crecimiento** continúa durante algunos años, inclinándose la balanza a favor de la síntesis, con lo que la masa ósea aumenta progresivamente hasta alcanzar su pico máximo, alrededor de los 30-35 años para el hueso cortical (formado por tejido óseo compacto) y probablemente antes para el hueso trabecular o esponjoso (con el tejido óseo dispuesto en trabéculas que delimitan cavidades). Las diferencias entre el hueso cortical y el hueso trabecular se pueden observar en la figura de la página 14.

A partir de ahí se produce un descenso progresivo. Tanto la adquisición del pico de masa ósea como la tasa de pérdida ulterior dependen de diversos factores, alguno de los cuales analizaremos después.

Así pues, crecimiento, modelado y remodelado incluyen dos procesos opuestos: síntesis y reabsorción. La síntesis ósea es llevada cabo por células especializadas, los osteoblastos, quienes producen primero el osteoide y promueven luego, sobre el mismo, el depósito de fosfato cálcico en forma de cristales de hidroxapatita, es decir, la mineralización de este osteoide. La reabsorción ósea la llevan a cabo otras células especializadas, los osteoclastos, capaces de “disolver” el tejido óseo. No obstante, osteoclastos

y osteoblastos no son células de función antagónica: existen complejas interacciones entre ambas estirpes, y es más, el osteoblasto secreta productos, cuyo análisis detallado no procede en esta revisión, que promueven la diferenciación de progenitores del osteoclasto hacia células maduras.



Corte longitudinal de tibia donde se aprecia el hueso cortical compacto y el esponjoso o trabecular.

Estatura

Si bien el modelado está controlado por factores genéticos, es obvio que durante la fase de crecimiento predomina la síntesis sobre la destrucción ósea. Y es por eso por lo que la talla depende en parte de la disponibilidad de suficientes nutrientes para que tenga lugar la síntesis y su posterior mineralización (Silventoinen, 2003).

La estatura puede calcularse a partir de huesos largos con bastante precisión (Ubelaker, 1989). Diversos investigadores han abordado el tema. Son clásicas las observaciones de Verneau (1887), quien encontró una estatura de 170 cm en hombres y de 153 cm en mujeres prehispanicas de Canarias, y las de Hooton (1925), quien reportó 166 cm en hombres y 154 cm en mujeres. Más tarde, Schwidetzky, en 1963, encontró 164.2 cm en hombres y 151.9 cm en mujeres, mientras que García Talavera, en 1992, refirió, para la población de Tenerife, una estatura de 170.5 cm en hombres y de 156.7 cm en mujeres, aunque no se especificó el método utilizado para estimar el sexo.

A partir de 256 tibias de Gran Canaria hemos obtenido, utilizando las fórmulas de Trotter y Gleser (Ubelaker, 1989), y clasificando la muestra en varones y mujeres a partir de funciones discriminantes (González-Reimers *et al.*, 2000) unos valores de 170.81 ± 5.18 cm en 173 hombres y 157.95 ± 4.25 en 86 mujeres. La población masculina de Gran Canaria presentaba una talla estimada ligeramente superior (170.81 ± 5.18 cm) a la de 15 varones de Tegueste (Tenerife) (168.95 ± 5.23), aunque las diferencias no fueron significativas ($t=1.38$). En cambio, la población femenina de Gran Canaria sí era significativamente más elevada (158.01 ± 4.49) que la de 11 mujeres de Tegueste, en Tenerife (154.47 ± 5.23 , $t=2.84$, $p=0.006$).

No obstante, hay que tener cautela a la hora de interpretar los valores referentes a la talla del habitante prehispanico de las islas. Aunque en la talla influyen fuertemente factores genéticos, no es aconsejable establecer una comparación con la talla de poblaciones actuales, puesto que en general, la talla del ser humano moderno es cada vez mayor, y no podemos olvidar que estamos considerando una población cuya antigüedad es superior, como mínimo, a 500 años. Sí que es de sumo interés comparar la talla de los habitantes prehispanicos con la de otras poblaciones de similar antigüedad (por ejemplo, castellanas, andaluzas, bereberes o germánicas), y dentro de las islas, buscar diferencias entre grupos poblacionales. Por ejemplo, los datos preliminares de Gran Canaria sugieren que la población inhumada en túmulos tenía una estatura superior a la inhumada en cuevas.

Osteoporosis

La masa ósea presente en cada momento es el resultado de tres factores: de la magnitud del pico de masa ósea alcanzado y de los pesos relativos de la síntesis y de la destrucción ósea. El pico de masa ósea es variable según la raza, siendo mayor en la raza negra. Entre otros factores, se sabe que la ingestión de calcio durante el desarrollo influye sobre el pico de masa ósea, al igual que el ejercicio físico (Smith y Gilligan, 1991), la disponibilidad de vitamina D en su forma activa, el tipo de dieta (Parsons *et al.*, 1997; Schurch *et al.*, 1998) y el estado nutricional (Ilich *et al.*, 1998).

Hasta los 35-40 años, la masa ósea permanece más o menos estable, luego se pierde a razón de un 0.3-0.5% año. Estos datos se refieren sobre todo al hueso cortical, pero todo eso ocurre probablemente antes y de forma más acusada en el hueso trabecular (ver figura página 14). A esto se suma una pérdida acelerada de masa ósea en la mujer en el periodo postmenopáusico, que dura varios años, para lentificarse de nuevo más tarde. Así, la pérdida acumulada de masa ósea a lo largo de la vida puede alcanzar un 20-30% en el varón y un 40-50% en la mujer. Esta pérdida no es uniforme, ni en relación al territorio óseo ni al sexo. Es mayor en metacarpianos, cuello femoral y cuerpos vertebrales, que en la diáfisis femoral, tibia o cráneo. En la mujer, además de en columna y cadera, la pérdida de masa ósea es particularmente ostensible en región distal de radio y hueso esponjoso vertebral, donde afecta sobre todo a las trabéculas horizontales. También la pérdida de masa ósea es más marcada en la región subendosteal del hueso cortical (o sea, la que rodea la médula ósea), con lo que paulatinamente se ensancha la cavidad medular y se adelgaza la corteza.

Son múltiples los factores que aceleran la pérdida de masa ósea (Eriksen y Langdahl, 1997). El encamamiento y la ingravidez pueden provocar una pérdida de masa ósea de un 1% mensual. Algo similar ocurre por el desuso muscular: la actividad muscular es un determinante de primer orden de la masa ósea (Duppe *et al.*, 1997). La restricción dietética, la dieta escasa en calcio o proteínas (Bourrin *et al.*, 2000), o exclusivamente basada en ellas, el exceso de consumo de grasas, la falta de ejercicio o el déficit nutricional influyen sobre la tasa de pérdida de masa ósea. Influyen también factores hormonales. Así, el hipertiroidismo, el hipercortisolismo y el hiperparatiroidismo son potentes inductores de reabsorción ósea excesiva; mientras que los andrógenos, y sobre todo los estrógenos, ejercen un efecto protector. Además, la actividad osteoclástica y osteoblástica, es decir, la reabsorción y la síntesis de hueso, se ve influida por los mediadores inflamatorios (citocinas) que son liberadas durante la reacción del organismo frente a una agresión (bacteriana o traumática) aguda (reacción de fase aguda). Así, se sabe que sustancias como la interleucina-1 ó el factor de necrosis tumoral, entre otras, son potentes activadoras del osteoclasto.

La progresiva pérdida de masa ósea provoca que en un determinado momento el hueso no pueda ejercer adecuadamente la función de sostén que debe afrontar; entonces se producen fracturas de manera espontánea o después traumatismos mínimos. Algunos autores restringen la definición de osteoporosis sólo para esas situaciones en las que el descenso de la masa ósea es de tal magnitud que provoca fractura “espontánea”. El nivel de reducción de la masa ósea necesario para que aparezca una fractura tras un traumatismo mínimo es variable, ya que aparte de la cantidad, existe un componente de calidad de la estructura ósea, es decir, de la conexión de las trabéculas entre sí y de su organización espacial. La absorciometría por rayos X de doble energía (DEXA) es una técnica capaz de estimar la densidad mineral ósea (BMD) y resulta un excelente indicador del riesgo de fractura (Marshall *et al.*, 1996). Por eso se define osteoporosis por DEXA como la disminución de la BMD 2.5 desviaciones estándar por debajo del valor medio ajustado a edad y sexo.

Etiología de la osteoporosis

Las causas por las cuales se desarrolla la osteoporosis pueden resumirse en la siguiente clasificación etiológica:

En primer lugar hay casos idiopáticos, es decir, de irrupción espontánea o de causa desconocida. Aquí se distinguen la *osteoporosis idiopática juvenil y del adulto*, la *osteoporosis idiopática tipo I* (propia de mujeres de 51 a 70 años, que muestran sobre todo una pérdida acelerada de hueso trabecular, con alto riesgo de fractura de vértebras y de radio distal, hipofunción paratiroidea y descenso de la forma activa de la vitamina D), y *osteoporosis idiopática tipo II* (sobre todo asociada a individuos de ambos sexos mayores de 70 años, que se asocia a fracturas de cuello femoral, cabeza humeral, tibia y pelvis, que afecta por igual a hueso cortical y trabecular, cursa con aumento de PTH y descenso de 1.25 dihidroxivitamina D3). Si bien la primera de estas tres formas es muy rara, las otras dos son frecuentes y constituyen la inmensa mayoría de los casos de osteoporosis.

En las *osteoporosis secundarias*, como antes comentamos, son muchos los factores que influyen en la pérdida de masa ósea, por lo que hipogonadismo, hipercortisolismo, hipertiroidismo, hiperparatiroidismo, malnutrición calórico-proteica, déficit de calcio, situaciones de malabsorción e inmovilización prolongada, se asocian a osteoporosis. También lo hacen alteraciones congénitas o adquiridas de la síntesis de la estructura ósea, como la osteogénesis imperfecta, la homocistinuria, el síndrome de Marfan y el de Ehlers-Danloss, o el síndrome de Menkes por

déficit de cobre, y el escorbuto, por déficit de vitamina C, ambos asociados a defectuosa formación de las fibras colágenas.

Algunos tóxicos como el alcohol, o fármacos como la heparina, se asocian también a osteoporosis, al igual que entidades como la artritis reumatoide, la epilepsia o la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, y rarezas como la mastocitosis sistémica o la hipofosfatasia del adulto. Esta clasificación parcialmente sindrómica engloba muchos procesos, algunos relativamente comunes, como la diabetes (la tipo 1) o el alcoholismo, pero que a lo sumo tienen consecuencias clínicamente relevantes en menos de un 3-5% de la población.

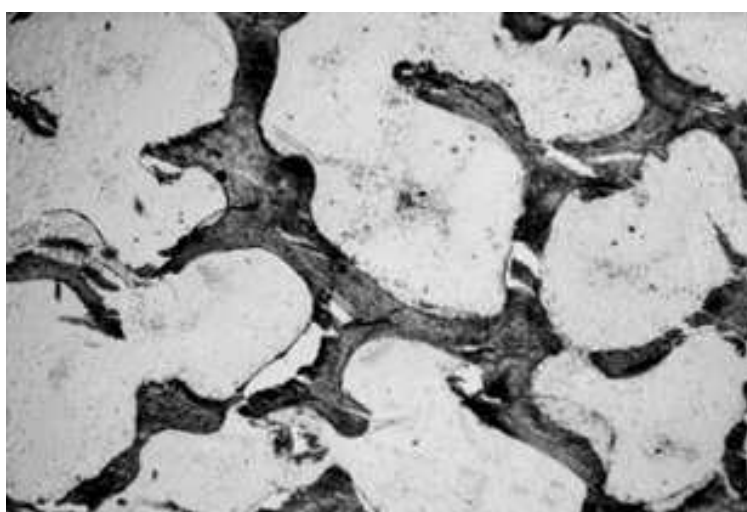
Por lo tanto, en edades juveniles y en mujeres premenopáusicas, la osteoporosis puede considerarse una entidad rara y casi siempre secundaria, al revés de lo que ocurre en la senilidad y en la mujer postmenopáusica, colectivo en el que es muy frecuente. Desde luego, en el mundo desarrollado en el que la diabetes tipo 1 se trata con insulina y no existe prácticamente la malnutrición por falta de ingesta, la presencia de osteoporosis en edades juveniles obedece sobre todo a síndromes malabsortivos con malnutrición secundaria. Ocurre entonces lo que comentábamos antes al referirnos a la adaptación al ayuno: el hígado utiliza cualquier aminoácido disponible para la síntesis de proteínas esenciales, por lo que no quedan suficientes para que el hueso forme osteoide, por lo que se desacopla el ciclo del remodelado (síntesis-reabsorción).

Métodos diagnósticos

Existen varios métodos para diagnosticar esta entidad. Ya que se trata de cuantificar la masa ósea, el más directo e invasivo es determinarla histomorfométricamente en muestras óseas sin decalcificar, midiendo directamente el volumen óseo trabecular (VOT). Para ello es necesario obtener un pequeño fragmento de hueso para realizar las secciones del tejido que se observarán al microscopio, como en la figura de la página 19.

Considerado el “patrón oro” durante largo tiempo, la masa ósea debe determinarse preferentemente en un hueso no de carga, a fin de aminorar este efecto en la interpretación del resultado. Por eso, se eligieron las costillas o la cresta iliaca anterosuperior en las caderas. El método es invasivo (destrutivo en el caso de muestras óseas antiguas) y no exento de complicaciones potencialmente peligrosas (como osteomielitis), laborioso y necesitado de una infraestructura no siempre disponible en todos los laboratorios. Por eso se desarrollaron métodos alternativos, como la fotodensitometría radiográfica mediante un densitómetro lumínico que compara la densidad radiológica ósea con la de un patrón conocido. Es de

menor utilidad en el vivo que en el hueso seco, pues los tejidos blandos atenúan de forma variable el haz de rayos, pero exige una constancia en las condiciones técnicas. La fotodensitometría puede emplearse, también, de forma semicuantitativa, valorando la radiotransparencia, o, en el caso de las vértebras, por ejemplo, la pérdida progresiva de la trabeculación. Afín a esta última forma de evaluar la osteoporosis es el denominado “índice de Shing”, en el que se valora de forma semicuantitativa la trabeculación del cuello de fémur en siete estadios, pero es poco preciso y no es útil para la predicción de fractura. Similar valor tiene el estudio radiológico del calcáneo.



Preparación histológica (tinción con azul de toluidina) donde se aprecian trabéculas bien conservadas.

Un valor parecido lo tienen los índices derivados del colapso vertebral. Compuesta de hueso trabecular en su mayoría, la vértebra es una diana frecuente de la fractura osteoporótica, hundiéndose los platillos vertebrales y apareciendo la denominada configuración en pez. Así, hay varios índices que relacionan la altura en la región media de la vértebra con la anterior en una placa lateral de columna, o la altura de los cuerpos vertebrales en su región central con la altura de los discos intervertebrales, o índices basados en la deformidad vertebral. Todos ellos poseen valor clínico, pero detectan, por lo general, sólo grados avanzados de osteoporosis.

Otros métodos derivados de la radiología simple son los basados en el adelgazamiento cortical, que como señalamos, constituye un fenómeno relevante de la pérdida de masa ósea. El empleo in vivo de índices córticomedulares (CI) de los huesos largos tropieza con la dificultad de que el grosor cortical es diferente al proyectarse el hueso en diferente posición,

y que ésta va a venir predeterminada por la función de los grupos musculares que se insertan en dicho hueso largo, por lo que la uniformidad de criterios puede verse comprometida. Por eso, en clínica se eligió un hueso de la mano, al segundo metacarpiano. Es importante considerar que en los estudios de huesos secos el inconveniente de la posición no uniforme del hueso largo no existe, obviamente.

Los métodos absorciométricos se basaron en principio en la absorción de un haz de radiación fotónica (gamma, en general derivada del yodo 125 o americio 231) por el tejido óseo; dado que los tejidos blandos podían interferir, y que éstos pueden ser variables en cantidad, se eligió la muñeca o zona distal del radio para este tipo de estudios, ya que en esa zona la cantidad de tejido blando no presenta grandes variaciones interindividuales. La absorciometría fotónica dual, al emplear dos distintas energías, permite separar la atenuación debida a los tejidos blandos de la debida al tejido óseo.

Las técnicas de absorciometría fotónica pronto se vieron desplazadas por la DEXA (Blake *et al.*, 1997), en la que un haz de rayos X de alta energía apenas atenuado por los tejidos blandos y un haz de baja energía permiten el cálculo de la atenuación debida al hueso con independencia de la cantidad de tejido blando presente. Es la técnica usual actualmente, y predice fielmente el riesgo de fractura osteoporótica.

También es una técnica altamente reproducible y fiable la tomografía computadorizada cuantitativa (TAC), habitualmente realizada en una vértebra lumbar. Sin embargo, es un método más caro que el anterior, por lo que hoy está en desuso.

Estos dos métodos absorciométricos comentados tienen, a priori, un inconveniente teórico a la hora de su aplicación al estudio de huesos secos en los que falta el almohadillado formado por los tejidos blandos. Podría obviarse sumergiendo las muestras en una cubeta con agua, pero el hueso esponjoso atrapa burbujas de aire que no desaparecen incluso tras inmersión prolongada (cercana a 2 horas, como hemos comprobado con huesos cedidos amablemente por el Dpto. de Anatomía de la Facultad de Medicina de la Universidad de La Laguna). Tal vez este problema podría obviarse introduciendo al hueso en una cámara con agua conectada a un sistema de presión negativa, pero la complejidad del sistema sería grande, aparte de someter la muestra arqueológica a unas condiciones no totalmente inocuas.

Sin embargo, el hueso seco, pero no el de un paciente, es susceptible de ser pesado, y puede calcularse su peso específico, determinando su volumen, por ejemplo, por técnicas de desplazamiento volumétrico. La utilidad de la ecografía del calcáneo se ha constatado repetidamente en estudios clínicos modernos, aunque que sepamos no se ha aplicado al estudio de poblaciones antiguas.

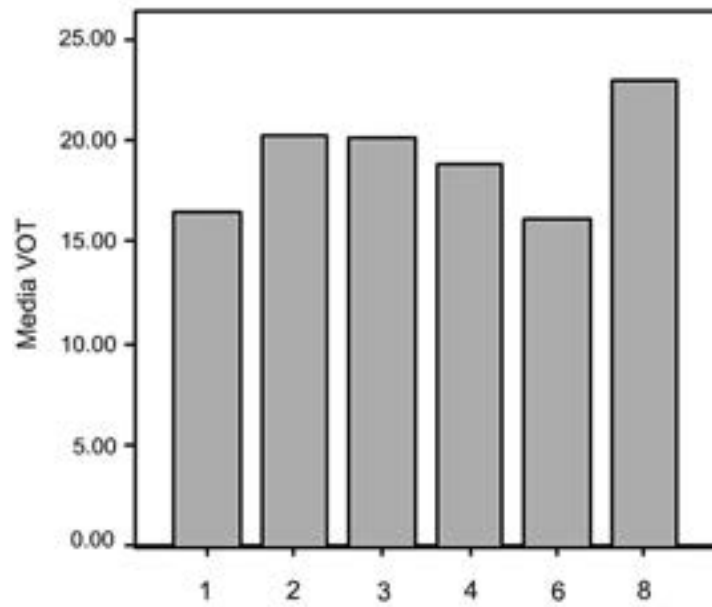
Masa ósea en la población prehispánica de Canarias

Diversos investigadores (Agarwal y Grynpass, 1996; Bennike y Bohr, 1990; Bennike *et al.*, 1993; Dewey *et al.*, 1969; Eriksen, 1976; Farquharson *et al.*, 1997; Hammerl *et al.*, 1991; Huss-Ashmore, 1978; Kneissel *et al.*, 1994; Lees *et al.*, 1993; Martin *et al.*, 1985; Pfeiffer, 2000) han aplicado alguna(s) de las técnicas descritas al estudio de la masa ósea de poblaciones pasadas. Nosotros, desde hace algunos años (González-Reimers *et al.*, 1988; González-Reimers y Arnay de la Rosa, 1992; González-Reimers *et al.*, 1998; Velasco-Vázquez *et al.*, 1999; González-Reimers *et al.*, 2007), las hemos venido aplicando al estudio de las poblaciones canarias prehispánicas, habiendo determinado la masa ósea por métodos histológicos, densitométricos y fotodensitométricos en unas 400 muestras en total (en pelvis y tibia derecha, la mayoría de ellas de Gran Canaria), así como la prevalencia (número de casos de una enfermedad en un momento determinado) de fractura vertebral en muestras de El Hierro (González-Reimers *et al.*, 2005).

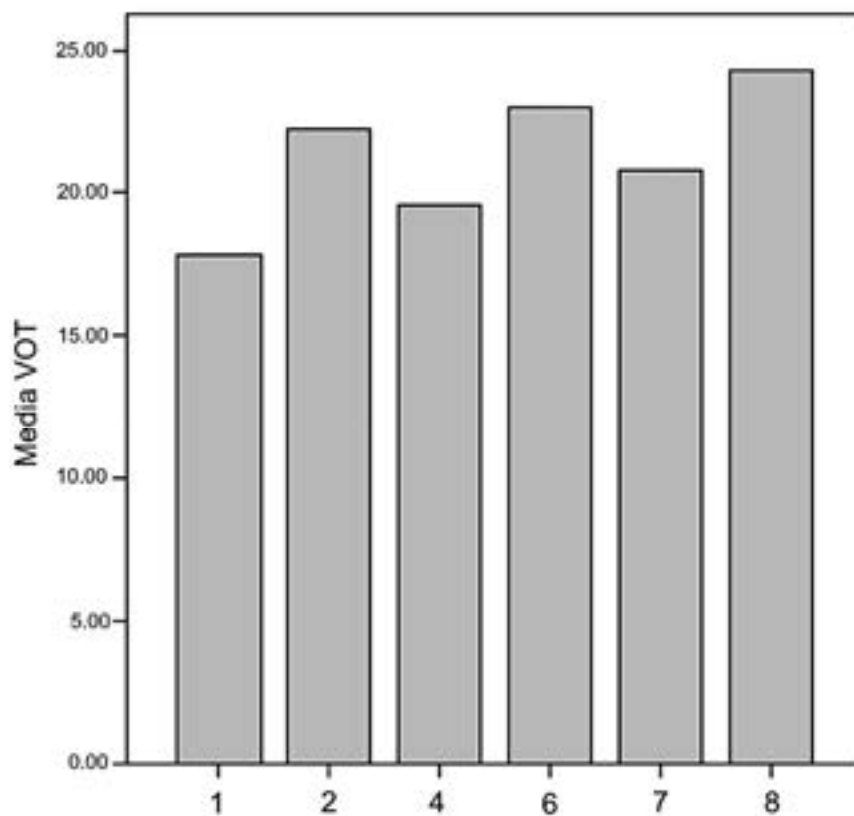
Del total de muestras estudiadas hemos encontrado los siguientes resultados que están representados gráficamente en las figuras de la página 22.

Las pelvis de Gran Canaria mostraron unos valores medios de volumen óseo trabecular (VOT) de $15.91 \pm 4.91\%$, muy por debajo de los valores del grupo control ($t=2.36$, $p<0.02$). No se encontraron diferencias entre hombres y mujeres, entre habitantes de costa y cumbre, o entre restos momificados y no momificados. La prevalencia global de osteoporosis (estableciendo como límite un valor inferior a dos desviaciones estándar por debajo de la media de diversos estudios llevados a cabo por distintos autores en poblaciones modernas de 20 a 59 años, incluyendo nuestra serie) fue del 29%. La distribución de los valores de VOT fue heterogénea, con muchos individuos con bajos niveles de VOT y un apreciable porcentaje con niveles de VOT por encima del 24%, es decir, plenamente en el rango de la normalidad, incluso en los límites altos de la normalidad.

La prevalencia de osteoporosis en las escasas muestras de pelvis analizadas procedentes de las islas occidentales fue variable. Así los valores de 11.11% obtenidos para Tenerife y 12.5% para El Hierro, fueron bajos (en realidad, sólo un caso en cada isla mostró disminución en la densidad mineral ósea con un VOT francamente osteopénico). En cambio, en las 13 muestras estudiadas de La Palma se encontraron 4 individuos osteoporóticos, con una prevalencia del 30.77%. También se encontró un único caso de osteoporosis en la corta serie de pelvis analizadas de Fuerteventura.



Volumen óseo trabecular (vot, en %) de muestras prehistóricas de pelvis de Gran Canaria (1), Tenerife (2), La Palma (3), El Hierro (4), Fuerteventura (6), y del grupo control (8).



Volumen óseo trabecular (vot, en %) de muestras prehistóricas de tibia derecha de Gran Canaria (1), Tenerife (2), La Palma (4), Fuerteventura (6), El Hierro (7), y del grupo control (8).

En tibia derecha los resultados han mostrado que un 19.05% de la población de Gran Canaria (en un estudio) tenía valores de VOT inferiores a 13.5%, es decir, gravemente osteopénicos, y un 30.40%, valores de VOT por debajo de 15%. El valor medio de VOT en tibia fue de $17.88 \pm 5.20\%$, muy por debajo del valor control ($t=4.37$, $p<0.001$), y fue ligeramente superior en varones que en mujeres. En este estudio se estratificaron los resultados por edad, encontrando que los más jóvenes, si bien tenían niveles de masa ósea superiores a los más viejos, mostraban valores significativamente inferiores a los de la población control.

En un segundo estudio con una muestra más corta, también realizado en tibia derecha, el valor medio de VOT de la muestra de Gran Canaria fue de $16.97 \pm 5.21\%$ es decir, ligeramente inferior (aunque en el mismo rango) que la del estudio anterior.

En claro contraste con estos resultados, el valor medio del VOT en la población de El Hierro analizada mediante estudio de la tibia fue similar al de los controles ($23.5 \pm 5.60\%$), y tan sólo en un caso (2.44%) se detectó disminución en la densidad mineral ósea, es decir, osteopenia, con VOT inferior a 15%. En Fuerteventura tampoco encontramos osteopenia en las muestras de tibia analizadas. El valor medio del VOT fue de $22.99 \pm 8.71\%$.

Con respecto a los estudios radiológicos, encontramos que el VOT guardaba una estrecha relación con el índice córticomedular (CI) ($r=0.43$, $p<0.001$). También por este método radiológico simple se observaron marcadas diferencias entre la población prehispánica (0.2927 ± 0.08) y la población control (0.3601 ± 0.052). Clasificando a la población según sus niveles de masa ósea, y definiendo así osteopenia leve ($VOT= 17.5 - 15\%$), moderada ($VOT= 15 - 12.5\%$) y grave ($VOT < 12.5\%$) calculamos la sensibilidad y especificidad de distintos valores del CI para diagnosticar cada uno de estos grados de osteopenia. Así, encontramos que el CI presentaba una alta proporción (91%) de diagnósticos correctos en casos de osteopenia severa, proporción que disminuía al 81.2% en casos de osteopenia moderada, y al 63.1% en casos de osteopenia leve. Otros estudios llevados a cabo con tomografía computadorizada cuantitativa (TAC) (González-Reimers *et al.*, 2007) o con absorciometría por rayos X de energía dual (DEXA) (González-Reimers *et al.*, 2004) han confirmado los resultados anteriores y refrendado el hallazgo de una alta tasa de osteoporosis en la población prehispánica de Gran Canaria.

Destaca por lo tanto que en la población prehispánica de Gran Canaria se haya encontrado una elevada prevalencia de osteoporosis, con cifras parecidas tanto si se considera la tibia como la cresta iliaca. Como era de esperar, teniendo presente que la tibia es un hueso de carga, los valores de VOT de la tibia son algo superiores a los hallados en la cresta iliaca. También es llamativo el hallazgo de unos índices córticomedulares claramente reducidos con respecto a los valores de la población control,

todo lo cual abunda más en la conclusión de que existía una elevada prevalencia de osteoporosis en la población prehispánica de esta isla. También es destacable la elevada dispersión de los valores de masa ósea, lo que indica que no toda la población estaba afectada por este proceso: más bien al contrario, muchos individuos presentan niveles de masa ósea plenamente en el rango de la normalidad.

Los resultados de la masa ósea difieren según la edad de la muerte de los individuos. Así, los valores de VOT fueron mayores en los individuos más jóvenes. Este resultado, plenamente dentro de lo esperable a tenor de lo comentado en la introducción de este estudio, sirve también de “control de calidad” de la propia técnica, al igual que el hallazgo de cifras similares de prevalencia de osteoporosis en series distintas, determinando masa ósea en lugares distintos, o incluso empleando otras técnicas como la radiología. Es además llamativa la temprana edad de la muerte observada en muchos individuos de Gran Canaria. En efecto, muchas de las sínfisis púbicas analizadas (de gran utilidad para estimar la edad de los individuos) mostraron rasgos que permitieron clasificarlas dentro de los estadios I y II de Suchey y Brooks, y muchas de las tibias presentaron también signos de cierre epifisario reciente.

¿Cómo podemos interpretar los resultados obtenidos para Gran Canaria? Como antes señalamos, la etiología de la osteoporosis es muy variada. Si nos enfrentásemos a una población senil está claro que podríamos achacarla justamente a la edad, como comentamos antes con las denominadas osteoporosis idiopática tipos I y II. Pero no es éste el caso. Fueron muy raros los individuos de Gran Canaria en cuya pelvis se objetivaron grados avanzados de transformación de la sínfisis púbica, y aunque no podemos descartar que alguna tibia perteneciera a individuos seniles, en cualquier caso la proporción hubiera sido muy baja.

Debemos pues centrar nuestra atención en la etiología de la osteoporosis en edades no seniles. Tanto las alteraciones hormonales (cortisol, hormona tiroidea, PTH., etc.) como las enfermedades por alteraciones congénitas de la estructura del hueso son muy raras. El escorbuto es una entidad que deja claras huellas paleopatológicas, que no se han observado en Gran Canaria; el alcohol y los fármacos están descartados. Si bien muchos procesos comunes pueden dar lugar a malabsorción, como la diabetes, las hepatopatías, la celiaquía, enfermedades pancreáticas o síndromes diarreicos crónicos, la prevalencia global de todos ellos en una población no seleccionada es baja, excepto para la diabetes, que además es frecuente en Canarias. En cualquier caso, la osteoporosis afecta sobre todo al diabético tipo 1, que no sobrevive sin insulina, por lo que no cabe considerar a esta entidad en el diagnóstico diferencial.

Nos queda por lo tanto la malnutrición calórico-proteica como mecanismo posible. Gran Canaria estaba densamente poblada en la época

prehispánica (tal vez hasta 30-40 habitantes por kilómetro cuadrado), cifra descomunal si la comparamos con la que existía, por ejemplo, en Castilla en los albores de la Edad Moderna. Sabemos además que la agricultura desempeñaba un papel preponderante en la economía de esta isla, hecho no sólo avalado por las crónicas, sino también por el registro arqueológico, por el estudio de oligoelementos óseos (que arroja elevados niveles de estroncio en hueso), y por los resultados preliminares del estudio del microdesgaste dental. Además, sabemos que la sociedad grancanaria estaba fuertemente jerarquizada, que los señores se encargaban de almacenar el excedente agrícola en grandes silos y repartirlo después entre la población en épocas de hambruna, y que incluso se menciona el infanticidio femenino para controlar el crecimiento demográfico.

La dependencia agrícola de una población tiene graves riesgos desde el punto de vista nutricional, sobre todo si se considera que factores externos como la sequía (no hay que olvidar la localización geográfica y el carácter subdesértico del clima canario) o las plagas de langosta, podrían haber tenido consecuencias devastadoras. Es muy probable que el pueblo llano sufriera en esas circunstancias los efectos de la hambruna, traducándose en una situación de malnutrición episódica, que acarrearía una mortalidad precoz y una elevada prevalencia de osteoporosis.

En El Hierro, una isla mucho menos poblada, y con una economía probablemente más de tipo mixto (hay grandes concheros en varios lugares de la isla, indicativos de un importante marisqueo), la influencia de tales catástrofes naturales fue sin duda menor y eso puede explicar la menor prevalencia de osteoporosis observada.

Además, queremos resaltar aquí, la buena correlación que existe entre la histomorfometría y las técnicas radiológicas. Estas últimas también señalan la existencia de una elevada prevalencia de osteoporosis. Las técnicas radiológicas no sólo refrendan lo obtenido mediante histomorfometría, sino que permiten que el estudio de este importante aspecto paleoantropológico pueda ser abordado con métodos no destructivos.

En resumen, de los estudios presentados se desprende que la prevalencia de osteopenia en la población prehistórica de Gran Canaria es muy elevada, en claro contraste con lo observado en El Hierro. Las series de otras islas son pequeñas, por lo que no podemos extraer conclusiones firmes.

Líneas de Harris

La líneas de Harris, o líneas transversales radio-opacas (ver figura de la página 12), constituyen un hallazgo observado con cierta frecuencia tanto

en poblaciones prehistóricas como actuales, especialmente en países del tercer mundo (Arnay de la Rosa *et al.*, 1994; Mc Henry y Schulz, 1976; Wing y Brown, 1979; Clarke, 1982; Velasco-Vázquez *et al.*, 1999), asociada al consumo de alcohol en la adolescencia (González-Reimers *et al.*, 2007), así como, tanto en el ámbito experimental como clínico, en algunos procesos sistémicos graves (Park, 1964; Acheson, 1959). Se piensa que las líneas de Harris reflejan episodios de detención del crecimiento del hueso secundario en una situación de desequilibrio entre oferta y demanda de nutrientes, aunque la patogenia es controvertida (Hummert y Van Gerven, 1985), y además se ha comprobado que pueden llegar a reabsorberse y desaparecer. No obstante, su presencia en situaciones de malnutrición o en presencia de sustancias que inhiben el crecimiento óseo, como el alcohol, convierte las líneas de Harris en un marcador interesante de eventuales situaciones de desequilibrio entre oferta y demanda de nutrientes durante el periodo de crecimiento.

En un estudio, comparamos las líneas de Harris presentes en 41 tibias derechas procedentes del Barranco del Agua de Dios, en Tegueste (Tenerife) y preservadas en el Instituto Cabrera Pinto, con las de tibias de Gran Canaria, encontrando que la población prehispánica de Gran Canaria presentaba menor cantidad de líneas de Harris ($Z=4.60$, $p<0.001$). En efecto, el número medio de líneas de Harris por individuo fue de 4.95 en la población de Tenerife (con una mediana de 4 y un rango intercuartílico de 1 a 8), mientras que la media de líneas de Harris en la población de Gran Canaria fue de 1.83 (con una mediana de 1 y un rango intercuartílico de 0 a 3). No obstante, el 19.5% de la población de Tenerife no presentó ninguna línea, frente al 15.2% de la población de Gran Canaria. ($X^2=1.4$, NS). En cambio, la proporción sí era significativamente diferente entre ambos grupos con respecto a un porcentaje de individuos con 10 ó más líneas: 17.07% en Tenerife frente al 0.2% en Gran Canaria ($p<0.001$ mediante el test exacto de Fisher). Es decir, la mayor cantidad de líneas de Harris observada en la población de Tenerife obedece sobre todo a una mayor proporción de individuos con muchas líneas de Harris, ya que incluso la proporción de individuos sin ninguna línea es superior en la población de Tenerife, lo que podría sugerir una mayor desigualdad en la disponibilidad de recursos durante el periodo de crecimiento en la población de Tenerife.

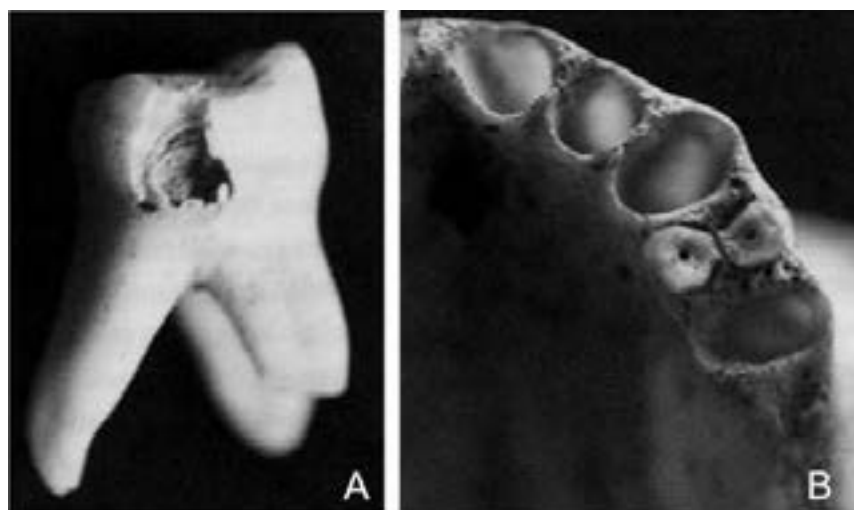
Como colofón a esta primera parte mencionaremos brevemente que la **hipoplasia del esmalte** (ver figura de la página 12) de los dientes aporta una información similar. El esmalte, el tejido más duro del reino animal, consiste también en una matriz proteica sobre la que se depositan cristales de hidroxapatita. Su formación tiene lugar en el periodo infantil, y a diferencia de lo que ocurre en el hueso, no sufre remodelación, por lo que las alteraciones de su formación, que acaecen cuando hay un compromiso

entre oferta y demanda de nutrientes, quedan como impronta indeleble en la superficie del diente.

Paleodieta

El estudio de la dieta consumida por poblaciones pretéritas puede hacerse desde diferentes abordajes. Un grupo de métodos o técnicas están relacionadas con la arqueología e incluyen el análisis de los restos óseos de vertebrados, de peces, malacológicos o de vegetales en yacimientos diversos. Otras técnicas consisten en analizar e identificar el contenido de vasos cerámicos o de restos orgánicos adheridos a otros utensilios como molinos u otras piezas, o, en su defecto, estudiar los esqueletos silíceos o fitolitos, más o menos específicos de ciertos vegetales que pudieran quedar en los artefactos antiguos. En el caso de momias podemos también recurrir al análisis del contenido intestinal. Sobre estos aspectos hay una abundante bibliografía para la prehistoria de Canarias, y magníficos y detallados estudios, pero, como expusimos al principio, revisaremos qué información podemos obtener del análisis del esqueleto, y así nos centraremos en el estudio de las caries, del sarro, del desgaste, los isótopos estables en hueso y los oligoelementos.

La caries dental deriva de la acción lesiva de ácidos orgánicos, especialmente del ácido láctico (Larsen, 1997; Hillson, 2001), los cuales



Detalle de caries (A), que a veces puede llegar a destruir totalmente el diente y provocar su caída (B).

proviene a su vez de la acción bacteriana sobre hidratos de carbono, tanto de tipo polisacárido como oligo- o monosacárido, aunque estos últimos son los más cariogénicos.

Como todo proceso patológico, es el desequilibrio entre agentes patógenos y la integridad estructural del esmalte y la dentina lo que va a condicionar el desarrollo de la lesión cariosa. Por lo tanto, los defectos en la formación de esmalte o dentina predisponen al desarrollo de las caries (Duray, 1990; Larsen *et al.*, 1991, O'Sullivan *et al.*, 1992). Pronto, una pequeña erosión, identificable como un punto marrónáceo (Rudney *et al.*, 1983) o una pequeña depresión donde queda atrapada la así denominada sonda dental permite el anidamiento de gérmenes que quedan más o menos protegidos del flujo salivar y de las catelicidinas o defensinas presentes en la boca. Su proliferación y la continua metabolización de los productos alimenticios generan cada vez mayor cantidad de sustancias ácidas, lo que acelera la progresión de la lesión, que finalmente alcanza la dentina, primero, la pulpa dentaria después, y llega por fin a destruir totalmente al diente, provocando incluso su caída. La invasión bacteriana de la pulpa dentaria propicia que la infección se propague al alveolo y pueda llegar a generar abscesos. No es raro observar lesiones destructivas importantes en cráneos prehispánicos, que a veces incluso perforan el maxilar superior e invaden los senos.

La caries es un proceso asociado inicialmente al consumo de hidratos de carbono (Newbrun, 1982). En estudios paleodietéticos longitudinales se aprecia un aumento de la incidencia de caries en el tránsito hacia la agricultura desde una economía cazadora-recolectora. De hecho, la máxima incidencia se observa en la época actual, posiblemente debido al consumo de azúcares refinados. En la población prehispánica de Chile, como en poblaciones que ocupan diversos espacios temporales en una misma área geográfica, se observa que la incidencia de caries aumenta, guardando un paralelismo con el desarrollo de actividades agrícolas, y alcanza por el contrario un nadir (los valores más bajos) en grupos dedicados a la pesca (Kelley *et al.*, 1991).

En las islas Canarias tenemos el ejemplo de Gran Canaria, donde encontramos una altísima incidencia de caries, especialmente en la población inhumada en cuevas, que supera a la incidencia encontrada en la población costera inhumada en túmulos (Delgado-Darias *et al.*, 2005). En poblaciones consumidoras casi exclusivamente de pescado o mamíferos marinos no suele haber caries, como ocurre en los esquimales (Costa, 1980); este tipo de dieta es incluso cariostático.

El sarro, también denominado cálculo o tártaro, es una estructura en la que cabe distinguir componentes orgánicos e inorgánicos. Entre los primeros cuentan los restos celulares, restos de alimentos, bacterias y

componentes proteináceos de la saliva, mientras que los segundos están formados por sales cálcicas que se depositan sobre esta matriz (Jin y Yip, 2002).



Acumulación de sales de calcio y fósforo sobre la superficie dental, conocida como sarro.

Este depósito de sales cálcicas parece derivar de la actividad de las células fagocíticas encargadas de la defensa frente a estas bacterias, que liberan proteínas fijadoras de calcio, produciéndose la mineralización por precipitación de sales cálcicas (Kido *et al.*, 1997). Flujo salivar y pH de la saliva influyen en la saturación de estas sales cálcicas, y ambos factores dependen de la dieta, que a su vez puede contener más o menos calcio. Por este motivo, el depósito de sarro se relaciona sin duda con la dieta (Littleton y Fröhlich, 1989; Whittaker *et al.*, 1998), aunque no está en absoluto claro qué patrón dietético genera más o menos sarro. Algunos estudios sugieren que una dieta cárnica puede promover su aparición, sin embargo, otros no lo avalan. Sin duda, la falta de higiene es importante. Además, el tabaco es un clásico factor asociado (Axelsson *et al.*, 1998). Los estudios realizados hasta ahora arrojan resultados muy diversos. Lo cierto es que, en nuestro medio, un 88.51% de la población prehispánica de Gran Canaria presenta diversos grados de sarro (Delgado-Darias *et al.*, 2006), más frecuente en la población costera, inhumada en túmulos, que en la inhumada en cuevas, y,

desde luego, guarda relación con la enfermedad periodontal (inflamación o infección que ataca las encías y el hueso que mantiene los dientes en su lugar).

El **desgaste dental** es otra patología fuertemente dependiente de la dieta, aunque hay muchos más factores involucrados, como la fluorosis (Schultz *et al.*, 1998), el reflujo gastroesofágico (Lazarchik y Filler, 2000), el hábito de fumar (Axelsson *et al.*, 1998), y el consumo de anfetaminas (Richards y Brofeldt, 2000; Duxbury, 1993) y otras drogas (Krutchkoff *et al.*, 1990).



Desgaste dental, que llega incluso a exponer la cavidad pulpar.

Frente a un desgaste en exceso se produce una respuesta del hueso del alveolo dentario, empujando hacia arriba el diente desgastado, de tal manera que pueda seguir contactando durante la masticación con el diente correspondiente de la otra arcada dentaria. Este proceso, conocido como “erupción continuada” va exponiendo cada vez mayor cantidad de cemento. El desgaste intenso puede llegar incluso a provocar la pérdida de piezas dentarias, aunque esto es, con mucho, más frecuente en la enfermedad periodontal. El consumo de dietas que precisen un largo periodo de masticación, con un cierto componente de rotación de la arcada mandibular

sobre el maxilar va a generar un mayor grado de desgaste. La remodelación alveolodentaria que provoca este proceso modifica ligeramente el plano oclusal al nivel de los molares, lo que ha permitido también utilizar este parámetro para diferenciar individuos cazadores-recolectores de individuos dependientes de una economía agrícola (Smith, 1984).

Sin duda, a mayor edad, mayor desgaste. Este fenómeno permite estimar la edad de la muerte a partir del desgaste dental (Ubelaker, 1989). No obstante, también influyen otros factores. En un estudio realizado en 138 pacientes ingresados en el HUC, se observó mediante análisis de regresión logística, que la edad, pero también la higiene dental, influyeron de forma significativa e independiente en el desgaste dental, siendo más importante la higiene dental que la edad en el caso del desgaste en premolares y caninos (González-Reimers *et al.*, 2006). Una pobre higiene dental se asocia a un crecimiento excesivo de bacterias (sobre todo gram + anaerobios), lo que produce un descenso del pH salivar, que puede facilitar el desgaste, de modo similar a como lo hace el reflujo gastroesofágico (Shaw *et al.*, 1998), aunque el papel del pH ácido sobre el desgaste es aún discutido (Barlett *et al.*, 1998).

Isótopos estables.- En general, su importancia radica en que se trata de isótopos (elementos con idéntico número atómico, o sea, con el mismo número de protones en su núcleo, pero distinta masa atómica, es decir, distinto número de neutrones en su núcleo) que no tienden a decaer espontáneamente, es decir, que no emiten radiactividad, y cuya concentración, por lo tanto, se mantiene constante a lo largo del tiempo. En la naturaleza, diversos elementos de interés biológico (carbono, nitrógeno, oxígeno, azufre) están presentes en forma de diversos isótopos, aunque siempre la abundancia de uno de ellos es muy superior a la de los otros. En la tabla de la página 32, basada en Katzenberg (2000) reflejamos los valores medios presentes en la naturaleza de diferentes isótopos.

La relevancia de los isótopos en estudios paleodietéticos estriba en que su metabolismo difiere ligeramente según su peso atómico. Por lo general, los isótopos más pesados suelen reaccionar más lentamente, y los ligeros tienden a eliminarse con mayor facilidad. Además, especies vegetales distintas difieren en la vía metabólica utilizada para sintetizar sustancias que contengan carbono; las características de estas vías metabólicas ejercen un efecto discriminatorio mayor o menor sobre los isótopos de carbono. El resultado final es que la proporción de isótopos en las plantas es distinta de la presente en la atmósfera, y esta proporción se mantiene a lo largo de la cadena trófica. La cantidad relativa de un isótopo minoritario presente en una muestra se puede calcular con facilidad, ya que se han definido, por convención, unos patrones o estándares que sirven de referencia. Así, por

ejemplo para el carbono (C), una vez medida la cantidad relativa del isótopo pesado y del ligero se calcula un “delta” aplicando la fórmula:

$$\text{Delta (en ‰)} = \left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ muestra} - ^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ del estándar}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ del estándar}} \right) \times 1000$$

Así se vio que, por ejemplo, el maíz fija el carbono utilizando una vía metabólica (Hatch-Slack o C4) diferente de la usada por el trigo y otros cereales más propios de clima templado, que utilizan la vía C3. Por eso estas plantas, aunque tienen menos ^{13}C [delta-13(C) = -9 a -14 ‰] que la atmósfera [delta-13(C) = -7‰], tienen más que las plantas C-3 de climas templados [delta-13(C) = -20 a -35‰] (Katzenberg, 2000). Otras plantas, como las CAM (Crasuláceas) tienen valores intermedios. Como hemos dicho, esta proporción se mantiene en la cadena trófica, pero en el colágeno humano los valores son siempre un 5‰ superiores (Van der Merwe y Vogel, 1978). Los animales marinos, por otra parte, utilizan como fuente de C de los carbonatos disueltos. Por definición, ya que el estándar es precisamente un carbonato marino, su delta-13(C) es 0; en cambio, en general, la fuente de C de los animales terrestres es el aire, cuyo delta-13(C) es -7‰. Por eso puede diferenciarse también el consumo de productos marinos del de productos terrestres (Blake *et al.*, 1992).

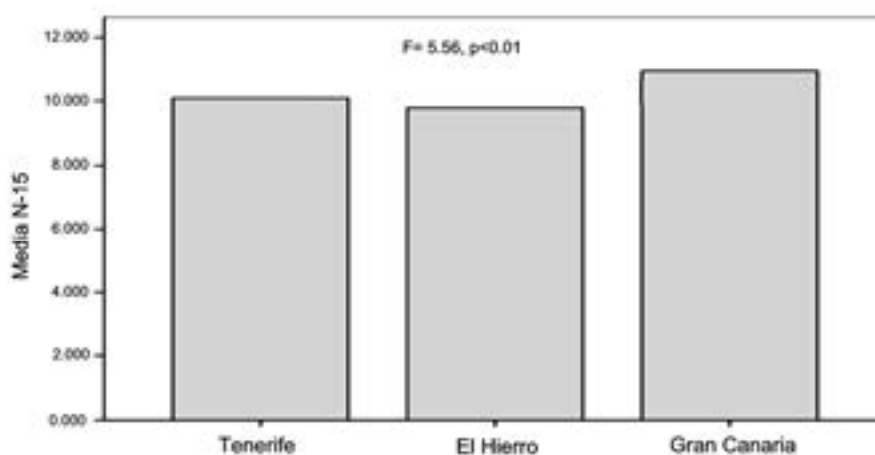
Abundancia relativa de distintos isótopos de elementos de importancia biológica

Elemento	Isótopo	Abundancia (%)
Carbono	^{13}C	1.11
	^{12}C	98.89
Nitrógeno	^{14}N	99.63
	^{15}N	0.37
Oxígeno	^{16}O	99.759
	^{17}O	0.037
	^{18}O	0.204
Azufre	^{32}S	95.00
	^{33}S	0.76
	^{34}S	4.22
	^{36}S	0.014
Estroncio	^{84}Sr	0.56
	^{86}Sr	9.86
	^{87}Sr	7.02
	^{88}Sr	82.56

Inicialmente, el delta-13(C) se determinó en colágeno del hueso (Ambrose, 1990), utilizando el C de los aminoácidos, lo que requería una muestra grande y la extracción previa de colágeno. Actualmente se hace en hueso o diente utilizando el C de los carbonatos. Pero la información obtenida de cada una de estas procedencias no es exactamente la misma: las sales de carbonato cálcico han sido fabricadas con cualquier C ingerido; sin embargo, como el colágeno tiene numerosos aminoácidos esenciales, que necesariamente tuvieron que ser ingeridos, su delta-13(C) más bien refleja la de la ingesta proteica (Katzenberg, 2000).

Otros isótopos estables analizados son los del nitrógeno (N). Aquí el estándar es el nitrógeno atmosférico, que en un 99.63% es ^{14}N . Plantas como las leguminosas, en virtud de su relación simbiótica con determinadas bacterias, utilizan una mayor proporción de N atmosférico que plantas no leguminosas, que utilizan nitratos y otras sales de nitrógeno presentes en el suelo. Por lo tanto, el delta-15(N) de las primeras es cercano a 0, mientras que es más alto en las segundas (Brill, 1977). Los herbívoros poseen un delta-15(N) que es un 3‰ superior, mientras que los carnívoros se enriquecen aún más en ^{15}N . También hay diferencias con este elemento entre el medio marino (valores superiores) y el terrestre (Schoeninger *et al.*, 1983; Walker y de Niro, 1986).

Con el objetivo de profundizar en el conocimiento paleodietético hemos analizado, en muestras de individuos inhumados en Las Cañadas el contenido (en colágena ósea) de ^{13}C y ^{15}N . Los resultados de los que disponemos en la actualidad muestran un contenido de ^{13}C bajo (lo que sugiere consumo de plantas C-3, por ejemplo cereales) y un contenido de ^{15}N que sugiere que estas plantas no son leguminosas. El aporte cárnico, según estos datos, parece escaso.



Contenido medios en el isótopo ^{15}N en huesos de Tenerife, El Hierro y Gran Canaria.

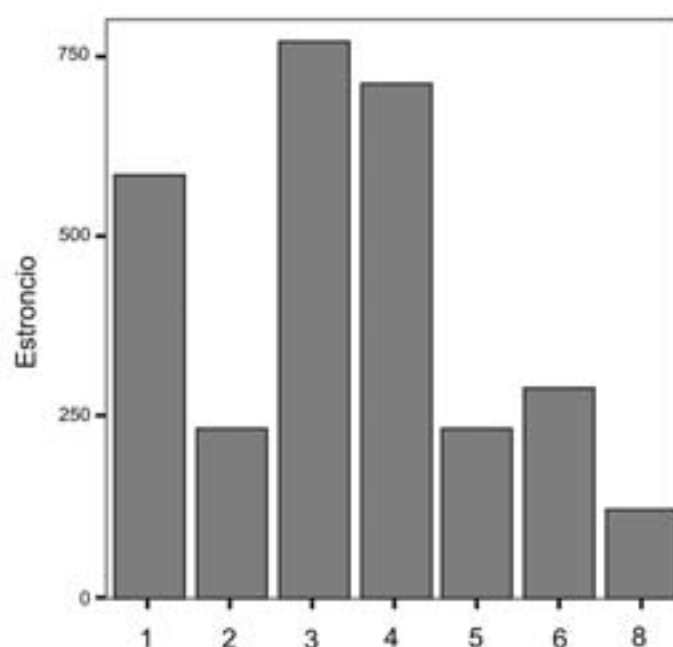
Oligoelementos en hueso.- Es éste otro abordaje, más clásico, de los estudios paleodietéticos (Ezzo, 1994). Inicialmente se observó que si bien las plantas absorbían una proporción fija del estroncio (Sr) presente en el suelo, y la acumulaban en sus tejidos, los animales discriminaban el estroncio frente al calcio en su intestino: este fenómeno era el responsable de que en el herbívoro hubiera una concentración tisular de Sr inferior a la de la planta. Cuando un herbívoro era devorado por un carnívoro, en el intestino de éste volvía a producirse la misma discriminación a la que antes aludíamos, por lo que ahora las concentraciones de estroncio en los tejidos del carnívoro eran muy inferiores a las del herbívoro. Por lo tanto, el estroncio permite discriminar entre dieta vegetariana y no vegetariana. Además, el estroncio se deposita preferencialmente en hueso, motivo por el cual es de especial utilidad en el estudio paleonutricional. Además, su vida media es larga y su utilidad metabólica, escasa. Todas estas características lo convierten, en principio, en un buen indicador del tipo de dieta.

Se vio además que el contenido de estroncio en alimentos procedentes del medio marino era elevado, lo cual a su vez le añadió una nueva utilidad: diferenciar consumo de alimento de origen terrestre de los derivados del medio marino. Sin embargo, añadió un factor de confusión: no todos los valores elevados de estroncio óseo correspondían a una dieta vegetal; podían ser también de origen marino. Pronto, otro elemento químico ayudó a solucionar este problema. El bario (Ba), de escasa solubilidad y muy pobre en el medio marino, tiene un metabolismo paralelo al del estroncio, sólo que es aún más discriminado en intestino. Por eso, calculando el índice bario / estroncio (Ba/Sr) es posible discernir entre consumo de dieta vegetal (con índice normal, con Sr y Ba altos) y dieta marina (índice Ba/Sr bajo). En el consumo de dieta cárnica el índice puede ser normal o incluso alto, ya que alimentos cárnicos pueden contener mucho bario, pero el estroncio óseo es, por lo general, bajo. Así, si lo expresamos de forma logarítmica (log), un log Ba/Sr con valores entre 0 y -0.4 indica consumo de dieta de origen terrestre, mientras que un log entre -1.4 y -1.8 indica consumo de dieta marina.

Esta es la principal utilidad de los oligoelementos como indicadores paleodietéticos (Balter, 2004), aunque hemos de matizar que estudios llevados a cabo por nuestro grupo demuestran también que el defectuoso aporte calórico-proteico se asocia a un incremento de los niveles de estroncio óseo, tal vez al atenuarse el efecto inhibitorio del calcio dietético sobre su absorción (González-Reimers *et al.*, 2004).

Al estudiar los oligoelementos hay que tener presente las modificaciones que se pueden haber producido en los restos después del enterramiento, es decir, las alteraciones diagenéticas (Fabig y Herrmann, 2002). Afortunadamente en Canarias tenemos en ese sentido una ventaja añadida, que es la costumbre prehispánica, ampliamente generalizada, de no

enterrar los cadáveres, sino depositarlos en cuevas más o menos secas, lo que minimiza el cambio diagenético, aunque no lo excluye del todo. Estudios llevados a cabo por nosotros en la población prehispánica de varias islas ponen de manifiesto unos elevados niveles de estroncio en la población prehispánica de Gran Canaria (González-Reimers y Arnay-de-la-Rosa, 1992), y un índice Ba/Sr que es significativamente más bajo en la población inhumada en los túmulos costeros que en la inhumada en las cuevas del interior, en concordancia con la mayor prevalencia de exóstosis (formación de nuevo hueso en la superficie de un hueso) auriculares entre los primeros (Velasco-Vázquez *et al.*, 2000). Más recientemente hemos visto que la proporción de dientes con caries y/o con sarro se relaciona con el índice Ba/Sr en una muestra de la Iglesia de La Concepción.



Estroncio óseo en restos prehispánicos procedentes de diferentes islas: Gran Canaria (1), Tenerife (2), La Palma (3), El Hierro (4), Fuerteventura (5) y Gomera (6). Los valores del grupo 8 corresponden a los controles.

Por lo que hemos expuesto sucintamente, a partir del esqueleto, existen multitud de abordajes posibles para inferir la dieta consumida. Los resultados obtenidos aplicando los métodos aludidos deben ser contrastados con la información derivada de otros métodos útiles para inferir la paleodieta, como comentamos al inicio de la presente revisión.

Referencias

- ACHESON, R.M. (1959). The effect of starvation, septicaemia, and chronic illness on the growth of cartilage plate and metaphysis of the immature rat. *J. Anat.* 93: 123-130.
- AGARWAL, S.C. & M.C.GRYNPASS (1996). Bone quantity and quality in past populations. *Anat. Record* 246: 423-432
- AMBROSE, S.H. (1990). Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis. *J. Archaeol. Sci.* 17: 431-451.
- ARNAY-DE-LA-ROSA, M., E. GONZÁLEZ-REIMERS, A. CASTILLA-GARCÍA *et al.* (1994). Radiopaque transverse lines (Harris lines) in the prehispanic population of El Hierro (Canary Islands). *Ant. Anzeiger* 52: 53-57.
- AXELSSON, P., J. PAULANDER & J. LINDHE (1998). Relationship between smoking and dental status in 35-, 50-, 65-, and 75-year-old individuals. *J. Clin. Periodontol.* 25: 297-305.
- BALTER, V. (2004). Allometric constraints on Sr/Ca and Ba/Ca partitioning in terrestrial mammalian trophic chains. *Oecologia* 139: 83-88.
- BARLETT, D.W., P.Y. COWARD, C. NIKKAH *et al.* (1998). The prevalence of tooth wear in a cluster sample of adolescent schoolchildren and its relationship with potential explanatory factors. *Br. Dent. J.* 184: 125-129.
- BENNIKE, P. & H. BOHR (1990). Bone mineral content in the past and present. En: Christiansen C, Overgaard K, editors. *Third International Symposium on Osteoporosis*. Copenhagen: Osteopress. p. 89-91.
- BENNIKE, P, H. BOHR & T. TOFT (1993). Determination of mineral content and organic matrix in bone samples using dual photon absorptiometry. *Int. J. Anthropol.* 8: 111-116.
- BLAKE, M., B.S. CHISHOLM, J.E. CLARK *et al.* (1992). Prehistoric subsistence in the Soconusco region. *Current Anthropol.* 33: 83-94.
- BLAKE, G.M., C.C. GLÜER & I. FOGELMAN (1997). Bone densitometry: current status and future prospects. *Br. J. Radiol.* 70: 177-186.
- BOURRIN, S., A., TOROMANOFF, P. AMMAN *et al.* (2000) Dietary protein deficiency induces osteoporosis in aged male rats. *J. Bone Miner. Res.* 15: 1555-1563.
- BRILL, W. (1977). Biological nitrogen fixation. *Scientific Am.* 236: 68-74.
- CLARKE, S.K. (1982). The association of early childhood enamel hypoplasias and radiopaque transverse lines in a culturally diverse prehistoric skeletal sample. *Human Biol.* 54: 77-84.

- COSTA, R.L. (1980). Incidence of caries and abscesses in archaeological Eskimo skeletal samples from Point Hope and Kodiak Island, Alaska. *Am. J. Phys. Anthropol.* 52: 501-514.
- DELGADO DARIAS, T., J. VELASCO VÁZQUEZ, M. ARNAY-DE-LA-ROSA *et al.* (2005). Dental caries among the prehispanic population from Gran Canaria. *Am. J. Phys. Anthropol.* 128: 560-568.
- DELGADO-DARIAS, T., J. VELASCO-VÁZQUEZ, M. ARNAY-DE-LA-ROSA *et al.* (2006). Calculus, periodontal disease and tooth decay among the prehispanic population from Gran Canaria. *J. Archaeol. Sci.* 33: 663-670.
- DEWEY, J., M. BARTLEY & G. ARMELAGOS (1969). Femoral cortical involution in three Nubian archaeological populations. *Hum. Biol.* 41:13-28.
- DUPPE, H., P.GARDESELL, O. JOHNNELL *et al.* (1997). Bone mineral density, muscle strength and physical activity. A population based study of 332 subjects aged 15-42 years. *Acta Orthop. Scand.* 68: 97-103.
- DURAY, S.M. (1990). Deciduous enamel defects and caries susceptibility in a prehistoric Ohio population. *Am. J. Phys. Anthropol.* 81: 27-34.
- DUXBURY, A.J. (1993). Ecstasy-dental implications. *B. Dent. J.* 175: 38.
- ERIKSEN, M.F. (1976). Cortical bone loss with age in three native american populations. *Am. J. Phys. Anthropol.* 45: 443-452.
- ERIKSEN, E.F. & B.L. LANGDAHL (1997). The pathogenesis of osteoporosis. *Horm. Res.* 48 (Suppl 5): 78-82.
- EZZO, J.A. (1994). Zinc as a paleodietary indicator: an issue of theoretical validity in bone chemistry analysis. *Am. Antiq.* 59: 606-621.
- FABIG, A. & B. HERRMANN (2002). Trace elements in buried human bones: intrapopulation variability of Sr/Ca and Ba/Ca ratios –diet or diagenesis? *Naturwissenschaften* 89: 115-119.
- FARQUHARSON, M.J., R.D. SPELLER & M. BRICKLEY (1997). Measuring bone mineral density in archaeological bone using energy dispersive low angle X-ray scattering techniques. *J. Archaeol. Sci.* 24: 765-772.
- GARCÍA TALAVERA, F. (1992). La estatura de los guanches. “*Proceedings of the 1st World Congress on mummy studies*”, Cabildo de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife, pp. 177-186.
- GONZÁLEZ-REIMERS, E., M. ARNAY-DE-LA-ROSA, L. GALINDO-MARTÍN *et al.* (1988). Trabecular bone mass and bone content of diet related trace elements among the prehispanic inhabitants of the Western Canary Islands. *Human Evolution* 6:177-188.
- GONZÁLEZ-REIMERS, E. & M. ARNAY-DE-LA-ROSA (1992). Ancient skeletal remains of the Canary Islands: Bone histology and chemical analysis. *Ant. Anzeiger* 50: 201-215.

- GONZÁLEZ-REIMERS, E., J. VELASCO-VÀZQUEZ, M. ARNAY-DE-LA-ROSA *et al.* (1998). The corticomedular index of the right tibia in the diagnosis of osteoporosis in prehistoric skeletal remains. *Am. J. Hum. Biol.* 10: 37-44.
- GONZÁLEZ-REIMERS, E., J. VELASCO-VÀZQUEZ, M. ARNAY-DE-LA-ROSA *et al.* (2000). Sex determination by discriminant function analysis of the right tibia in the prehispanic population of the Canary Islands. *Forensic Sci. Int.* 108: 165-172.
- GONZÁLEZ-REIMERS, E., A. MAS PASCUAL, M. ARNAY-DE-LA-ROSA *et al.* (2004). Non-invasive estimation of bone mass in ancient vertebrae. *Am. J. Phys. Anthropol.* 125: 121-131.
- GONZÁLEZ-REIMERS, E., R. MARTÍN-OLIVERA, A. LÓPEZ-LIROLA *et al.* (2004). Effects of low protein diet and caloric restriction on strontium metabolism. *Trace Elem. Electrol.* 21: 257-261.
- GONZÁLEZ-REIMERS, E., A. ARESTÉ PITZALIS & M. ARNAY-DE-LA-ROSA (2006). Pérdida antemortem de piezas dentarias en una muestra de población canaria. *Anuario del Instituto de Estudios Canarios* 49: 73-80.
- GONZÁLEZ-REIMERS, E., J. VELASCO-VÀZQUEZ, M. ARNAY-DE-LA-ROSA *et al.* (2007). Quantitative computerized tomography for the diagnosis of osteopenia in prehistoric skeletal remains. *J. Archaeoll. Sci.* 34: 554-561.
- GONZÁLEZ-REIMERS, E., A. PÉREZ RAMÍREZ, F. SANTOLARIA-FERNÁNDEZ *et al.* (2007). Association of Harris lines and shorter stature with ethanol consumption during growth. *Alcohol* 41: 511-515.
- HAMMERL, J. R. PROTSCH, J. HAPP *et al.* (1991). Osteodensitometrie des Femurhalses an historischen Skeletten. En: Werner E, Mathias H, editors. *Osteologie interdisziplinär*. Berlin: Springer Verlag. p. 139-142.
- HILLSON, S. (2001). Recording dental caries in Archaeological human remains. *Int. J. Osteoarchaeol.* 11: 249-289.
- HOOTON, E.A. (1925). The ancient inhabitants of the Canary Islands. En "Harvard African Studies" vol VII, Cambridge (Mass).
- HUMMERT, J.R. & D.P. VAN GERVEN (1985). Observations on the formation and persistence of radiopaque transverse lines. *Am. J. Phys. Anthropol.* 66: 297-306.
- HUSS-ASHMORE, R. (1978). Nutritional determination in a Nubian skeletal population. *Am. J. Phys. Anthropol.* 48: 407.
- ILICH, J.Z., M. SKUGOR, T. HANGARTNER *et al.* (1998). Relation of nutrition, body composition and physical activity to skeletal development: a cross-sectional study in preadolescent females. *J. Am. Coll. Nutr.* 17: 136-147.

- JIN, Y. & H.K. YIP (2002). Supragingival calculus: formation and control. *Crit. Rev. Oral Biol. Med.* 13: 426-441.
- KATZENBERG, M.A. (2000). Stable isotope analysis: a tool for studying past diet, demography, and life history. En M.A. Katzenberg, S.R. Saunders (eds.) *Biological Anthropology of the Human Skeleton*. Wiley-Liss, New York, pp: 305-327.
- KELLEY, M.A., D.R. LEVESQUE & E. WEIDL (1991). Contrasting patterns of dental disease in five early Northern Chilean groups. En M.A. Kelley & C.S. Larsen (eds.) *Advances in Dental Anthropology*. New York: Wiley-Liss. p: 203-213.
- KIDO, J., S. NISHIKAWA, H. ISHIDA *et al.* (1997). Identification of calprotectin, a calcium binding leukocyte protein, in human dental calculus matrix. *J. Periodont Res.* 32: 355-361.
- KLEPINGER, L. (1984). Nutritional assessment from bone. *Ann. Rev. Anthropol.* 13: 75-96.
- KNEISSEL, M., A. BOYDE, M. HAHN *et al.* (1994). Age- and sex-dependent cancellous bone changes in a 4000y BP population. *Bone* 15: 539-545.
- KRUTCHKOFF, D.J., E. EISENBERG, J.E. O'BRIEN *et al.* (1990). Cocaine-induced dental erosions. *N. Eng. J. Med.* 322: 408
- LARSEN, C.S. (1997). *Bioarchaeology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- LAZARCHIK, D.A. & S.J. FILLER (2000). Dental erosion; predominant oral lesion in gastroesophageal reflux disease. *Am. J. Gastroenterol.* 95 (supp 8): S33-S38.
- LEES, B., T. MOLLESON, T.R. ARNETT *et al.* (1993). Differences in proximal femur bone density over two centuries. *Lancet* 341: 673-675.
- LITTLETON, J. & B. FROHLICH (1989). An analysis of dental pathology and diet on historic Bahrain. *Paléorient* 15: 59-84.
- MARSHALL, D. O. JOHNNELL & H. WEDEL (1996). Meta-analysis of how well measures of bone mineral density predict occurrence of osteoporotic fractures. *BMJ* 312: 1254-1259.
- MARTIN, D.L., A.H. GOODMAN & G.L. ARMELAGOS (1985). Skeletal pathologies as indicators of quality of diet. En: Gilbert R. & J.H. Mielke (eds) *The analysis of prehistoric diets*. Orlando: Academic Press. p. 227-279.
- MC HENRY, H.M. & P.D. SCHULZ (1976). The association between Harris lines and enamel hypoplasia in prehistoric Californian Indians. *Am. J. Phys. Anthropol.* 49: 507-511.
- NEWBRUN, E. (1982). Sugar and dental caries: a review of human studies. *Science* 217: 418-423.

- O'SULLIVAN, E.A., S.A.WILLIAMS & M.E. CURZON (1992). Dental caries in relation to nutritional stress in early English child populations. *Pediatr. Dent.* 14: 26-29.
- PARK, E.A. (1964). Imprinting of nutritional disturbances on growing bone. *Pediatrics* 33: 915-918.
- PARSONS, T.J., M. VAN DUSSELDORP, M. VAN DER VLIET *et al.* (1997). Reduced bone mass in Dutch adolescents fed a macrobiotic diet in early life. *J. Bone Miner. Res.* 12: 1486-1494.
- PFEIFFER, S. (2000). Paleohistology: health and disease. En: Katzenberg & S.R. Saunders (eds.) *Biologic Anthropology of the human skeleton*. New York: Wiley-Liss. p. 287-302.
- RICHARDS, J.R. & B.T. BROFELDT (2000). Patterns of tooth wear associated with metamphetamine use. *J. Periodontol.* 71: 1371-74.
- RUDNEY, J.D., R.V. KATZ & J.W. BRAND (1983). Interobserver reliability of methods for paleopathological diagnosis of dental caries. *Am. J. Phys. Anthropol.* 62: 243-248.
- SCHOENINGER, M.J., M.J. DENIRO & H. TAUBER (1983). Stable nitrogen isotope ratios of bone collagen reflect marine and terrestrial components of prehistoric human diet. *Science* 220: 1381-1383.
- SCHULTZ, M., U. KIERDORF, F. SEDLACEK *et al.* (1998). Pathological bone changes in the mandibles of wild red deer (*Cervus elaphus* L.) exposed to high environmental levels of fluoride. *J. Anat.* 193: 431-442.
- SCHURCH, M.A., R. RIZZOLI, D. SLOSMAN *et al.* (1998). Protein supplementation increase insulin-like growth factor-I levels and attenuates proximal femur bone loss in patients with recent hip fractures. A randomized, double-blind, placebo-controlled study. *Ann. Intern. Med.* 128: 801-809.
- SCHWIDETZKY, I. (1963). La población prehispánica de las Islas Canarias. Publicaciones Museo Arqueológico, Santa Cruz de Tenerife.
- SHAW, L., S. WEATHERHILL & A. SMITH (1998). Tooth wear in children: an investigation of etiological factors in children with cerebral palsy and gastroesophageal reflux. *J. Dent. Child.* 65: 484-486.
- SILVENTOINEN, K. (2003). Determinants of variation in adult body height. *J. Biosoc. Sci.* 35: 263-285.
- SMITH, B.H. (1984). Patterns of molar wear in hunter-gatherers and agriculturalists. *Am. J. Phys. Anthropol.* 63: 39-56.
- SMITH, E.L. & C. GILLIGAN (1991). Physical activity effects on bone metabolism. *Calcif. Tissue Int.* 49: S50-S54.
- UBELAKER, D.H. (1989). *Human skeletal remains*. Taraxacum, Washington.

- VAN DER MERWE, N.J. & J.C. VOGEL (1978). ^{13}C content of human collagen as a measure of prehistoric diet in Woodland North America. *Nature* 276: 815-816.
- VELASCO-VÁZQUEZ, J., A. BETANCOR-RODRÍGUEZ, M. ARNAY-DE-LA-ROSA *et al.* (2000). Auricular exostoses among the prehispanic population from Gran Canaria. *Am. J. Phys. Anthropol.* 112: 49-55.
- VELASCO-VÁZQUEZ, J., E. GONZÁLEZ-REIMERS, M. ARNAY-DE-LA-ROSA *et al.* (1999). Bone histology of prehistoric inhabitants of the Canary Islands: comparison between El Hierro and Gran Canaria. *Am. J. Phys. Anthropol.* 110: 201-214.
- VELASCO-VÁZQUEZ, J., E. MARTÍN RODRÍGUEZ, M. ARNAY-DE-LA-ROSA *et al.* (1999). Harris lines in the prehispanic population of Gran Canaria (Canary Islands). *Human Evol.* 14: 169-173.
- VERNEAU, R. (1887). La taille des anciens habitants des Iles Canaries. *Rev. d'Anthropologie* 3: 641-657.
- WALKER, P.L. & M.J. DENIRO (1986). Stable nitrogen and carbon isotope ratios in bone collagen as indices of prehistoric dietary dependence on marine and terrestrial resources in southern California. *Am. J. Phys. Anthropol.* 71: 51-61.
- WHITTAKER, D.K., T. MOLLESON & T. NUTTALL (1998). Calculus deposits and bone loss on the teeth of Romano-British and eighteenth-century Londoners. *Arch. Oral Biol.* 43: 941-948.
- WING, E.S. & A.E. BROWN. (1979). *Paleonutrition*. Orlando (Fda): Academic Press.

2. Estudiando a los chascones, récord de biodiversidad en Canarias

Antonio Machado Carrillo

Doctor en Biología

El propósito primario de este artículo es poner en evidencia que, por razones históricas, el conocimiento que atesoramos sobre la biodiversidad en islas como Canarias o Madeira dista mucho de ser completo y sólido. En cuestiones de conservación hay que manejarse con la mejor información organizada, y Canarias ha hecho un esfuerzo sin precedentes para tenerla disponible (Programa Biota). Sin embargo, en muchos grupos la información acumulada no es todo lo buena que debería ser y aboga por no avanzar conclusiones definitivas sobre amenazas o eventuales impactos del cambio climático, en tanto no se consolide su conocimiento. El ejemplo de los coleópteros del género Laparocerus o chascones aquí expuesto, apoya esta llamada a la cautela, y tiene además un segundo propósito. Se explica en lenguaje llano y desenfadado, pero con cierto detalle, cómo se estudia la biodiversidad en su basamento, que lo constituyen las especies. Y éstas, las conocemos o no las conocemos. Se pretende contribuir a divulgar el oficio de taxónomo que pocos tienen presente, y que, de un tiempo a esta parte, muestra síntomas de regresión preocupantes. Necesitamos taxónomos que aseguren el andamiaje de la biodiversidad, y se requieren con urgencia, pues cada vez se toman más y más decisiones –trascendentes para la sociedad– que se basan en especies biológicas. Exponemos, en definitiva, como un esfuerzo de estudio sistemático cambia sensiblemente el panorama del conocimiento actual, e invita a la reflexión.

La biodiversidad, una idea novedosa

El concepto de biodiversidad, una contracción de los términos diversidad biológica, es relativamente reciente y fue acuñado por Walter Rosen con motivo de un congreso sobre el particular celebrado en Washington DC en 1980. Su expansión y éxito han sido imparables, como refleja el número creciente de registros localizables con Google en Internet: 40.000 (1996), 100.000 (1998), 3.200.000 (2004) y 17.300.000 (2008).

Además del obvio interés que la diversidad de la vida tiene para los biólogos, la rápida asimilación del concepto de biodiversidad por parte de la sociedad en general, y clase política, en particular, deriva de la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente de 1992, más conocida por la Cumbre de Río. En ella se aprobó el Convenio sobre la Diversidad Biológica –que en jerga coloquial ya se trataba como biodiversidad– aportando una visión muy novedosa. La biodiversidad no es ya una mera cualidad de la vida, sino el objeto mismo –las especies, los genes y los ecosistemas– es decir, algo patrimonializable; en definitiva un recurso de las naciones.

Bajo esta perspectiva más interesada y utilitarista, la preocupación por la biodiversidad adquirió un renovado impulso. La Unión Europea, por ejemplo, se comprometió a detener la pérdida de biodiversidad en el territorio comunitario para el año 2010. Paralelamente, los estudios sobre biodiversidad pasaron a un estrellato sin precedentes. Proyectos de investigación sobre determinada fauna y flora locales que no encontraban financiación, recibían todos los parabienes con simplemente cambiar el título y sustituir fauna y flora por biodiversidad (sin engañar a nadie). Las naciones se lanzaron a inventariar el nuevo recurso, a localizar los centros donde se concentran las especies, a sondear su potencial biotecnológico.

En este contexto, los archipiélagos oceánicos como Hawaii, las Galápagos o Canarias, adquieren un protagonismo relevante, no precisamente por contener muchas especies –las selvas tropicales son imbatibles– sino porque una alta proporción de las especies que albergan son endémicas, es decir, exclusivas de las islas y únicas en el mundo.

La biota silvestre de Canarias se ha estimado en unas 14.500 especies terrestres, correspondiendo la mayoría a los animales y dentro de estos a los insectos, lo que es un simple reflejo de las proporciones que se dan a nivel mundial. A su vez, los escarabajos o coleópteros, son los que cuentan con más especies (unas dos mil en Canarias) y dentro de este orden zoológico, el grupo más diverso es la familia de los curculiónidos o gorgojos. No por casualidad, al ser interrogado sobre Dios, John B.S. Haldane apostilló que “debía tener una desmedida afición por los escarabajos”. Sin lugar a dudas, los coleópteros son los campeones de la biodiversidad.

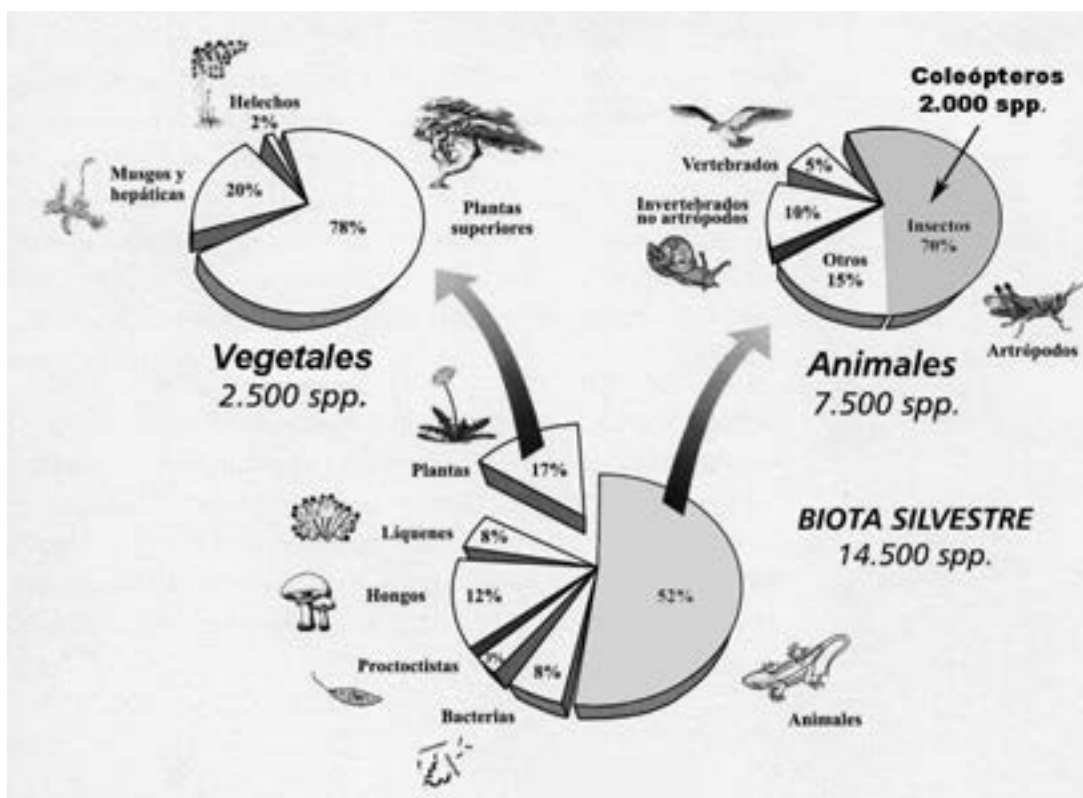


Fig. 1. Estima de la biota silvestre de las islas Canarias (según Machado, 1998, parcialmente modificado).

Las estadísticas más recientes arrojan una cifra de 1.267 especies y subespecies endémicas, pero este número dista de ser definitivo. Precisamente, el propósito del presente artículo es explicar sin excesivos tecnicismos cómo se llega a conocer la biodiversidad local, cómo se estudia una fauna en particular, cómo se descubren las especies nuevas, y cómo se describen y dan a conocer a la Ciencia; en definitiva, cómo se trabaja en cuestiones de biodiversidad. Porque antes de aspirar a gestionarla y protegerla, hay que conocerla medianamente bien.

Revisando la fauna canaria

El ejemplo que sigue a continuación se basa en mi experiencia personal y sirve, eso espero, para mostrar que el conocimiento acumulado sobre la biodiversidad canaria dista mucho de ser completo y que, buena parte de él, ha de ser revisado aplicando criterios y técnicas de estudio modernos.

En 1992 acabé una voluminosa monografía sobre los coleópteros carábidos de Canarias. Cuando inicié el estudio unos quince años antes, este grupo de escarabajos corredores era de los supuestamente mejor conocidos, pues había sido objeto de estudio por parte de varios especialistas europeos

que trabajaron en nuestras islas. El catálogo de partida rezaba 186 especies. Sin embargo, a lo largo de la revisión taxonómica¹ y faunística, 28 de estas especies quedaron invalidadas por erróneas o dudosas, mientras que describí 29 especies y 15 subespecies nuevas, localizando además otras varias conocidas de tierras continentales, pero que habían pasado inadvertidas en las islas. Al final, el elenco de carábidos de Canarias quedó en 226 especies revisadas, lo que supone un incremento del 20%.

Pronto me di cuenta de que las islas habían sido mal prospectadas. Los especialistas tenían tendencia a ir una y otra vez a las mismas localidades mencionadas por los autores más antiguos, con la esperanza de capturar los codiciados endemismos. Obviamente, a base de un mayor esfuerzo recolector, aparecieron algunas novedades. Pero ¿qué sucedía con otras zonas y hábitats apenas o nada trabajados?... ¿y en las otras islas? ¿Qué especies viven realmente en todo el territorio de Canarias?

Siguiendo esta pregunta emprendí una prospección sistemática, hábitat por hábitat e isla por isla. Las novedades no se hicieron esperar, y de ahí el feliz resultado de lo que di en llamar una “revisión faunística”, pues tuve también que comprobar si todo lo anteriormente publicado sobre carábidos de Canarias era cierto. Por aquélla época todavía no había adoptado el mágico término de biodiversidad.

Después de un largo periodo dedicado a otros menesteres, decidí volver a este tipo de estudios, tan fascinantes por las oportunidades que brindan las islas volcánicas para analizar los procesos evolutivos; en otras palabras, cómo se genera la biodiversidad insular y su inusitada riqueza de endemismos. Además, las nuevas técnicas moleculares abrían las puertas para realizar análisis filogenéticos más profundos, y los costes –hasta entonces prohibitivos– empezaban a ser razonables.

Buscando el candidato idóneo

Diseñé el perfil del grupo perfecto para hacer estudios evolutivos. Tenía que tratarse de un género que fuese presumiblemente monofilético, es decir, que todas las especies conocidas estuviesen básicamente contenidas en el archipiélago. También debería contar con muchas especies; cuantas más mejor, y que hubiera varias en una misma isla poblando diferentes hábitats. Idóneamente, debería ser un grupo con especies ápteras que no pudiesen volar y cambiar de isla, de modo que su fidelidad territorial fuese máxima.

Un somero análisis de la fauna canaria registrada arrojó dos candidatos espléndidos, que superaban las cincuenta especies cada uno. El género *Hemicycla*, perteneciente a los moluscos terrestres (76 especies) y el género *Laparocerus*, gorgojos distribuidos por las Azores, Madeira y Canarias, con

105 especies y subespecies² en total (68 en Canarias). La decisión resultó fácil, pues en cuestión de bichos cambiar de coleópteros a moluscos supone todo un salto mental. Cada grupo, además de su particular morfología, tiene algo así como una idiosincrasia propia. De hecho, al optar por los *Laparocerus*, que son insectos estrictamente fitófagos (vegetarianos), me enfrentaba a algo bien diferente a mis queridos carábidos, en su mayoría depredadores (carnívoros). Me llevó bastante tiempo llegar a “pensar” como un *Laparocerus*. Entiéndase esta metáfora como un ejercicio de empatía y de comprensión de las apetencias y costumbres de un insecto: captar dónde se dan las condiciones microclimáticas, de refugio o los alimentos más apetitosos que uno elegiría si fuese el insecto en cuestión. Aunque esta manera de abordar la búsqueda en el campo parezca algo heterodoxa, tiene mucho de observación sistemática, de hipótesis, de ensayo y error; en definitiva, de abstracción de patrones, para lo cual nuestro cerebro está especialmente dotado. Se trata de ciencia empírica. Y funciona. Sólo cuando empecé a entender a los *Laparocerus*, el encontrarlos dejó de ser un problema. Pero no fue un proceso sencillo.



Fig. 2. Chascón dorado (*Laparocerus lamellipes*) de Madeira.

El principal contratiempo de haber elegido a los *Laparocerus* (Fig. 2) como grupo idóneo para trabajar sobre una nueva monografía, radicaba en

que eran muy poco conocidos a pesar del alto número de especies conocidas. La mayoría de ellas fueron estudiadas sobre uno o muy pocos ejemplares, y muchas no se habían vuelto a encontrar, incluso algunas de las descritas hace siglo y medio. Además, el número de las especies que parecían ser comunes, resultaba ser descorazonadamente bajo. Muchas especies, pero pocos ejemplares en las colecciones, al menos en las nuestras: las del Museo Insular de Ciencias Naturales de Santa Cruz de Tenerife, las de la Universidad de La Laguna, o en las particulares de los amigos entomólogos.

Recopilando información

Empecé por lanzar un aviso general vía Internet³ y a todos los colegas y principales museos europeos, anunciando mi intención de estudiar a fondo el género *Laparocerus*. Algunos bromearon etiquetándome de masoquista, pero la respuesta no se hizo esperar y fue ciertamente espléndida. Al poco tiempo empezaron a llegar a mi gabinete entomológico paquetes con *Laparocerus* procedentes de media Europa; de Madrid, Roma, Londres, Ámsterdam, Eberswalde, Lund, Helsinki, etc. Evidentemente, además del magnífico espíritu de colaboración que todavía rige en este campo de la Ciencia, todos tenían interés en saber qué especies traídas de Canarias guardaban en sus colecciones. Por esta vía llegué a reunir casi dos mil ejemplares. Tal fue el trasiego de envíos y devoluciones que finalmente tuve que aclarar a los empleados de correos en qué consistía aquel misterio de paquetes grandes, primorosamente arreglados y de tan poco peso. Dentro hay una cajita pequeña con unos pocos insectos pinchados en alfileres, y todo lo demás es gomaespuma, acolchado de aire o chips de styrofoam para amortiguar los golpes, porque son muy frágiles. Al final, cuando me entregaban o recogían de vuelta uno de estos paquetes, los tomaban con sumo cuidado, casi con reverencia.

Paralelamente, compilé todo lo que se había publicado sobre *Laparocerus* y, muy particularmente, los trabajos originales con las descripciones que me permitirían identificar las especies. Lo malo del caso es que muchas de estas descripciones eran tremendamente lacónicas e imprecisas. Con frecuencia tenía ante mí varias especies claramente diferenciadas a las que convenía una misma descripción. Por fortuna, la ciencia taxonómica obliga a todo autor de una nueva especie a designar un ejemplar como “tipo”, a la par que hace la descripción. Este ejemplar único u holotipo⁴ se considera como el referente oficial para la especie y portador de su nombre. Así, cuando la descripción no es suficiente o existen dudas, uno puede comparar sus ejemplares con el (bendito) tipo y confirmar si se trata o no de la misma cosa. Muchos tipos de *Laparocerus* me fueron gentilmente enviados desde las instituciones donde se custodian, pero en

otros casos tuve que desplazarme a los museos (Fig. 3) en visitas muy intensas, para estudiarlos in situ (Oporto, París, Estocolmo, Oxford, Leiden, etc.) También encontré situaciones en que los tipos se habían perdido, y huelga decir, que en los museos de las islas, no se hallaba entonces ni un solo ejemplar tipo de *Laparocerus*. La casi totalidad de las especies fueron descritas por científicos extranjeros.



Fig. 3. El autor estudiando material canario de *Laparocerus* depositado en el Museo Nacional de Historia Natural de París (2002).

En fin, esta es la paciente labor que implica una revisión taxonómica en la que uno adquiere complejo de ser medio híbrido entre científico, notario y Sherlock Holmes, pues localizar el paradero de algunos tipos, como el de la primera especie de *Laparocerus* –descrita en 1834– resultó ser un auténtico quebradero de cabeza, digno del personaje de sir Arthur Conan Doyle. Después de tres años de pesquisas carteándome con Roma, Viena, Frankfurt, Berlin y Kiev, acabó por aparecer en el Museo Real de Historia Natural de Estocolmo.

Todo este trabajo de museo y gabinete fue desarrollándose metódicamente, y poco a poco fui aprendiendo a reconocer las especies descritas. Y tal como esperaba, entre el material recibido –sobre todo de colegas alemanes– había muchos ejemplares que no encajaban en nada conocido. Obviamente, se trataba de especies nuevas. Pero lo más importante era prospectar el territorio del modo más completo posible.

Diseñando la prospección

Los *Laparocerus* se habían citado de la Macaronesia (Azores, Madeira, Salvajes y Canarias), además del enclave macaronésico en Marruecos occidental (Agadir), de donde se conocía una única especie, originalmente descrita en otro género. La prospección faunística se planteó del siguiente modo:

Una primera campaña consistiría en batir todas las localidades donde fueron colectados los ejemplares que dieron pie a las descripciones de las especies conocidas, o donde mis colegas habían encontrado especies presumiblemente nuevas. Así tendría alta probabilidad de dar con ellas y obtener material fresco y más abundante. Me permitiría conocer su variabilidad y, sobre todo, contar con ejemplares aptos para los estudios genéticos. Estas técnicas exigen que el ADN se encuentre en perfecto estado y para que no se deteriore hay que matar al insecto sumergiéndolo directamente en alcohol absoluto. Luego se conservan en un congelador, a temperaturas bajo cero.



Fig. 4. Equipo colaborador en la prospección. De izquierda a derecho: Miguel Ángel Peña Estévez, Agustín Aguiar Clavijo y Rafael García Becerra, en La Gomera (2006).

Para la segunda fase, haría un análisis provisional de la distribución de las especies y evaluaría la cobertura de hábitats resultante. Estaba claro que

muy pocos entomólogos habían salido a buscar expresamente *Laparocerus*. Son insectos fitófagos y había muchos tipos de vegetación apenas prospectados. Hice un mapa de vacíos y diseñé un plan de muestreo para cubrir todas las islas, además del Anti-Atlas y la costa occidental marroquíes.

Finalmente, la tercera fase consistiría en rematar la faena, insistir en las especies más recalcitrantes (aquellas que se empeñan en no aparecer), cubrir huecos pendientes o explorar aquéllos otros que visto lo ocurrido en determinada isla (descubrimiento de nuevas especies), nos hace suponer que debería repetirse en otra. Han pasado casi diez años desde que empecé a coleccionar *Laparocerus* en 1999, y actualmente me encuentro en esta última fase.

Colectando ejemplares

Ese era el planteamiento teórico, pero ¿cómo hacer con un grupo de bichos esquivos que solo salen a comer de noche? Al principio se me ocurrieron ideas bastante peregrinas. Con los carábidos usaba trampas de caída –vasitos enterrados a ras de suelo– pero estaba claro que sería inútil pues los *Laparocerus* son magníficos trepadores. Tendría que poner trampas en los árboles. Pensé en atar cartón corrugado a las ramas, a ver si alguno se refugiaba dentro, al sentirse protegidos. Otra opción sería embadurnar los troncos con pegamento de moscas, y así todo bicho que trepase o bajase el árbol, quedaría pegado (luego habría que lavarlos pacientemente con gasolina)... A veces uno no se le ocurre lo más obvio aunque lo tenga delante de las narices, y tuvo que ser un colega alemán, el Dr Peter Stüben, quien me hizo caer en la cuenta. ¿Y por qué no sales de noche a buscarlos? Me sentí estúpido de remate. Hicimos juntos una primera excursión por las laderas de Icod (Tenerife), convenientemente equipados con linternas frontales para tener las manos libres. Y la verdad se hizo obvia. Allí estaba “mi gente” –los *Laparocerus*– por todas partes, trepando por troncos y ramitas, comiendo en las hojas, copulando con todo desparpajo. Y lo más importante: de raros, nada.

El método de colecta consiste en colocar debajo de las ramas un “paraguas japonés”, que viene a ser un artilugio entomológico muy simple: una tela recia estirada con dos palos en cruz (Fig. 5). Se varean las ramas con un palo, y todos los insectos caen sobre la tela, y de ahí se van aspirando los que interesan con un chupóptero⁵. Es muy importante no rozar las ramas antes de que el paraguas se halle situado justo debajo, pues todos los curculiónidos tienen el instinto de dejarse caer automáticamente y hacerse el muerto (catalepsia). Supongo que este es un astuto comportamiento adquirido a lo largo de la evolución para evitar a los depredadores o

que cualquier herbívoro que venga ramoneando las hojas se los zampe de paso. El método de colecta es simple y en un par de horas de trabajo se pueden reunir quinientos o más ejemplares. Solo hay que dar con las plantas que ellos comen.



Fig. 5. Colectando chascones con un paraguas japonés. El aparato de succión o “chupóptero” pende de la boca del colector.

Esta última cuestión constituyó el siguiente paso. Los *Laparocerus* salen de noche y de día bajan de la vegetación y se entierran en el suelo o a veces se esconden bajo piedras o resquicios, que es donde casualmente los encuentran los entomólogos que van buscando otros insectos. De noche se les ve activos, pero no todas las plantas tienen *Laparocerus*, y aunque uno puede ir vareando todo lo que se encuentra por delante, al final llega a ser tedioso, poco productivo y no exento de peligro, pues la luz de los frontales no abarca más allá de unos pocos metros. Comencé a recoger hojas comidas por *Laparocerus* y a fotocopiarlas en casa. Reuní cientos de muestras y al final, tras un estudio comparativo, aprendí a distinguir las mordeduras que producen los *Laparocerus* de las que producen otros insectos (Fig. 6). Publiqué un trabajo sobre el particular, pero lo más interesante es que ya podía recorrer cómodamente de día una zona y localizar las plantas con marcas de *Laparocerus*. Estos sitios los señalaba con palitos reflectantes o

los registraba con un GPS para luego ir a varearlos de noche. Pero a veces, no encontraba nada.

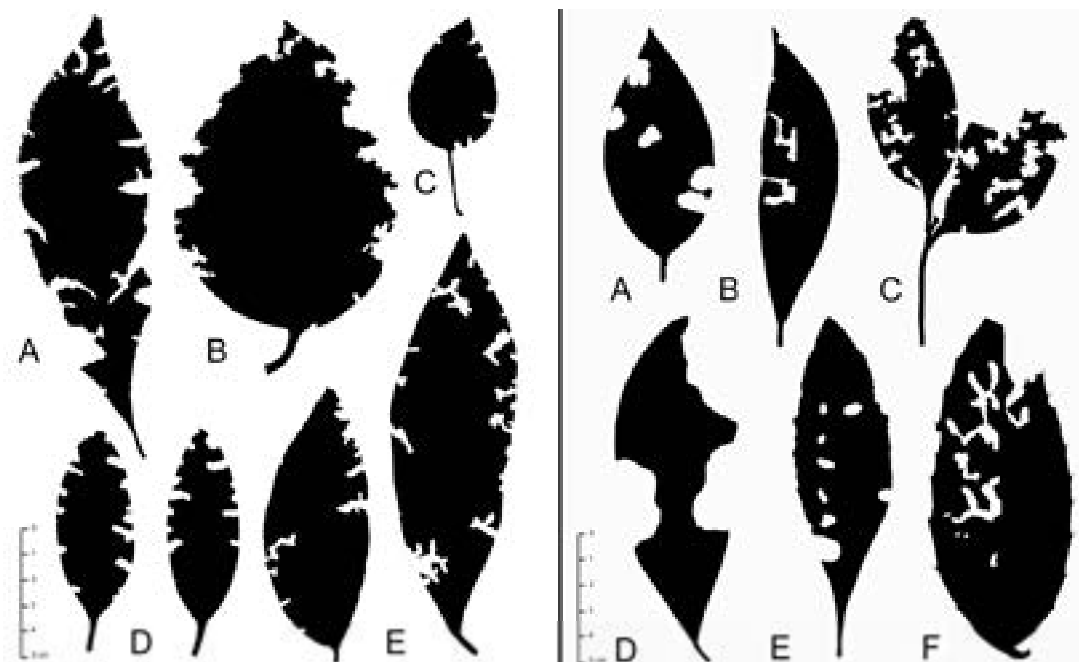


Fig. 6. A la izquierda, hojas comidas por chascones (*Laparocerus*), a la derecha, marcas dejadas por otros insectos (tomado de Machado, 2005).

Averiguando cuando están activos

La siguiente cuestión era saber si los *Laparocerus* están activos todo el año o si son estacionales, como ocurre con la mayoría de los insectos. Diseñé un estudio fenológico⁶ que consistía en varear el mismo tramo de 100 m de vegetación una vez cada mes; contar los ejemplares de cada especie, soltándolos siempre en el mismo sitio. Este proceso se repitió en cuatro localidades de Tenerife, que es la isla donde vivo: una en la costa (Punta del Hidalgo, 50 m), otra en la laurisilva (Zapata, 900 m), otra en pinar (Fuente Joco, 1850 m) y finalmente, otra en el matorral de cumbre (El Portillo, 2050 m); ver fig. 7. Para ayudarme en este trabajo convencí al biólogo y amigo Agustín Aguiar Clavijo que pronto quedó cautivado por el grupo y ha sido compañero permanente de correrías por los montes. Precisamente, a él se debe el nombre común de “chascones” con el que bautizamos a los *Laparocerus* durante un trabajo realizado para la Academia Canaria de la Lengua. El nombre hace alusión a su empedernido hábito de chascar las hojas.

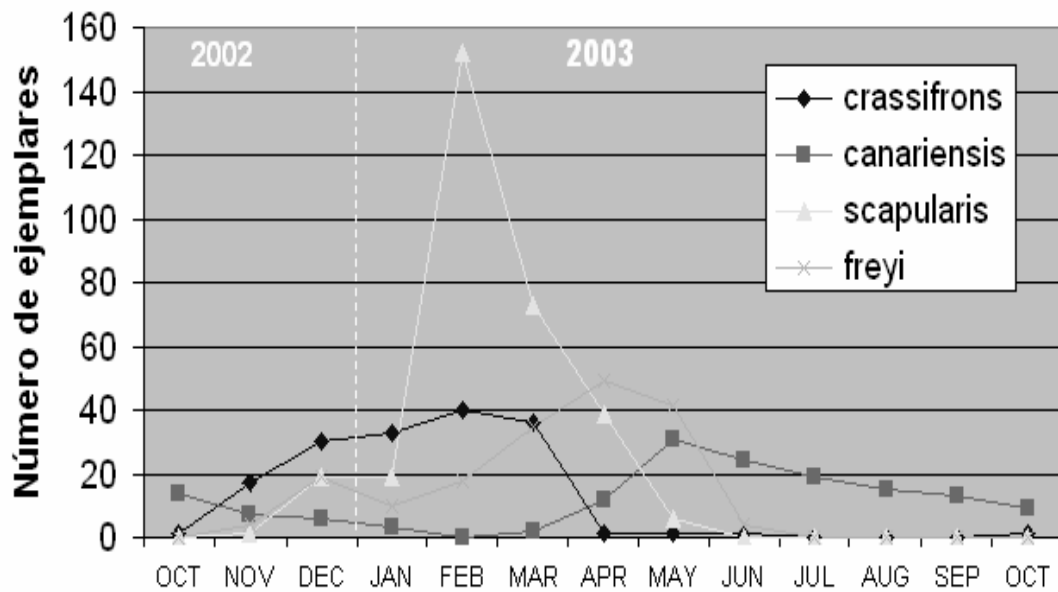


Fig. 7. Fenología de especies de chascones en el matorral de cumbre, Las Cañadas, Tenerife (tomado de Machado & Aguiar, 2005).

El método de colecta fue perfeccionándose progresivamente y los resultados y novedades no se hicieron esperar. A las campañas por las islas acabaron por apuntarse otros dos compañeros biólogos, aprovechando sobre todo el puente de la Constitución: Rafael García Becerra (La Palma) y Miguel Ángel Peña Estévez (Gran Canaria), ver fig. 4. Se formó así un equipo de cuatro personas que batíamos el terreno con una intensidad muy superior a la de mis salidas en solitario. La estrategia de trabajo que adoptamos es como sigue: Elegimos la isla para esa campaña. Localizamos hoteles, fondas o casas rurales que estén ubicadas cerca de las zonas objeto de prospección. Salimos después de mediodía a recorrer el terreno y localizar donde hay vegetación con marcas recientes de actividad de chascones. Marcamos los lugares y diseñamos una ruta que, partiendo del punto más alejado se va aproximando al centro de operaciones, donde dormiremos. En ese punto más distante esperamos a que se haga de noche. Con la aparición de las estrellas empezamos a varear la vegetación, fijándonos en qué plantas colectamos las especies. Seguimos así, localidad por localidad, hasta que el hambre nos invita a parar. Las cenas son memorables, a base de humildes bocadillos, queso, longaniza, frutos secos, algo de foi quizás, siempre regadas con excelente vino (de crianza para arriba), cuyo descorche y brindis se han convertido en un ritual irrenunciable. El trabajo no está reñido con las gratificaciones, y créanme que el eco que produce una botella en plena noche al descorcharse en el fondo de un barranco es el mejor estímulo que puedo imaginar. La ciencia, al margen de su frío rigor metodológico, se impulsa de modos pocas veces

manifiesto, pero sin los cuales el resultado sería seguramente más pobre. Son los ratos de compañerismo, la calidez humana, las fatigas compartidas o la descarga de adrenalina cuando surge lo inesperado, lo que empuja a los científicos más allá de los límites ordinarios. Por contradictorio que parezca, sin pasión no habría Ciencia.

Luego, renovadas las energías con la pitanza, prosigue la recolecta hasta medianoche o bien entrada la madrugada, momento en que, ya agotados, nos retiramos hacia el hospedaje de turno. La mañana del día siguiente se dedica a separar, etiquetar y guardar el material capturado la noche anterior; un trabajo meticuloso que se alarga hasta el mediodía. Después del almuerzo se repite el mismo esquema del día anterior: salida de inspección, marcaje de sitios, etc. Los especímenes capturados se estudiarán luego en el gabinete mediante lupa binocular o microscopio.

Preparando y estudiando los ejemplares

El material de *Laparocerus* colectado en estos últimos años es copioso y puede rondar los 35.000 ejemplares. Este material, lo mismo que el recibido de los colegas, se registra convenientemente en una base de datos⁷. Sólo las series de ejemplares que se van a estudiar morfológicamente se preparan al estilo de las colecciones entomológicas clásicas. Consiste en lavar los insectos (a veces empleo ultrasonido para desprender partículas muy adheridas) y una vez limpios y secos, se pegan con cola hidrosoluble sobre pequeñas cartulinas, colocándoles las antenas y patas bien separadas. No hace falta ningún conservante especial, pues el exoesqueleto de los insectos permanece inmutable una vez se secan los órganos internos. Algunos ejemplares se pegan por el dorso patas arriba, para dejar visible su cara ventral. Las series de una misma especie deben ser generosas, entre 30 ó 50 ejemplares, de modo que se pueda apreciar la variación entre individuos y, sobre todo, entre machos y hembras, que en este grupo es notoria y muy relevante.

Las cartulinas con el insecto pegado se pinchan en un alfiler entomológico al que se le añaden dos etiquetas más, una con los datos de localidad, fecha, colector y planta sobre la que estaba, y otra con el nombre de la especie y la fecha y nombre de quien la determina (Fig. 8).

Al tratarse de una revisión sistemática, también es preciso estudiar algunos caracteres morfológicos internos, concretamente las genitales⁸ masculina y femenina. Las diferencias que se observan en estas piezas son particularmente significativas por cuanto, de haberlas, se presume que constituyen un impedimento para la cópula y, por ende, ayudan a separar las especies. Además, el parecido entre órganos genitales suele reflejar de modo fiel el parentesco entre especies, ya que estos órganos no están tan

expuestos a las presiones adaptativas convergentes como ocurre con los externos. No es infrecuente que especies poco emparentadas presenten rasgos morfológicos muy parecidos si han evolucionado en ambientes equivalentes. La naturaleza encuentra a menudo las mismas soluciones por separado, y estas homologías –que así se llaman– pueden confundir a los taxónomos. De ahí la importancia de estudiar las genitalias a la hora de establecer parentescos.



Fig. 8. Montaje y etiquetado de ejemplares entomológicos. En el recuadro obsérvese el microvial que contiene los órganos genitales extraídos.

Las piezas genitales se extraen tanto de ejemplares frescos como secos, previamente cocinados para ablandarlos. Por el orificio trasero del abdomen se introduce una pinza muy fina o un alfiler con la punta brevemente doblada en gancho; se traba la genitalia y se tira de ella. A veces hay que proceder a la disección del ejemplar, abriendo el abdomen por un costado, o retirando uno o dos de los esternitos⁹ terminales. Las piezas extraídas se limpian pacientemente a la lupa con ayuda de agujas enmangadas, o embebiéndolas en potasa cáustica (diluida al 20%) que eliminará los restos de músculo y tejido blando sobrantes. Dado el tamaño minúsculo de estos órganos, se han de estudiar al microscopio y luego se guardan en microviales de cristal o plástico, rellenos de glicerina. Los microviales se

pinchan por su tapón en el mismo alfiler que porta el ejemplar genitalizado (Fig. 8, detalle).

Describiendo las nuevas especies

Cuando uno lleva horas de lupa y ha preparado miles de ejemplares, no es sorprendente que se pueda reconocer algo novedoso incluso en el campo y a primera vista. Después habrá que confirmar que realmente se trata de algo desconocido para la Ciencia y no solo para nosotros. Ello requiere un estudio comparativo minucioso que puede revestir mayor o menor complicación, según el grupo. Al final, despejada toda duda y sinceramente convencidos de que se trata de una especie nueva, se adquiere el compromiso científico de darla a conocer y se ha de abordar su descripción. En caso de no dominar el grupo, es harto recomendable consultar con un especialista que lo conozca a fondo. Empero, no es infrecuente que aún hoy en día se describan como nuevas, especies que ya eran conocidas. Al destaparse el error, el taxón descrito será considerado una sinonimia y queda invalidado.

La descripción de una especie es una tarea crítica, porque hay que abstraer lo que es característico de la especie de lo que es circunstancial de los individuos. El pelo desarrollado en la cabeza de los humanos, por ejemplo, es un carácter específico, pero su forma, longitud y color varían considerablemente. Asimismo, hay que destacar los caracteres concretos que permiten diferenciar la nueva especie de las que más se le parecen (diagnosis diferencial).

Dice el refrán que cada maestro tiene su librito, y no va desencaminado. Con el tiempo he adoptado un método que en clave de humor designo GPS (Goat processing system). Las cabras comen mucha hierba, luego la rumian y, finalmente, dejan caer una bolita de excremento. Mutatis mutandi, escudriño un montón de ejemplares a la lupa, mi cerebro va rumiando lo que hay de común y diferente entre ellos, y al final, si hay suerte, sale la diagnosis que recoge por escrito lo esencial de la especie. Su bondad se comprueba y ajusta acto seguido remirando los ejemplares, sobre todo aquéllos que son más extremos.

Las descripciones literales de especies nuevas se suelen y deben acompañar de ilustraciones complementarias que reflejen sus características, si no todas, al menos las más representativas (genitalia, forma del cuerpo, etc.). Tomo fotos digitales de los adultos –preferiblemente del holotipo (Fig. 10)– y aunque soy consciente de que la tecnología digital ha abierto perspectivas insospechadas en macrofotografía, sigo recurriendo a la ilustración científica clásica, al dibujo lineal hecho con cámara clara¹⁰ y pasado a tinta china (Fig. 9). Creo que ambas técnicas no son excluyentes y

que se complementan bien. La fotografía capta mejor la impresión del animal, mientras que el dibujo permite simplificar y resaltar los caracteres que interesan. Debo admitir que también me resisto a abandonar la ilustración clásica por los gratísimos momentos que reporta todo trabajo artesanal, que en mi caso acompaño con la radio o buena música, y la cambiante estampa del Teide a lo lejos, frente a la ventana de mi gabinete donde situé la mesa de dibujo.

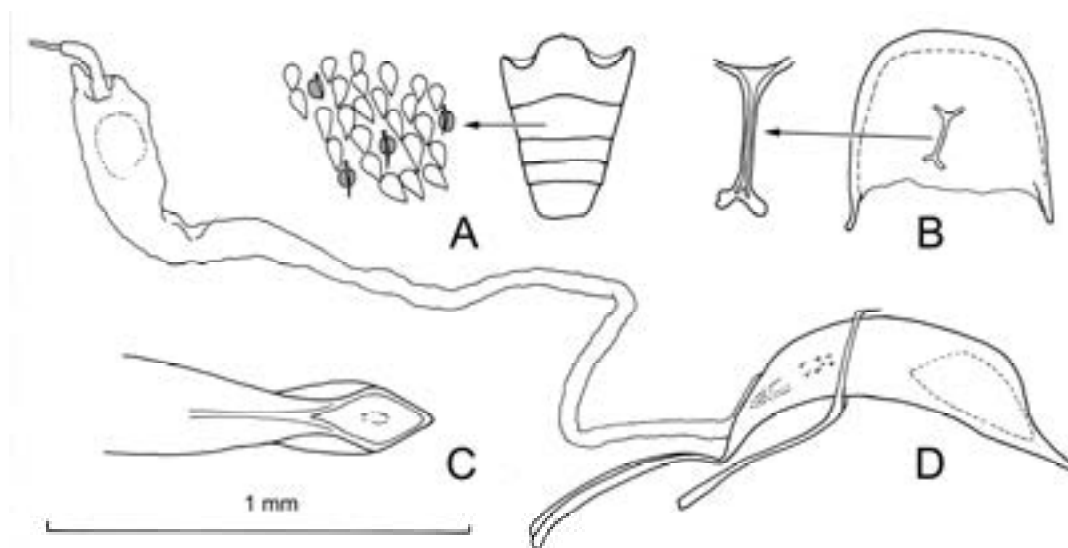


Fig. 9. Detalles morfológicos de *Laparocerus (Lichenophagus) fritillus* (Wollaston, 1854). El edeago o pene es la pieza D y C (vista dorsal de la punta).

Eligiendo un nombre

Un asunto que suscita la intriga de muchas personas es el modo en que se pone nombre a las especies. Obviamente existe una normativa internacional que lo regula. Los nombres científicos son siempre latinos o palabras latinizadas. Las especies se designan con un binomio, por ejemplo *Laparocerus canariensis* Boheman, 1842, y las subespecies con un trinomio: *Laparocerus heres jocoensis* Machado, 2007. El autor y año de la descripción se añaden al final.

Es frecuente el uso de palabras o radicales griegos latinizados, como en el caso de *Laparocerus*, que combina “laparos”, delicado, grácil, y “cerus” que significa cuerno o antena. Efectivamente, estos gorgojos tienen las antenas gráciles y largas, pero no hay por qué hacer referencia a caracteres descriptivos de la morfología. La imaginación no tiene límites a la hora de nombrar géneros o especies, siempre que se cumpla con la exigencia de su

latinización. Sirvan de ejemplo algunos de los nombres que he elegido para los taxones nuevos de chascones: De Madeira describí el sugénero *Wollastonius*, derivado de T. Vernon Wollaston, autor inglés del siglo XIX que fue el primero en estudiar el grupo con gran acierto. *Laparocerus calvus* es el nombre que tengo pensado para un chascón de Fuerteventura que se caracteriza por no tener escamas ni pelos en el dorso del cuerpo, mientras que *Laparocerus aridicola* hace referencia al hábitat árido en el que vive. *Laparocerus aguiari* está dedicado a Agustín Aguiar (figura 10), y para el otro compañero de colectas y descubridor de la especie, Rafael García, usaré su alias “Felo”, con lo que obtendríamos *Laparocerus feloi*. En ambos casos se latiniza el nombre en genitivo, pero puede igualmente usarse en aposición, como en *Laparocerus tinguaro* que lleva el nombre de Tinguaro, un mencey de Tenerife. Las localidades geográficas también son frecuentes en los nombres científicos (i.e. *Laparocerus madeirensis*, *Laparocerus chasnesis*, *Laparocerus orone*), lo mismo que los inspirados en la mitología. He seguido esta última tradición con *Laparocerus hobbit* Machado, 2008, especie que se caracteriza por tener los tarsos de las patas muy grandes y peludos, al igual que los hobbits, una raza mítica ideada por J. R. R. Tolkien (El Señor de los Anillos). Quizás el nombre más estrafalario que he empleado sea el de *Laparocerus boticarius*, pues lo primero que me vino a la mente al descubrir el primer ejemplar fue un frasco ampuliforme de los que se veían en las farmacias (y de botica, boticarius), aunque en honor a la verdad, no se parezcan nada. Sin embargo, el nombre le pegaba y al final se impuso frente a otros alternativos que barajé.

Dando a conocer la especie

Para que una especie sea oficialmente reconocida ha de ser dada a conocer a la comunidad científica. Su descripción, imágenes, material estudiado y datos complementarios (por ejemplo, dónde se deposita el holotipo) han de ser publicados convenientemente. Antiguamente, las descripciones se hacían en latín, pero el Código Internacional de Nomenclatura Zoológica admite cualquier idioma moderno, aunque existe una palmaria tendencia a hacerlas en inglés, que se ha erigido como lengua franca en la Ciencia. Existen numerosas revistas científicas que recogen trabajos taxonómicos y todas siguen más o menos las mismas pautas. Una vez reciben el manuscrito del autor lo remiten a dos colegas especialistas para su evaluación. Si la calidad científica es pobre o existen irregularidades manifiestas (plagio, por ejemplo), el trabajo puede ser rechazado, aunque lo más frecuente es que se acepte con correcciones menores e incorporando las sugerencias que hacen los evaluadores.

Superada la revisión entre pares, el manuscrito pasará a los talleres para su impresión definitiva. El proceso global puede llevar de varios meses a más de un año, dependiendo de la frecuencia de aparición de las revistas, de lo saturadas que estén y, sobre todo, de la diligencia de los evaluadores que no cobran por esta labor totalmente altruista, sin la que la Ciencia difícilmente podría avanzar.



Fig. 10. Fotografías digitales de los holotipos de *Laparocerus hupalupa* Machado, 2007 (escala = 2 mm) y *Laparocerus aguiari* Machado, 2007 (escala 5 mm).

Conviene recordar que lo que está definitivamente en juego es dar a conocer una especie nueva, y las especies son mucho más que su morfología. Además de su descripción, idóneamente hay que encajarla en el sistema; vislumbrar cuáles son sus parientes más próximos, cuál es su distribución, en qué hábitats vive, cuando está activa, qué come, etc. Por desgracia, estos aspectos no siempre se consideran en todas las descripciones, particularmente, en las antiguas. No es mi caso, y me siento afortunado de poder dar a conocer los nuevos *Laparocerus* con información bastante amplia y precisa. De hecho, me abstengo de describirlos hasta que no me encajan en el esquema general del grupo y en la ecología de la isla.

Desvelando la filogenia

La filogenia expresa las relaciones de parentesco entre las especies, y la taxonomía o sistemática biológica se basa en ella. Una familia reúne a especies más emparentadas entre sí que con cualquiera otra externa, pues se supone que descienden de un mismo ancestro; igual ocurre con los géneros o los subgéneros. La idea es simple, pero el praxis no tanto. Inferir las relaciones filogenéticas estudiando la morfología de las especies tiene muchos riesgos, como el no saber interpretar correctamente las homologías a las que antes hacíamos referencia. El que dos cosas se parezcan no implica necesariamente que estén estrechamente emparentadas. Por suerte, los estudios moleculares han aportado mucha más precisión en estas cuestiones y empiezan a ser herramienta habitual en las revisiones sistemáticas. Consiste en estudiar tramos del ADN extraído de los ejemplares, usualmente del ADN mitocondrial, y analizar en qué proporción varían las secuencias de nucleótidos (Fig. 11). Cuantos más nucleótidos coincidan, más próximas serán las especies que representan. Además, si se comparan

tibia866aT	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	A	T	C	C	T	C	C	A	A	G	A	C	T	C	C	C	C	A	T	A	T	A	G	A	A	C								
excav2135T	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	A	T	C	T	T	C	C	A	A	G	A	C	T	T	C	C	A	T	A	T	A	G	A	A	C									
canar1296C	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	A	T	C	T	T	C	C	A	A	G	A	C	T	T	C	C	A	T	A	T	A	G	A	A	C									
susi4103MK	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	A	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	C	T	C	T	T	C	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	A	T	A	T	A	G	A	A	C				
rasus0859L	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	A	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	C	T	C	T	C	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	A	T	A	G	A	A	C				
elias4164C	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	A	A	C	A	T	A	A	A	A	C	C	T	C	T	C	C	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	A	T	A	G	A	A	C				
lindb4147M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	C	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
clava3406M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	C	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
clavat840M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	C	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
abditu267M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	C	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
excels292M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	C	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
scha3413PS	A	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	C	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
undul3398M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
calca3397M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
lauri3393M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	C	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
laurip245M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	C	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
noctiv287M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	C	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
noctiv266M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	C	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
madei4003M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	C	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
vesper259M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	C	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C
lamel14016M	T	T	T	T	T	A	T	T	A	G	A	A	A	A	T	T	T	C	T	C	T	A	C	A	T	A	A	A	A	C	T	T	T	T	T	T	A	C	A	A	G	A	T	A	A	A	C	C	T	C	C	C	C	A	T	T	A	T	A	G	A	A	C

Fig. 11. Tramo de varias secuencias de nucleótidos de ADN mitocondrial de *Laparocerus* correspondientes a la citocromo oxidasa II. Código de bases: A = adenina, C = citosina, G = guanina y T = timina.

varias secuencias simultáneamente, se pueden inferir los cambios (mutaciones) que han tenido que producirse para llegar de unas a otras. La matriz empleada para el estudio de los *Laparocerus* la componen unas 300 secuencias por 1023 nucleótidos ¡Imaginen las combinaciones!

Lógicamente, hay que recurrir a potentes ordenadores y programas especializados que, aplicando el principio de parsimonia¹¹, acaban por proponer una o unas pocas combinaciones que mejor explican los datos. El resultado se resume luego en la construcción de árboles filogenéticos que reflejan la “genealogía” hipotética de las especies. Estos filogramas, que así se llaman, pueden ser más o menos fiables, pero siempre serán de gran ayuda a la hora de construir un esquema sistemático de las especies mejor soportado por la filogenia. En el caso de los *Laparocerus* está siendo decisivo.

Para el estudio molecular, además de tener que repasar mis vetustos conocimientos de genética y ponerme un poco al día, conté con la decisiva colaboración del Dr Mariano Hernández y su equipo del Instituto de Enfermedades Tropicales de la Universidad de La Laguna. Me consuela saber que él también tuvo que pelearse con la taxonomía y que, al final, los dos aprendimos mucho (yo salí ganando). Por fortuna, para ayudar a costear estos trabajos, que de otro modo no me los hubiera podido permitir, obtuve financiación de la Fundación Biodiversidad (Madrid). En el filograma adjunto (Fig. 12) se muestra sintéticamente el resultado obtenido para Madeira, cuyas especies forman un conjunto monofilético, al igual que ocurre con las especies de Canarias (incluida la de Marruecos). En el apartado que sigue se comentan algunas de las implicaciones taxonómicas derivadas de los resultados moleculares. De momento, solo se ha publicado este primer filograma, pues para poder presentar los correspondientes a Canarias parece oportuno describir primero las especies nuevas, ya que son muchas y aún no cuentan con nombre científico.

Batiendo récord

El estudio de los chascones macaronésicos dista aún de estar concluido, pero ya se vislumbran resultados importantes que permiten apreciar cuán frágil es el conocimiento que tenemos de la biodiversidad canaria si la sometemos a revisión y estudio metódico. Se han constatado siete sinonimias y en la tabla adjunta se resume el número de especies y subespecies nuevas surgidas hasta el momento.

Tabla 1. Distribución por islas de las especies (sp.) y subespecies (ssp.) nuevas de *Laparocerus* descritas o pendientes de describir.

Madeira	7 sp. + 1 ssp.	Gran Canaria	8 sp. + 1 ssp.
El Hierro	2 sp. + 2 ssp.	Fuerteventura	5 sp. + 1 ssp.
La Gomera	16 sp. + 1 ssp.	Lanzarote	1 ssp.
La Palma	10 sp. + 3 ssp.	Montaña Clara	1 ssp.
Tenerife	8 sp. + 2 ssp.	Marruecos	1 ssp.

El conjunto refleja 56 especies y 14 subespecies nuevas, con lo que el total de 105 taxones iniciales se ha incrementado en mucho más de la mitad. Hay que aclarar que, además de las especies nuevas descubiertas, la lista de *Laparocerus* ha engrosado también con la incorporación de las que figuraban en otros géneros y que se han revelado como pertenecientes a *Laparocerus*. Este es el caso, por ejemplo, de todos los *Lichenophagus*, un género descrito de Porto Santo y las Desertas, al que luego se incorporaron varias especies y subespecies canarias. Los estudios moleculares indican que la especie de Porto Santo se relaciona con *Laparocerus* de Madeira (Fig. 12), y las especies canarias con *Laparocerus* de Canarias, de manera que no están directamente relacionadas entre sí. El peculiar aspecto –de ahí su consideración inicial como género independiente– y gran parecido entre ellas obedece seguramente a una adaptación a vivir en la hojarasca o entre líquenes (evolución convergente). El caso es que el género *Lichenophagus* no se sostiene filogenéticamente y sus especies se han incorporado al género *Laparocerus* (en dos subgéneros separados).

Este tipo de historias también se dan en el sentido contrario. Así, *Laparocerus* (*Drouetius*) *azoricus*, única especie descrita de las Azores y para la cual se estableció el subgénero *Drouetius*, ha resultado ser totalmente independiente del conjunto monofilético de los *Laparocerus* madeirenses y canarios, que forman grupos compactos y hermanos. Estoy concluyendo un manuscrito en el que propongo sacar a la especie *azoreana* del género *Laparocerus* y elevar el subgénero *Drouetius* a la categoría de género independiente, al que se integrarían otras dos más –nuevas– que pueblan las Azores.

Todavía es pronto para anunciar el número final de especies de *Laparocerus* fruto de la revisión emprendida, pero de momento va por 162 (188 si contamos las subespecies), de las que 128 (139 con subespecies) son endémicas de Canarias. La cifra de partida (68) ha aumentado considerablemente y todo hace pensar que aún quedan algunos chascones más por descubrir; no muchos, espero. Con la veintena larga de nuevas especies ya descritas, el género *Laparocerus* ha batido en Canarias (y toda la Macaronesia) el récord de diversidad específica ostentado por el molusco *Hemicycla*, y si el tiempo me lo permite, lo hará por goleada.

Reflexión final

El propósito primario de este artículo es poner en evidencia que, por razones históricas, el conocimiento que atesoramos sobre la biodiversidad en islas como Canarias o Madeira dista mucho de ser completo y sólido, sobre todo si lo comparamos con el existente en la Europa continental. Puede que estas regiones archipelágicas hayan sido pioneras en Europa a la

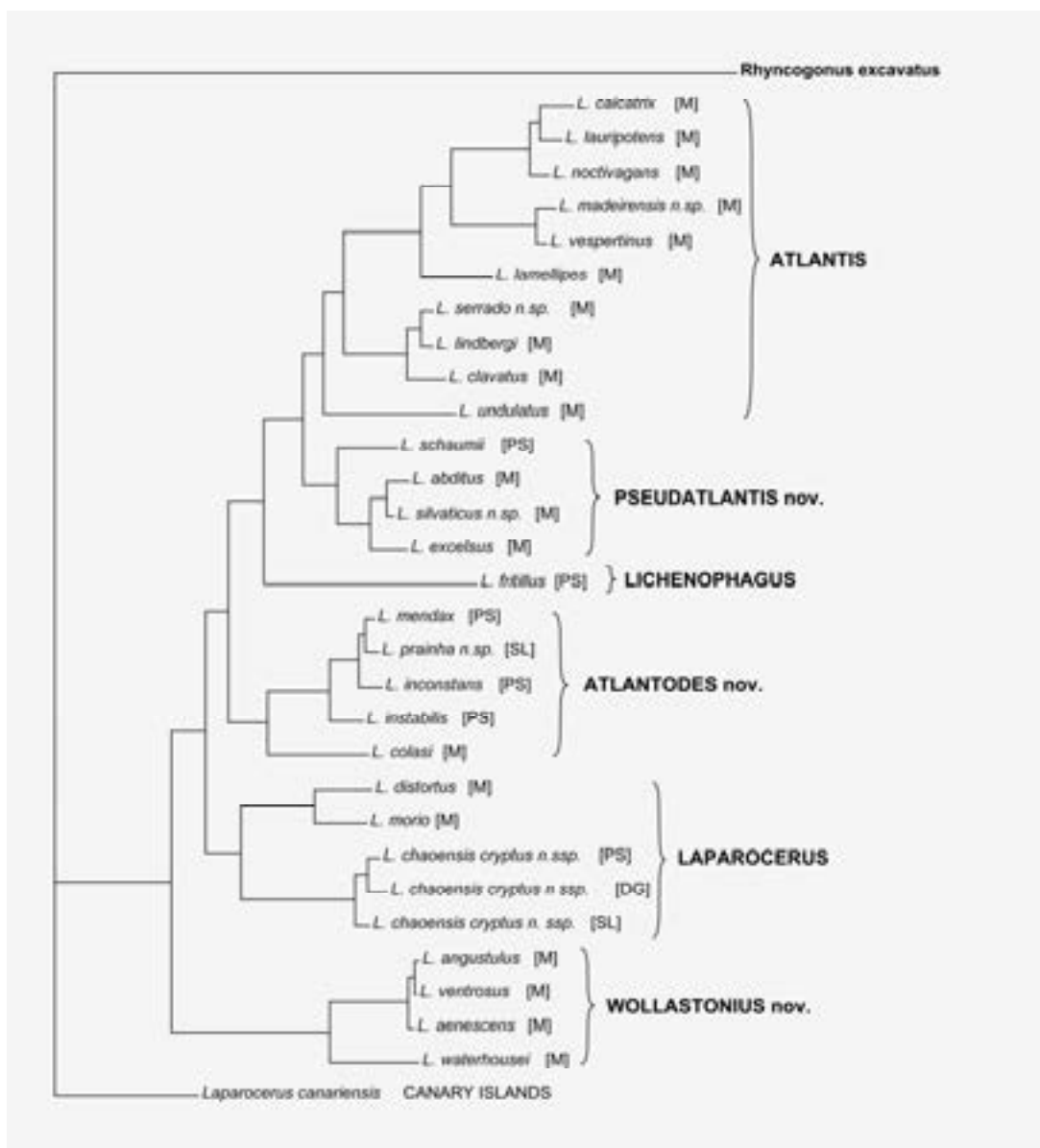


Fig. 12. Árbol filogenético simplificado de los chascones de Madeira y Porto Santo (tomado de Machado, en prensa). Los subgéneros en mayúsculas y negrita. *Rhyncogonus excavatus*, de la Polinesia, actúa como grupo externo.

hora de elaborar los listados de su fauna y flora, y que la Administración Canaria cuente además con una importante base de datos (BIOTA) que recoge la información territorializada sobre las especies. De hecho, se están tomando importantes decisiones financieras y de ordenación basadas en esta información. Ciertamente es que en cuestiones de conservación hay que manejarse con la mejor información disponible, y Canarias ha hecho un esfuerzo sin precedentes para eso, para tenerla disponible. Pero ¡jojo!, no hay que dejarse deslumbrar por el oropel de las estadísticas y cartografías a cuatro tintas. La información recopilada será la mejor conocida, pero no es

todo lo buena que debería ser. El inventario de nuestra biota no está consumado, ni mucho menos.

El ejemplo de los chascones aquí expuesto apoya esta llamada a la cautela, y tiene además un segundo propósito. He intentado explicar en lenguaje llano y desenfadado, pero con cierto detalle, cómo se estudia la biodiversidad en su basamento, que lo constituyen las especies. Espero con ello contribuir a divulgar este oficio que pocos conocen o tienen presente, y que, de un tiempo a esta parte, muestra síntomas de regresión preocupantes. Los taxónomos han devenido en una suerte de “especie amenazada” dentro de la Ciencia oficial. Las nuevas tecnologías, los programas I+D, la exitosa parafernalia numérica de los ecólogos, la acuciante problemática ambiental y otras tantas circunstancias que se me escapan, tienden a acaparar los recursos económicos para becas y proyectos de investigación, así como las convocatorias de nuevas plazas. Los taxónomos son mirados como una suerte de hermano menor y anacrónico, y sus trabajos poco valorados a efectos de mérito y currículo académico. Nunca antes en Europa se ha dado la situación que viven los museos, en los que se amortizan las plazas de conservadores (taxónomos en su mayoría), cuando no cierran sus puertas. Consecuentemente, pocos estudiantes se sienten atraídos por esta disciplina que parece haber caído en desgracia.

Sin embargo, tengo fe, porque el reto de preservar la biodiversidad de nuestras regiones parece serio, se supone asumido, y no podrá abordarse con pies de cristal. O conocemos las especies, o no las conocemos. La biodiversidad y la sistemática están condenadas a ir de la mano so pena de perder el tiempo y los recursos.

Necesitamos taxónomos que aseguren el andamiaje de la biodiversidad, y los necesitamos con urgencia, pues cada vez se toman más y más decisiones –trascendentes para la sociedad– que se basan en especies biológicas, y a veces, en la incorrecta.

Es posible que en la actualidad el peso del trabajo taxonómico pivote sobre el mundo amateur, al menos en varios grupos zoológicos. Son muchos los amateurs –excelentemente preparados (no confundir con aficionados)– que encuentran en esta actividad un hobby intelectual con el que rellenar su tiempo de ocio. Mi respeto y reconocimiento a todos ellos (entre los que me incluyo) y mi ruego de que no abandonen en tanto las administraciones públicas reaccionan y decidan retomar la antorcha.

Me gustaría que este artículo sirviera también para despertar el interés de algún espíritu inquieto y biofísico, y que, con suerte, le anime a decantarse por la Taxonomía. Necesitamos muchos más taxónomos de los que hay, y créanme que es una actividad absorbente y gratificante que no requiere grandes dispendios. Hace años, cuando era estudiante de Biológicas y expresé mi intención de dedicarme a los bichos, Salvador Peris, quien fuera catedrático de Entomología de la Universidad Complu-

tense de Madrid, me espetó aquella inscripción que Dante encontró en las puertas del infierno: “¡Oh! vosotros los que entráis, abandonad toda esperanza”. Y no le faltaba razón; el tema engancha.

NOTA BENE: Los nombres de las nuevas especies no descritas y que se mencionan en este artículo quedan excluidos expresamente del registro científico al amparo del artículo 8.2 del Código Internacional de Nomenclatura Zoológica.

Bibliografía del autor relacionada con los chascones

- MACHADO, A. (2003). Sobre el método de coleccionar *Laparocerus* Schönherr, 1834 y el reconocimiento de sus marcas en las hojas (Coleoptera, Curculionidae). *Vieraea* 31: 407-420.
- MACHADO, A. (2005). *Laparocerus bacalladoi*, nueva especie de la isla de Tenerife, Canarias (Coleoptera, Curculionidae). *Vieraea* 33: 539-543.
- MACHADO, A. & A. AGUIAR (2005). Phenology of *Laparocerus* species in Tenerife, Canary Islands (Coleoptera, Curculionidae). *Boletim do Museu Municipal do Funchal* 56 (324): 5-21.
- MACHADO, A. & M. MORERA (eds.) (2005). *Nombres comunes de las plantas y los animales de Canarias*. Academia Canaria de La Lengua, Islas Canarias, 277 pp.
- MACHADO, A. (2006). The type material of the species of *Laparocerus* Schönherr, 1834 (Coleoptera, Curculionidae, Entiminae). *Journal of Natural History* 40 (35): 2001-2055.
- MACHADO, A. (2007a). New species of *Laparocerus* Schönherr, 1834 (Coleoptera, Curculionidae) from the island of Tenerife, Canary Islands. *Zootaxa* 1457: 35-48.
- MACHADO, A. (2007b). New species of *Laparocerus* Schönherr, 1834 from La Gomera, Canary Islands (Coleoptera, Curculionidae, Entiminae). *Zootaxa* 1643: 1-38.
- MACHADO, A. (2007c). *Rhyncogonus* and *Laparocerus* (Coleoptera, Curculionidae, Entiminae), a parallel case of success in island evolution. Report of a study trip to Moorea, Tahiti and Rurutu. *Vieraea* 35: 61-76.
- MACHADO, A., M. LÓPEZ, T. ALMEIDA & M. HERNÁNDEZ (2008). Mitochondrial DNA phylogenetic analysis of the genus *Laparocerus* (Coleoptera, Curculionidae, Entiminae). I. The Madeiran clade. *Zoologica Scripta*.

- MACHADO, A. (en prensa) Three new endogean species of *Laparocerus* Schönherr, 1834 from the Canary Islands (Coleoptera, Curculionidae). *Journal of Natural History*.
- MACHADO, A. (en prensa). New taxa of *Laparocerus* from Madeira and Porto Santo, with a key to all species of the archipelago (Coleoptera, Curculionidae, Entiminae). *Zootaxa*.

NOTAS EXPLICATIVAS

¹ La taxonomía se ocupa del estudio de los taxones o categorías de la sistemática biológica, tales como subespecie, especie, subgénero, género, familia, etc.

² Las subespecies son especies en vías de formación, o sea, poblaciones algo diferenciadas pero aun no independientes evolutivamente.

³ Existe una boletín electrónico, *CURCULIO, International Newsletter for Curculionoidea Research* que dirige Niko M. Franz, de la Universidad de Puerto Rico, que facilita el contacto entre todos los especialistas.

⁴ En el caso de autores antiguos, cuando aún no regían estas normas, se consideran “sintipos” a los ejemplares de la serie empleada para hacer la descripción, y todos tienen el mismo valor portanombre.

⁵ El “chupóptero” es el mote cariñoso que damos al aspirador entomológico, un recipiente del que parten dos tubos, uno para aspirar aire con la boca, y otro para succionar a los insectos, que caerán en el interior. Lógicamente, el de chupar termina en una redecilla dentro del recipiente, previniendo que uno se trague los bichos al aspirar.

⁶ La Fenología es la ciencia que estudia la relación entre los factores climáticos y los ciclos de los seres vivos.

⁷ La base de datos sobre *Laparocerus* cuenta en el momento que escribo con 5.085 registros, que son distintos siempre que cambia la especie, la localidad, la fecha o el colector. También se anota cuántos ejemplares se han preparado y cuántos se guardan sin preparar o se preservan en alcohol. Los datos ecológicos también se registran.

⁸ Genitalia = estructuras sexuales de los insectos.

⁹ Placas endurecidas que cubren ventralmente el abdomen.

¹⁰ La cámara clara es un artilugio óptico que se acopla a la lupa binocular o al microscopio (brazo lateral) y que permite ver la imagen observada superpuesta en un papel situado al lado, de modo que se puede perfilar el dibujo manteniendo las proporciones exactas, tal como se exige en ilustración científica.

¹¹ Se da preferencia a la solución más simple frente a la más compleja. La Naturaleza parece operar así.

3. Arrecifes y manglares: ecosistemas en la frontera entre la tierra y el mar

Marta Sansón

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

Gracias a la invitación del Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, y especialmente de Julio Afonso, he tenido el honor de participar en la III Semana Científica dedicada a D. Telesforo Bravo (12 al 16 de noviembre de 2007). Aunque no lo tuve como profesor durante mi licenciatura, sí que disfruté de sus enseñanzas, de su amor por la Naturaleza, su rigor científico y su espíritu divulgador durante las Semanas Científicas “Flora y Fauna en América y Canarias” que anualmente se celebraban dirigidas por D. Telesforo. Esta tercera Semana Científica ha estado dedicada a la “Naturaleza amenazada por los cambios en el clima”, sin duda uno de los temas más candentes en la actualidad debido a los numerosos problemas que el cambio climático está provocando en todo el planeta. Durante las últimas décadas, toda la comunidad científica ha alzado una voz de alerta ante este problema. Los científicos que conocemos la gran riqueza natural que nos rodea, sentimos más que nunca la necesidad urgente de divulgar nuestro conocimiento con el propósito de concienciar a la población para tomar medidas que frenen en lo posible esta amenaza global. Las líneas que siguen a continuación van dirigidas en este sentido, pretendiendo describir la gran belleza y diversidad de unos ecosistemas, quizás aún poco conocidos por el gran público, que se encuentran muy amenazados por los efectos del actual cambio climático. Los ecosistemas que les voy a mostrar son aquellos que se sitúan en la frontera entre la tierra y el mar en todas las costas del mundo, dedicándole una especial atención a dos ecosistemas característicos de las regiones tropicales muy sensibles a estos cambios medioambientales: los arrecifes y los manglares.

De todos es conocido que aproximadamente un 72% de la superficie de la Tierra está cubierto por los mares y los océanos. El medio marino, junto con la atmósfera, juega un papel fundamental en la regulación de la temperatura en el planeta. Entre otros factores ambientales, las condiciones de temperatura en las diferentes regiones de la Tierra permiten la existencia de una gran diversidad de climas y una elevada variedad de ecosistemas y organismos. La temperatura es un factor especialmente importante en los procesos vitales y en la distribución de las especies, que se ven muy afectadas cuando sus hábitats son alterados. Aunque a lo largo de sus 4.600 millones de años, la Tierra ha sufrido grandes variaciones en sus climas, actualmente está ocurriendo un calentamiento global mucho más rápido de lo esperado. Los resultados de las numerosas investigaciones científicas que se han realizado en los últimos años, permiten decir que las actividades generadas por el hombre son responsables en gran medida de este aumento en la temperatura, especialmente las emisiones de dióxido de carbono resultado de la quema de combustibles fósiles, y de otros gases de efecto invernadero hacia la atmósfera que, de acuerdo con los datos recientes publicados, han aumentado más de un 70% en los últimos treinta años. Las emisiones medias de CO₂ son de 5,5 toneladas por habitante y año, siendo superiores en los países más industrializados. Mediante el efecto invernadero, ciertos gases atmosféricos atrapan las radiaciones que emite el suelo caliente y evitan que se pierdan en el espacio exterior. Sin estos gases se estima que el promedio de la temperatura de la superficie terrestre rondaría unos -19°C, en lugar de los actuales +14°C. Los gases de efecto invernadero suponen menos del 1% del conjunto de gases presentes en la atmósfera, pero atrapan el calor de manera muy efectiva.

El calentamiento global ya está mostrando sus efectos en paisajes naturales de todo el mundo. Uno de los efectos más evidentes es el gran deshielo que está ocurriendo en los glaciares de montañas y en los grandes casquetes polares, lo que está elevando el nivel de los océanos y alterando el clima en muchas regiones del planeta. Los fenómenos climatológicos extremos, como lluvias torrenciales, inundaciones y olas de calor se han hecho más frecuentes, afectando a las poblaciones en todo el mundo. Los impactos del cambio climático incluyen aspectos como la salud, el abastecimiento de agua, la agricultura y otros sectores económicos, siendo las previsiones especialmente desfavorables para los países más pobres.

Los datos mostrados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001), formado por un grupo de más de 2.500 científicos organizado por Naciones Unidas, son realmente alarmantes. La temperatura media global en la superficie terrestre ha aumentado 0,6°C en el último siglo, habiéndose registrado desde 2001 siete de los ocho años más cálidos conocidos. Aunque las emisiones de gases se reduzcan considerablemente, en 2100 la temperatura habrá subido 2°C; y, si las emisiones continúan,

aumentará entre 3 y 5°C. Entre otras consecuencias, este incremento de la temperatura será el responsable directo de la fusión de los casquetes polares y la mayoría de los glaciares. La tierra se calienta más deprisa que el agua, una de las razones por las que el aumento de la temperatura ha sido mayor en el hemisferio norte, donde se ha perdido más de un 5% de nieve en los últimos treinta años. A medida que los océanos se calientan, su volumen aumenta, lo que contribuye al ascenso del nivel del mar. El nivel del mar seguirá subiendo durante más de un siglo, aunque se eliminaran totalmente las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el mundo. En los últimos cincuenta años, el nivel se ha incrementado unos 0,8 mm al año; así, para final de siglo habrá subido unos 50-100 cm y 4-6 metros en los próximos siglos. Tal es la preocupación que existe sobre el efecto y las consecuencias del cambio climático que, en los últimos años, se han publicado numerosísimos artículos científicos y divulgativos. Entre ellos, les remito a los artículos publicados en National Geographic en 2007, donde se recogen muchas de las evidencias científicas que informan y alertan sobre los cambios fundamentales en el mundo tal como hoy lo conocemos (Appenzeller, 2007; Nicklen, 2007; Miller, 2007; van den Berg, 2007).

Los ecosistemas situados en la frontera entre la tierra y el mar son especialmente vulnerables a todas estas alteraciones ambientales. En la frontera tierra-mar se dan unas condiciones medioambientales particulares, muchas veces de elevado estrés para la gran diversidad de organismos que ahí habitan, a las que han tenido que adaptarse durante su larga historia evolutiva. Cuando me refiero a estos ambientes fronterizos estoy incluyendo las zonas litorales afectadas por las mareas así como las zonas sumergidas más superficiales de los continentes e islas, hasta unos 50-200 m de profundidad según las regiones del mundo. En esta estrecha franja, si la comparamos con las grandes profundidades de los océanos, viven *organismos terrestres*, principalmente hierbas, arbustos, árboles y fauna asociada, adaptados a tolerar el intenso estrés hídrico al que se ven sometidos regularmente por las oscilaciones de las mareas; y numerosos *organismos marinos* (algas, hierbas marinas y animales) que necesitan crecer en el mar y que constituyen ecosistemas de los más productivos del planeta.

De forma similar a lo que ocurre en el medio terrestre, los ecosistemas litorales y marinos del mundo constituyen biomas o grandes formaciones, con sus floras y faunas características, que se distribuyen en las diferentes latitudes principalmente en función de la temperatura del agua del mar y de razones paleo-históricas. Esta distribución latitudinal me va a permitir, a continuación, mostrarles un recorrido por los principales biomas que podemos observar en la frontera tierra-mar, desde las regiones polares hasta las regiones tropicales. Mi propósito es enseñarles sus singularidades, la riqueza de organismos que los componen, así como la fragilidad y

vulnerabilidad de algunos de estos ecosistemas frente al actual cambio climático.

Principales biomas en la frontera entre la tierra y el mar

Durante algo más de diez años, he tenido la fortuna de poder viajar a diversos países situados en diferentes latitudes del planeta, siempre atraída por la diversidad paisajística y biológica de estos lugares. Acompañada por Javier Reyes, autor de las fotografías que incluyo en este texto, hemos tenido la oportunidad de visitar lugares muy entrañables e interesantes por diferentes motivos pero, sobre todo, porque nos ha permitido entrar en contacto y disfrutar directamente de la riqueza y diversidad de los biomas que les voy a mostrar a lo largo de mi exposición. Estos biomas, localizados en la frontera entre la tierra y el mar, contribuyen en gran medida a la asombrosa biodiversidad de nuestro planeta, y están caracterizados en la mayoría de las regiones del mundo por su vegetación dominante, a la que me referiré especialmente en esta ponencia. No obstante, también haré referencia a la fauna asociada y trataré con cierto detalle algunas formaciones animales, como los espectaculares arrecifes de coral que se forman en las regiones tropicales.

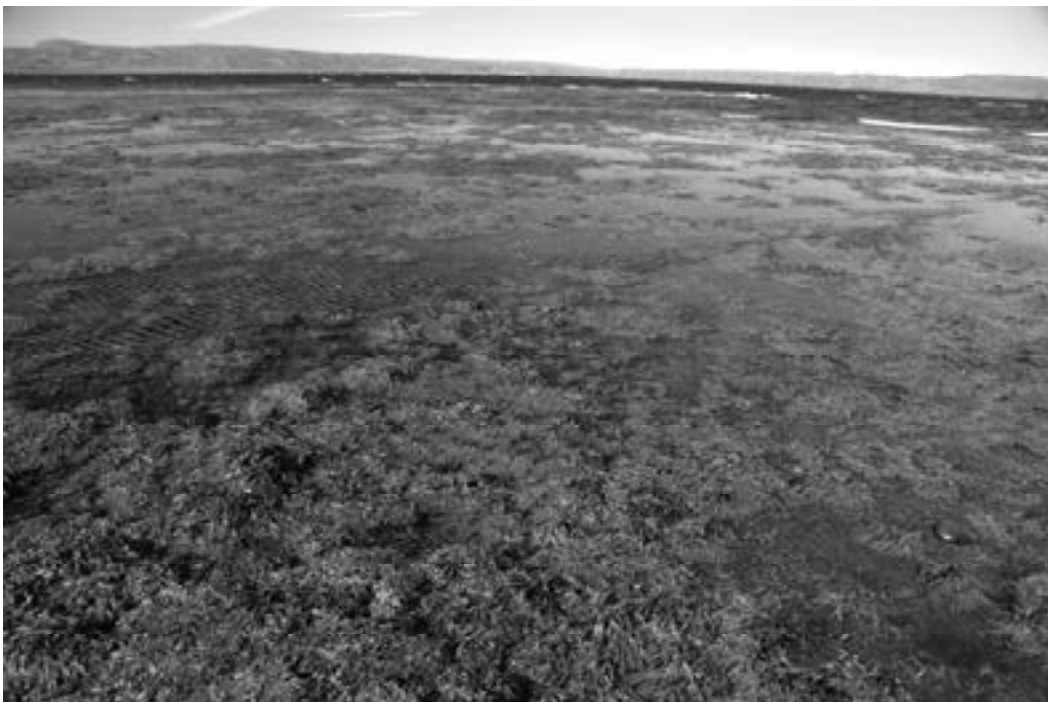
En las regiones polares, la vegetación marina es muy reducida. En la región ártica, no se observa vegetación permanente en cientos de kilómetros, ni en la zona de mareas ni en los primeros metros de profundidad, debido al efecto del hielo. Los bloques de hielo sí aparecen con frecuencia coloreados de marrón por el crecimiento de una biota microscópica constituida por bacterias, pequeños crustáceos y principalmente microalgas del grupo de las diatomeas. Bajo el hielo, sin embargo, algunas macroalgas polares pueden sobrevivir un tiempo considerable, ya que están bien adaptadas a crecer durante largos períodos en condiciones de baja temperatura y poca iluminación, y aprovechar las cortas ventanas de luz de que disponen durante el verano. En el sur de la región ártica, las condiciones son ya menos estresantes. Las especies que viven en la zona de mareas, aunque quedan cubiertas por el hielo cada año, pueden sobrevivir; y también las especies que crecen siempre sumergidas, que en estas latitudes no están afectadas por el estrés mecánico de la congelación-descongelación de la masa de agua. En algunas localidades de Groenlandia, con temperaturas inferiores a 3°C y con 1-2 metros de hielo desde septiembre a mayo, algunas algas verdes efímeras crecen en la zona de mareas durante los meses sin hielo, mientras que hasta unos veinte metros de profundidad existe una vegetación pobre en especies, dominada por algas rojas costrosas. Más hacia el Sur, en los primeros metros de profundidad, aparecen las primeras especies de *Laminaria*, grandes algas pardas que forman bosques submarinos. Aunque en estas latitudes las

condiciones de estrés se reducen, cuando uno visita los paisajes litorales en las regiones más frías del planeta, como tuvimos ocasión de hacerlo en las costas del Norte de Noruega, uno puede ver y sentir las duras condiciones a las que aún así tienen que enfrentarse los organismos que allí habitan. En el hemisferio Sur, las condiciones ambientales son similares; sin embargo, las floras y faunas de la Antártida son bastante más ricas, siendo el número de especies de los mayores grupos de organismos bentónicos de 1,5 a 6 veces superior en la Antártida que en el Ártico. En la Antártida, tal como describen Amsler *et al.* (1995), dominan otras especies de algas pardas, como *Desmarestia* y géneros afines. Por supuesto, las aves (pingüinos y pájaros) y los mamíferos (osos, focas, leones marinos, cetáceos...) que habitan en las regiones polares son los organismos más conspicuos del hielo, y son los que atraen a un público interesado en el turismo y la explotación de estas regiones, y a científicos preocupados por su conservación. Precisamente, el cambio climático global en estas regiones polares está afectando de forma notable a estos animales. El deshielo del Ártico y el retroceso de la banquisa sitúa a los osos polares al borde de la extinción, disminuye la fuente de alimentos de las ballenas y deja a las focas sin un lugar donde parir y descansar (Nicklen, 2007). Las últimas estimaciones indican que hacia el 2050, no habrá casi hielo estival en el Océano Ártico, lo que tendrá efectos muy negativos sobre esta biota polar (ver Kaiser *et al.*, 2005).

En las regiones templado-frías, las oscilaciones de las mareas son amplísimas, variando habitualmente entre cinco y diez metros, encontrándose paisajes litorales diferentes según la exposición al oleaje y la naturaleza rocosa o sedimentaria de las costas. En las costas rocosas, los ambientes protegidos frente a la hidrodinámica marina, aparecen cubiertos por densas poblaciones de algas pardo-amarillentas, que durante las bajamareas quedan al descubierto desprendiendo un intenso olor muy característico. En las costas protegidas al noroeste de Noruega y en Islandia, pudimos observar como estas bandas de algas realmente forman parte del paisaje de los fiordos, bordeando las aguas tranquilas y cristalinas en las que se reflejan las altas montañas. En la zona de mareas aparecen las bandas de fucles (algas pardas de los géneros *Pelvetia*, *Fucus*, *Ascophyllum*), con individuos de hasta medio metro de longitud, mientras que en los primeros metros de profundidad las amplias poblaciones son de *Laminaria*, con especímenes de hasta tres metros. Lüning (1990), en su trabajo sobre la biogeografía de las algas, realiza muy buenas descripciones de estos paisajes en diferentes partes del mundo.

En las aguas más profundas, aparecen los denominados fondos de *mäerl*, es decir grandes acumulaciones de algas rojas costrosas calcificadas que viven libres y son arrastradas por las corrientes marinas hasta ese lugar. En los ambientes expuestos, sin embargo, las bandas de fucles son sustituidas

por poblaciones densas de algas rojas (*Porphyra*, *Mastocarpus*, *Chondrus*) y, en las zonas sumergidas, las laminarias son sustituidas por otras algas pardas muy similares (*Alaria*).



Los ambientes protegidos frente al oleaje en las regiones templado-frías del mundo aparecen cubiertos por densas poblaciones de algas, que durante las bajamareas quedan reposando sobre las rocas o parcialmente flotando en las orillas. Estas amplias bandas de algas ocupan gran parte del litoral en las tranquilas aguas de las Islas Lofoten (arriba), situadas al noroeste de Noruega, y en los fiordos de la gran península noroccidental de Islandia (abajo).



En los fiordos situados al Noroeste de Islandia, en los que como en un espejo se reflejan las altas montañas, las amplias y densas bandas de algas frondosas fucales aparecen como una parte más del paisaje. Estas poblaciones de algas, formadas por individuos de color pardo-amarillento y de más de medio metro de longitud, bordean las aguas tranquilas y cristalinas de los fiordos. En bajamar (arriba) quedan emergidas, en pleamar (abajo) flotan hacia la superficie.

En las costas sedimentarias, la zona de mareas está ocupada por formaciones de marismas. Las marismas se desarrollan en lugares protegidos del oleaje, con escasa pendiente, donde existe deposición de sedimentos y aportes de agua dulce. El aspecto general de una marisma es similar en todo el mundo. El paisaje está dominado por hierbas, juncos y arbustos, de géneros como *Spartina*, *Limonium*, *Juncus* y *Salicornia*, que presentan rasgos morfológicos muy parecidos, con tallos horizontales y fascículos de raíces que las ayudan a fijarse al sustrato arenoso-lodoso en el que crecen. Estas plantas terrestres suelen quedar sólo parcialmente sumergidas aunque, en ocasiones, el agua de mar las cubre totalmente. La mayoría de las plantas de las marismas han desarrollado adaptaciones morfológicas y anatómicas que les permiten tolerar la elevada salinidad. Cuando uno visita una marisma, enseguida detecta que la vegetación marina está muy empobrecida, en comparación con la de las costas rocosas próximas. Las especies más comunes son algas verde-azules, verdes y diatomeas, aunque también pueden crecer esporádicamente algunas algas pardas fucales. Ciertas especies de hierbas marinas, conocidas como fanerógamas marinas, pueden formar praderas en la zona de mareas (*Zostera noltii*) o en los fondos someros próximos (*Zostera marina*).

Aunque estos biomas de las regiones templado-frías son comunes en ambos hemisferios, en algunas costas la composición de especies es diferente. Así, por ejemplo, en las costas del noreste del Pacífico, desde Alaska hasta California, destacan los bosques submarinos conocidos en la literatura como bosques de quelpos, en los que las algas pardas gigantes *Macrocystis* y *Nereocystis*, que pueden alcanzar hasta cien metros de longitud, son las protagonistas (Steneck *et al.*, 2002). Los quelpos son los mayores vegetales que pueden encontrarse en los mares, formando un hábitat muy parecido a un bosque terrestre, actuando a modo de grandes árboles entre cuyas ramas viven otras algas y numerosos animales marinos, como nutrias, peces y cetáceos, entre otros.

Las oscilaciones de las mareas en las regiones templado-cálidas son mucho más reducidas que en las templado-frías, alcanzando entre medio metro y tres metros de amplitud. Los paisajes litorales están ocupados por poblaciones de algas costrosas o densos céspedes muy ricos y diversos, con individuos de tamaño mucho menor que en las regiones más frías. En las costas rocosas, estas formaciones costrosas y cespitosas siempre se disponen formando varias bandas horizontales, sobre todo en la zona de mareas. Las especies que forman estas bandas son muy diferentes de unos lugares a otros, sobre todo dependiendo de la exposición al oleaje, por lo que es muy difícil en este caso darles un patrón general. En los primeros metros de profundidad, sí que destacan los paisajes dominados por densos bosques de algas pardas arborescentes (*Cystoseira*, *Sargassum* y géneros afines). Los fondos de *mäerl* o de rodolitos (“piedras rojas”) también son

comunidades particularmente abundantes en estas regiones templado-cálidas, formando bosques en miniatura con una elevada biodiversidad, dominados por algas rojas calcáreas que se acumulan por las corrientes marinas en fondos de sedimentos, desde casi la superficie hasta más de cien metros de profundidad. En las costas arenosas, las praderas de fanerógamas marinas (*Zostera*, *Cymodocea*, *Posidonia*) dominan los paisajes, sobre todo ocupando los fondos iluminados poco profundos hasta unos cuarenta metros de profundidad. Luque & Templado (2004) tratan de forma muy amena y detallada los bosques y praderas marinas de las costas tanto atlánticas como mediterráneas de Andalucía, que reflejan en buena medida cómo son los paisajes litorales en algunas de las regiones templado-cálidas. Las marismas también están presentes en la zona de mareas en ciertas localidades, ocupando el mismo tipo de ambientes que ya comenté en las regiones protegidas más frías del mundo.

Las islas Canarias presentan paisajes litorales que concuerdan con el modelo general de las regiones templado-cálidas, pero con singularidades en la composición de especies que dominan en los diferentes niveles del litoral. En pocas líneas, es difícil de resumirles las particularidades de la flora marina canaria, pero intentaré mostrarles un patrón general en función de las características del litoral y del diferente grado de exposición al oleaje. Si el lector quiere más detalles sobre algunos aspectos de la flora marina de las islas pueden consultarlos en Sansón *et al.* (2001) y Gil-Rodríguez *et al.* (1992). En la zona de mareas en las costas rocosas existe un predominio de poblaciones cespitosas y costrosas, con gran número de especies, dispuestas en sucesivas bandas horizontales. En las costas rocosas expuestas al oleaje, la banda más alta o frontera litoral está caracterizada por la abundancia de algas verde-azules y del ‘chirrimil’ *Littorina*. A continuación, se distinguen tres bandas diferentes que, en conjunto, forman el denominado eulitoral. La superior está siempre dominada por el ‘canutillo de mar’ *Chthamalus stellatus* y diversas algas verde-azules (la ‘verruguita gelatinosa’ *Calothrix* y el ‘piche de mar’ *Brachytrichia*), aunque en algunas localidades pueden aparecer poblaciones del ‘fideo de mar’ *Nemalion helminthoides* en primavera. La banda media está ocupada principalmente por costras del alga parda *Ralfsia verrucosa* y del ‘caliche de La Orotava’ *Neogoniolithon orotavicum*. La banda inferior está dominada por algas rojas calcificadas (el ‘caliche tropical’ *Hydrolithon onkodes* y la ‘coralina rosa’ *Corallina elongata*) y otras especies acompañantes. El comienzo del sublitoral, es decir de la zona que siempre queda sumergida durante las bajamares, está señalado por la presencia de tres bandas estrechas sucesivas: la superior del ‘mujo amarillo’ *Cystoseira abies-marina*, la media del ‘gelidio rojo’ *Gelidium arbuscula* y la inferior del ‘gelidio negro’ *Gelidium canariense*. Las costas rocosas protegidas del oleaje son escasas en nuestras islas. En estos ambientes, la frontera litoral está colonizada por algas verde-azules. El

eulitoral superior está ocupado por el ‘canutillo de mar’ y algunas algas verde-azules (la ‘verruguita gelatinosa’ y el ‘verdín resbalón’ *Schizothrix*), el eulitoral medio está dominado por céspedes de la ‘coralina rosa’, mientras que el sublitoral comienza con poblaciones del ‘abanico pavorreal’ *Padina pavonica*, la ‘escoba de mar’ *Stypocaulon scoparium* y la ‘jania’ *Jania rubens*.

Los fondos rocosos suelen estar dominados por especies de mujo, en especial el ‘mujo amarillo’, que habitualmente forma poblaciones muy densas sobre las rocas bien iluminadas de los ambientes expuestos y semiexpuestos. En muchas ocasiones, en estos fondos intervienen otras algas pardas, como los ‘sargazos’ *Sargassum*, las ‘cintas de mar’ *Dictyota*, el ‘abanico de Tournefort’ *Zonaria* y el ‘abanico marrón’ *Lobophora*. En Canarias, por debajo de los 10 m de profundidad, las comunidades de algas son generalmente más pobres en especies. Sin embargo, en determinados ambientes se desarrollan poblaciones de algas muy bellas y singulares, como los ‘penachos de fondo’ *Sporochnus* y las ‘babas’ *Dudresnaya*, entre otras. Los fondos más profundos y poco inclinados albergan comunidades de algas constituidas, con frecuencia, por un estrato costroso de especies calcáreas sobre el que crecen especies erectas, como las ‘lechuguitas de mar’ *Microdictyon* y ‘el abanico marrón’, en ocasiones ligados a las poblaciones del ‘coral negro’ *Antipathes wollastoni*. Las paredes verticales y extraplomos suelen estar ocupados por algas rojas costrosas y otras especies típicas de ambientes poco iluminados, que comparten el sustrato con esponjas y cnidarios. A mayor profundidad son comunes los fondos de *mäerl*, que fueron descritos con detalle por Ballesteros (1993). En los fondos arenosos protegidos del oleaje, la ‘seba’ *Cymodocea nodosa* forma extensas praderas o ‘sebadales’ en aguas poco profundas, mientras que la ‘hojitas de arena’ *Halophila decipiens* crece a mayor profundidad en fondos más lodosos (Reyes *et al.*, 1995; Gil-Rodríguez *et al.*, 2007).

El modelo general de biomas que les he mostrado para las regiones templado-cálidas del hemisferio norte es similar en el hemisferio sur, sobre todo en el dominio de densas comunidades de algas cespitosas. Sin embargo, igual que para las regiones templado-frías, las comunidades de algas en ambos hemisferios se diferencian en su composición florística, que está dominada en cada caso por especies endémicas de esas regiones.

Voy a terminar este recorrido mostrándoles los paisajes más característicos de las regiones tropicales. En general, la vegetación marina de los trópicos presenta una elevada biodiversidad, debido fundamentalmente a que constituyen los hábitats marinos más antiguos del planeta. En estas regiones, coexisten numerosas especies de algas verdes, pardas y rojas, entre las que dominan formas calcificadas, muchas de ellas exclusivas de estas regiones tropicales. Además, las costas tropicales constituyen el lugar de origen y diversificación de las fanerógamas marinas.

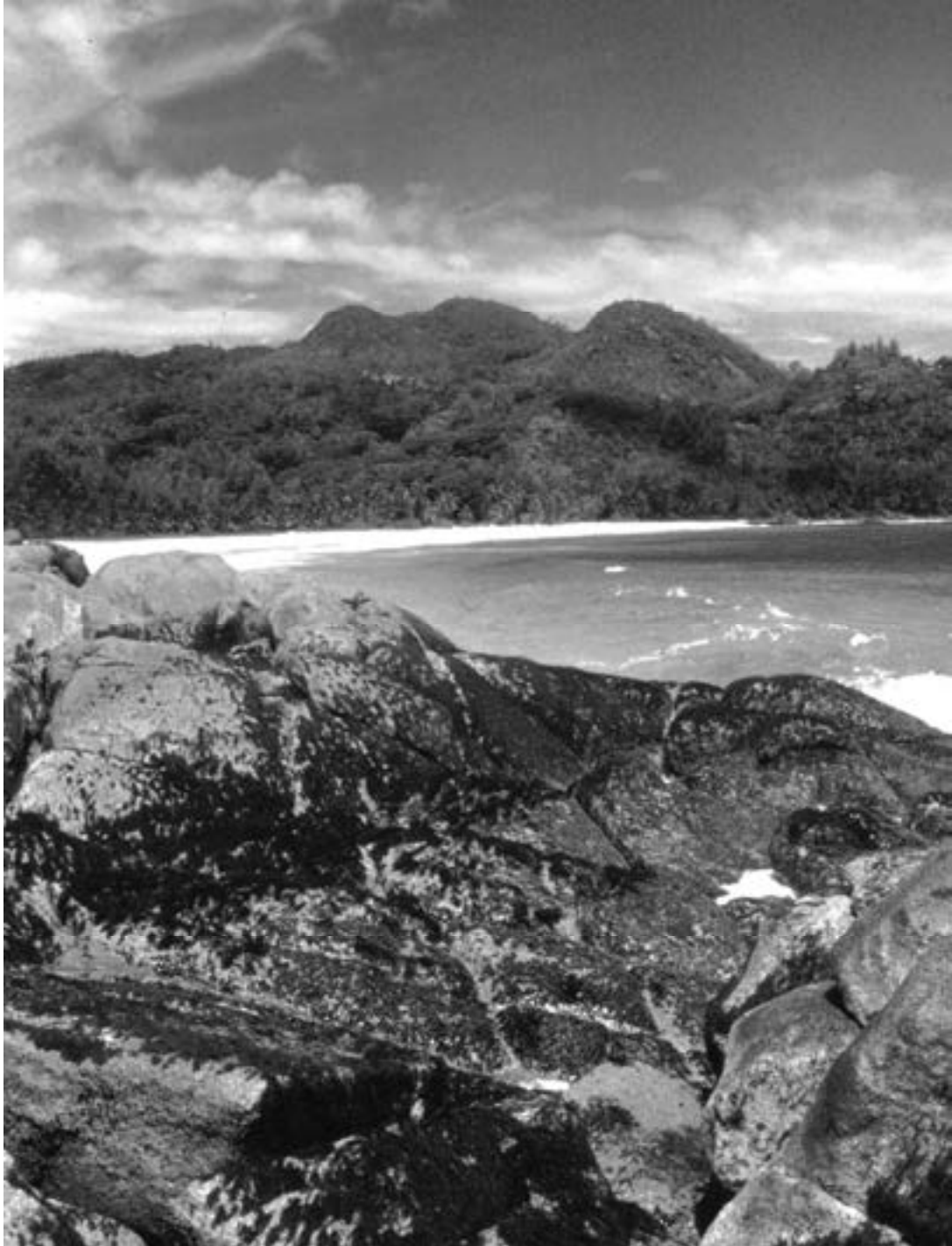


En regiones templado-cálidas, el límite de las mareas y los fondos rocosos bien iluminados, suelen estar dominados por poblaciones densas de diferentes algas pardas. En las islas Canarias, el 'mujo amarillo' *Cystoseira abies-marina* forma orlas (arriba izquierda) o extensas praderas (abajo) sobre las rocas en fondos someros. Los ambientes submarinos oscuros están, por el contrario, dominados por algas rojas costrosas y otras especies esciáfilas, que crecen con esponjas y cnidarios. En la Reserva Marina del Mar de las Calmas en El Hierro (arriba derecha), puede observarse el típico puzzle que forman los organismos que comparten paredes rocosas sumergidas y poco iluminadas.

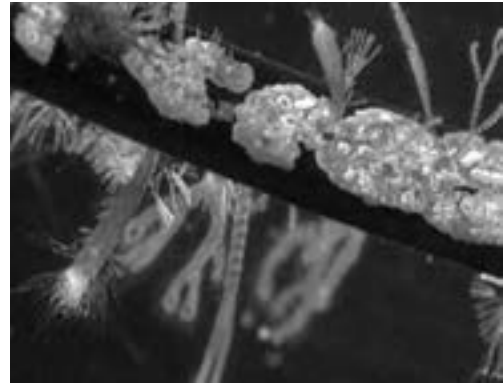
La vegetación de las costas del Caribe nos sirve como ejemplo para analizar las características principales en estas regiones cálidas. Al caminar por las plataformas rocosas litorales en estos lugares con oscilaciones de mareas inferiores a un metro de amplitud, uno se da cuenta enseguida de la reducción en tamaño que sufre la vegetación marina en estas latitudes, donde forman pequeñas almohadillas o pulvínulos aislados, especialmente en las zonas emergidas durante las bajamareas en las que las algas quedan expuestas a temperaturas elevadas. En las costas rocosas expuestas hay algas verde-azules y abunda la diminuta alga roja *Herposiphonia* en la banda más alta del litoral y, por debajo, viven los balanos y crecen grupos muy variados de pequeñas algas (*Cladophoropsis*, *Herposiphonia*, *Centroceras*, *Caulerpa*). En las costas rocosas protegidas, la banda más alta está ocupada por algas verde-azules y la pequeña alga roja *Bostrichia*, mientras que por debajo abundan almohadillas de algas pardas de pequeño porte (*Sphacelaria*, *Hincksia*). El alga verde *Valonia* es la protagonista en el nivel inferior. En ambas situaciones, expuestas y protegidas, los fondos poco profundos suelen estar ocupados por arrecifes coralinos. Las costas rocosas desprovistas de arrecifes presentan densas poblaciones de algas pardas, como los sargazos y géneros afines. Las aguas más profundas, en algunos casos hasta más de doscientos metros cuando las aguas son muy claras y cristalinas, muestran una variada vegetación en la que, además de algas rojas calcáreas, intervienen especies exclusivas de estos hábitats. Estas algas con formas muy bellas y espectaculares han sido estudiadas por muchos autores, y les remito a la guía publicada por Littler & Littler (2000) en la que se incluyen descripciones y muy buenas fotografías de muchas de estas especies de algas tropicales.

Las costas sedimentarias y arenosas, protegidas del oleaje, presentan una vegetación litoral dominada por los manglares, y los fondos están cubiertos por amplias praderas de fanerógamas marinas. Estos paisajes que les he mostrado para las costas del Caribe también nos sirven como patrón general de los biomas de la región tropical del Indo-Pacífico, aunque en ésta hay una mayor biodiversidad, tanto de algas como de fanerógamas marinas.

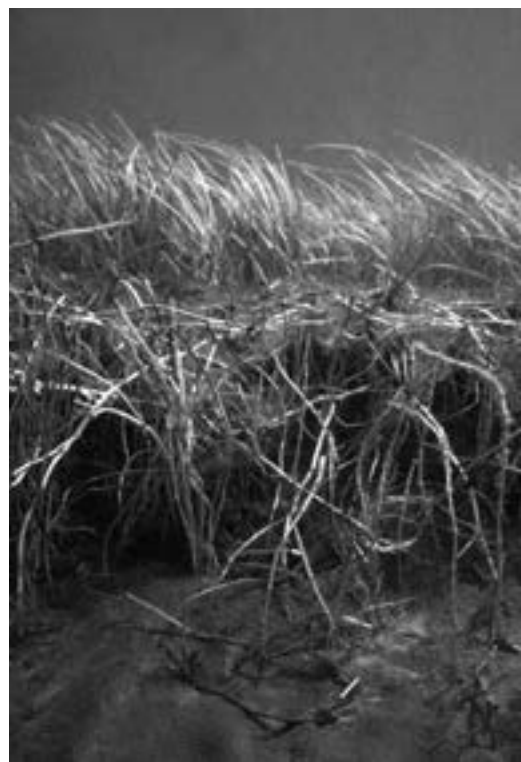
Aunque uno está acostumbrado a bucear en fondos cubiertos por hierbas marinas, ya que en Canarias poseemos frondosos sebales, cuando buceas en los fondos de arena en los trópicos, como tuvimos la fortuna de hacerlo en el Caribe y en las islas Seychelles, la sensación es bastante diferente. Las fanerógamas marinas, que son las únicas plantas vasculares creciendo en las arenas submarinas, allí forman extensas praderas muy iluminadas, de color verde intenso, que contrastan con las arenas blanquecinas y las aguas azul turquesa tan espectaculares en estas costas del mundo. De las más de doscientas mil especies de plantas con semillas conocidas, tan sólo se han descrito 58 especies de fanerógamas marinas a nivel mundial. Este número reducido de especies es debido a su origen muy reciente.



Las plataformas rocosas litorales en las regiones más cálidas del mundo están colonizadas por una vegetación marina muy reducida. Como observamos en esta fotografía de las costas de Mahé (islas Seychelles), las algas son de pequeño porte y forman pulvínulos aislados, sobre todo en las rocas que quedan emergidas y expuestas a temperaturas elevadas durante las bajamares.



En Canarias, los fondos arenosos protegidos del oleaje presentan densos 'sebadales' de *Cymodocea nodosa* (izquierda). Estos ecosistemas, dominados por fanerógamas marinas, existen tanto en regiones templadas como tropicales. Son hábitats muy importantes para el refugio y puesta de peces e invertebrados. También, sus hojas en forma de cintas constituyen un lugar estable para el crecimiento de muchas especies epífitas (derecha).



Las arenas submarinas de las regiones tropicales también están colonizadas por extensas praderas de fanerógamas marinas, que se forman desde muy próximas al nivel del mar hasta mayores profundidades. A la izquierda, se observa una extensa pradera superficial, en el sur de República Dominicana. El entramado de tallos horizontales y verticales que estas plantas desarrollan (derecha) estabilizan los sedimentos, de forma similar a cómo lo hacen las plantas de las dunas.

Hace apenas unos 70 millones de años que sus ancestros retornaron al mar, a partir de plantas xerófitas de marismas. La colonización de los fondos marinos por estas plantas con flores, con una serie de dispositivos innovadores como las raíces y los sistemas vasculares, supuso la aparición de unos nuevos competidores para las algas, protagonistas hasta ese momento de la vida vegetal marina. Mientras las algas se sitúan principalmente sobre los sustratos rocosos o duros, las fanerógamas se adaptaron para ocupar los fondos sedimentarios, bien iluminados. Desarrollaron la capacidad para vivir totalmente sumergidas, la tolerancia a la elevada salinidad del agua de mar y un sistema eficaz de anclaje a los sustratos sedimentarios, que son muy inestables en el medio marino. Todas las fanerógamas marinas son muy parecidas. Constan de tallos horizontales, que contribuyen a la expansión de las praderas; tallos verticales, para evitar que la planta quede enterrada por el sedimento; fascículos de raíces, con las que la planta se ancla al sustrato y a través de las cuales absorben nutrientes; y hojas acintadas, ovaladas o cilíndricas, agrupadas en haces, a través de las cuales realizan la fotosíntesis. Quizás lo que más puede llamar la atención al lector es que estas hierbas marinas florecen bajo la superficie de los océanos. Sus flores son diminutas, inconspicuas y difíciles de observar, pero han supuesto una fantástica adaptación al medio marino permitiéndoles una exitosa reproducción.

Las praderas de fanerógamas cubren en todo el mundo, sobre todo en estas regiones tropicales, aproximadamente unos 600.000 km² de los fondos marinos someros. La importancia de estas formaciones vegetales sumergidas no sólo estriba en la elevada producción de estos ecosistemas, comparable a la de los bosques lluviosos tropicales, sino también porque desempeñan un papel importante en la biología y dinámica costeras. La elevada densidad de hojas en las praderas favorece el depósito de partículas en suspensión y, por ello, la transparencia de las aguas. Su complejo entramado de rizomas y raíces estabilizan los sedimentos en estos fondos, como lo hacen las plantas de las dunas. Además, atenúan la hidrodinámica y la erosión costera. Son responsables de una elevada producción de oxígeno y de materia orgánica. Y, constituyen el hábitat para numerosas especies vegetales y animales, que viven sobre sus hojas o entre ellas, muchas de las cuales utilizan estos ambientes como lugar de reproducción y refugio para sus fases juveniles. La apasionante biología de las fanerógamas marinas está muy bien tratada en Larkum *et al.* (1989), quienes editaron un libro en el que recopilan numerosos aspectos de este interesante grupo de plantas, con especial referencia a la región Australiana donde crece la mayoría de las especies descritas hasta el momento.

El futuro de los ecosistemas de las costas rocosas y arenosas del mundo depende de la perspectiva temporal que consideremos pero, en general, no es demasiado positivo. Una serie de análisis realizados para predecir las

amenazas sobre estos hábitats en los próximos veinte años han destacado que, muchos de los impactos antropogénicos sobre las costas de las regiones templadas y tropicales, seguirán aumentando de forma continuada, sobre todo con los proyectos de incrementar las poblaciones costeras en todo el mundo. Brown & McLachlan (2002), Kennish (2002) y Thompson *et al.* (2002) analizaron el futuro de algunos de estos ecosistemas litorales. Pero, además, el incremento acelerado del nivel del mar en los próximos 50-100 años como consecuencia del cambio climático tendrá impactos a gran escala en todas las costas del mundo. Las predicciones apuntan hacia cambios severos en las corrientes y oleaje, provocando eventos catastróficos más frecuentes (IPCC, 2001). En la actualidad, se desconoce cómo las comunidades litorales responderán a estos cambios, pero se sabe que muchas especies tendrán grandes dificultades para adaptarse, sobre todo debido al probable descenso en sus tasas de reproducción y reclutamiento.

Aunque todos los biomas que les he mostrado son ecosistemas irremplazables, con unas singularidades y biodiversidad únicas, voy a dedicar por último una especial atención a dos de los más valiosos hábitats marinos del mundo, por su elevada productividad y riqueza en especies: los manglares y los arrecifes de coral. En primer lugar, les voy a enseñar las principales características ambientales y biológicas de estas formaciones, y el importante papel que desarrollan; y, después, les mostraré cómo las alteraciones de estos hábitats, sobre todo las relacionadas con el cambio climático, les están afectando situándolos entre los ecosistemas más frágiles, sensibles y vulnerables del planeta, con mayor peligro de extinción.

Manglares

Los manglares son biomas característicos de las costas sedimentarias de las regiones tropicales. Estas formaciones están dominadas por árboles (mangles) y arbustos, y sustituyen a las marismas en las regiones más cálidas del planeta. Principalmente se forman en lugares protegidos del oleaje, con escasa pendiente, donde existen grandes depósitos de sedimentos y aportes de agua dulce. El suelo fangoso en el que se desarrollan es profundo, oscuro, rico en bacterias, pobre en oxígeno, y constantemente inundado durante las pleamares. Cuando llegas por primera vez a un manglar, además de notar esa sensación de humedad sofocante típica en los trópicos, lo que más te impacta es precisamente el intenso olor que desprende el suelo, difícil de describir y de olvidar. Es la primera sensación que me viene a la cabeza, cuando recuerdo por ejemplo mi visita a los espectaculares manglares en la costa pacífica de Costa Rica.

Los manglares se sitúan geográficamente a ambos lados del ecuador, hasta la isoterma de 20°C. No obstante, aunque se les considera formaciones

tropicales, también se forman en latitudes más templadas, favorecidos por las corrientes marinas y las condiciones de temperatura locales.



Los manglares se forman en costas tropicales sedimentarias, protegidas del oleaje, llanas, inundadas durante las pleamares y con constantes aportes de agua dulce (arriba). El suelo fangoso del que sobresalen numerosísimas raíces (abajo, neumatóforos en bajamar), llama mucho la atención en estos hábitats. Las dos fotografías fueron tomadas en un manglar en la costa pacífica de Costa Rica.

La mayor diversidad de especies en estos bosques ocurre en el Indo-Pacífico occidental, decreciendo considerablemente en el resto de las regiones. Probablemente, esto se debe al gran aumento de la diversidad en el Indo-Pacífico después de la deriva de los continentes (ver Kaiser *et al.*, 2005).

Existen diferentes tipos de manglares, según la forma de la costa, el grado de sedimentación, el régimen de salinidad del agua, y la influencia relativa de las mareas y del agua dulce. Los ‘manglares de ribera’, muy abundantes en costas tropicales asiáticas, se forman donde la amplitud de mareas es mínima y los aportes de agua dulce son dominantes, como en los deltas de los grandes ríos. Los ‘manglares de borde’ ocupan la zona de oscilación de mareas, con frecuencia en lugares expuestos, donde constituyen una barrera frente al oleaje. Por último, los ‘manglares de cuenca’ son los que se forman tierra adentro a partir de los manglares de borde, en condiciones de escasa oscilación de marea y oleaje, aunque con salinidad muy variable debido a la evaporación y a la lluvia.

Los manglares constituyen paisajes en los que dominan plantas terrestres, que pertenecen a unas dieciséis familias taxonómicas, dos de ellas con una elevada diversidad e importancia ecológica en todos los manglares del mundo: las aviceniáceas y las rizoforáceas. La primera está representada por ocho especies de mangle negro *Avicennia*; y la segunda incluye ocho especies de mangle rojo *Rhizophora* y otros tres géneros menos conocidos (*Bruguiera*, *Ceriops* y *Kandelia*). Otras familias importantes son las combretáceas, a la que pertenece el mangle blanco *Laguncularia* y las soneratiáceas. Tomlinson (1986) describe de una forma exquisita las plantas de estas formaciones. También habita una especie de palma (*Nypa*), cuyo polen y frutos han fosilizado tan bien en los manglares que han proporcionado una información excepcional sobre la evolución de las palmas y el cambio climático.

En los manglares las diferentes especies no aparecen al azar, sino que crecen siguiendo una distribución natural en función de la distancia al mar. Esta zonación está regulada principalmente por dos factores ambientales: la salinidad y la cantidad de agua en el sedimento. Las especies que están mejor adaptadas a crecer próximas al mar son generalmente los mangles rojos. A mayor distancia del mar habitan representantes de las otras familias típicas de estos bosques. En el Caribe, el mangle negro aparece en lugares pantanosos parcialmente sumergidos; y el mangle blanco prefiere lugares más elevados sobre el nivel del mar, donde el sedimento está menos anegado. Detrás de estos verdaderos mangles crecen otras especies acompañantes, generalmente árboles y arbustos que no soportan las condiciones excesivamente severas a las que están sometidos los mangles.

En general, las raíces de los árboles necesitan oxígeno para funcionar correctamente, por lo que este es el primer problema que han de resolver los mangles, que como ya dijimos crecen en suelos pobres en oxígeno.



La principal adaptación de los mangles a su hábitat es el sistema de raíces tan espectacular que desarrollan las diferentes especies, como vemos en estas fotografías en un manglar en el sur de Costa Rica. Obsérvese el entramado que constituyen las raíces zancudas del 'mangle rojo' *Rhizophora mangle*.



En los manglares occidentales, como en este manglar de Costa Rica, es muy frecuente observar entre las raíces zancudas del 'mangle rojo', las raíces o neumatóforos del 'mangle negro' *Avicennia*, que crecen verticalmente hacia arriba sobresaliendo del suelo.

Para ello, estos árboles han desarrollado adaptaciones morfológicas que permiten a sus raíces tomar el oxígeno necesario. Las principales adaptaciones están relacionadas con la forma y estructura de las raíces, que sobresalen del sedimento permitiendo la aireación a través de unos pequeños poros, conocidos como lenticelas. El mangle rojo, por ejemplo, forma raíces aéreas o zancudas que se originan en la base del tronco, a unos dos metros por encima del nivel del suelo, y que después penetran en el sedimento para dar soporte al árbol. El mangle blanco desarrolla raíces que van sobresaliendo de la superficie del suelo durante su crecimiento, dando lugar a estructuras en forma de arcos alrededor del tronco. El mangle negro forma un tipo de raíces muy peculiares, denominadas neumatóforos, que crecen verticalmente hacia arriba emergiendo del suelo cada quince o treinta centímetros a partir de raíces horizontales subterráneas. Precisamente, lo primero que te sorprende cuando llegas a un manglar, es este intrincado sistema de raíces que te encuentras sobresaliendo del suelo, en la base de los árboles, que sólo te permite caminar unos pocos metros tierra adentro.

La presencia de sal en el sedimento constituye el segundo gran problema para los mangles, ya que la sal desorganiza los mecanismos celulares y puede llegar a ser fatal para muchas especies. En este caso, los mangles han desarrollado diferentes adaptaciones fisiológicas para poder crecer en estos ambientes con elevada salinidad (Hogarth, 1999). Algunas especies impiden la absorción de sal por las raíces, otras toleran altas concentraciones de sal en los tejidos, otras excretan el exceso de sal a través de la corteza o se desprenden de las hojas donde se acumula la sal. El agua salada en el suelo dificulta además la absorción de agua por las raíces, ya que reduce la diferencia osmótica entre la raíz y el sedimento. El mangle rojo sólo absorbe agua en la capa más superficial del suelo donde se encuentra el agua dulce, menos densa que el agua de mar. El mangle negro se estima que impide la absorción de 90-95% de la sal en la superficie de sus raíces. En definitiva, los mangles absorben el agua con mucha dificultad, por lo que necesitan destinar gran parte de su energía para desarrollar un sistema de raíces mucho mayor que en otros árboles, en detrimento del crecimiento de la parte aérea del árbol o de la reproducción. La dificultad de absorber agua provoca otras importantes consecuencias. En general, todas las plantas tienden a regular la temperatura por transpiración, permitiendo la evaporación de agua a través de las hojas. Los mangles no pueden seguir esta estrategia, ya que el agua es para ellos un recurso limitado. El mangle rojo lo que hace es reducir considerablemente la evaporación orientando sus hojas hacia el sol con diferentes ángulos, según la posición de la hoja en el árbol. Las hojas más externas se colocan casi paralelas a la dirección de los rayos, evitando el recalentamiento, mientras que las situadas en el interior de la copa se orientan perpendiculares al sol para alcanzar la máxima tasa de fotosíntesis.

En relación a la reproducción, los mangles también se enfrentan a un tercer problema. Como cualquier planta con semillas, los mangles forman flores que requieren la polinización. La morfología de las flores y los métodos de polinización son muy variados. Así, por ejemplo, el mangle rojo forma flores muy pequeñas polinizadas por el viento, mientras que otras especies presentan grandes flores polinizadas por animales, como murciélagos, aves y mariposas. El problema, sin embargo, tiene que ver principalmente con la dispersión de las semillas, que deberían tolerar la inmersión en el agua de mar y la elevada salinidad en el sedimento. La mayoría de los mangles han conseguido adaptarse desarrollando algún grado de viviparismo, es decir, que la germinación de las semillas y el posterior crecimiento de los embriones se producen sobre el árbol, antes de desprenderse en forma de plántula o propágulo desarrollado. Los mangles invierten mucha energía en la producción de los propágulos. El ejemplo más evolucionado de viviparismo lo presenta el mangle rojo, cuyas plántulas al desprenderse caen directamente al agua de mar flotando horizontalmente. Los propágulos mantienen su flotabilidad bastante tiempo, siendo viables durante más de un año. Cuando las plántulas logran enraizar en el sedimento se orientan verticalmente y continúan creciendo.

Los manglares constituyen un hábitat biológicamente diverso y ecológicamente complejo. En estos bosques vive una mezcla única de animales terrestres y marinos (insectos, aves, reptiles, anfibios, peces, cangrejos), que han desarrollado de forma excepcional una alta tolerancia a la salinidad del agua y cuyas actividades contribuyen a la gran productividad de estos ecosistemas. Al caminar entre las raíces de los mangles, la presencia de numerosos cangrejos violinistas llama mucho la atención. Algunas especies, como los conocidos peces saltarines del lodo, muestran adaptaciones increíbles para poder vivir en este hábitat fronterizo entre la tierra y el mar. También, son particularmente abundantes las plantas terrestres epífitas en los mangles, sobre todo especies trepadoras, así como las algas e invertebrados marinos que crecen fijados a las raíces sumergidas de los mangles, formando comunidades únicas (Farnsworth & Ellison, 1996). Desde el punto de vista ecológico, en los manglares existe una elevada productividad y constituyen un lugar de refugio y puesta para especies de peces, moluscos y crustáceos importantes en las pesquerías locales y en los arrecifes de coral situados en sus proximidades. Son hábitat temporal de numerosas aves migratorias y santuarios para algunas especies en peligro de extinción, como el ibis escarlata, el manatí, el caimán de costa y varias tortugas marinas. Estos bosques mantienen el equilibrio en la interfase tierra-mar en estas regiones cálidas, sirviendo de entrada de nutrientes y de flujo de energía con los ecosistemas marinos próximos.



En la mayoría de los mangles, las semillas germinan y los embriones se desarrollan sobre el árbol originando plántulas o propágulos, antes de desprenderse. Esto se conoce como viviparismo. En el 'mangle rojo', los embriones se desarrollan formando plántulas alargadas y péndulas, como se observan en esta fotografía.



Cuando las plántulas ya desarrolladas del 'mangle rojo' se desprenden, inicialmente flotan, después enraízan (izquierda) y continúan creciendo hasta originar un nuevo mangle. Entre las raíces y hojarasca de los mangles, es muy habitual la presencia de numerosos 'cangrejos violinistas'. El cangrejo macho (derecha) se caracteriza por presentar una pinza delantera de gran tamaño. Cada individuo excava un túnel en el fango, donde permanece durante la pleamar.

Los manglares protegen el litoral contra la erosión actuando de barreras naturales, tanto frente al oleaje y las mareas como frente a la erosión producida por el viento. Estas barreras ofrecen una protección muy efectiva frente a huracanes y maremotos, y por ejemplo resultaron cruciales reduciendo los daños causados por el tsunami en 2004 en las costas del Océano Índico. En algunas zonas costeras de Vietnam, Tailandia, India y Filipinas, se han realizado plantaciones de mangles con estos fines. Estos bosques purifican las aguas que son transportadas por los ríos y afluentes hacia el mar, inmovilizan grandes cantidades de sedimentos ricos en materia orgánica que llegan por escorrentía desde tierra, y actúan de filtro de sustancias contaminantes. Junto con las demás formaciones boscosas, constituyen los pulmones del planeta, fijando CO_2 y liberando oxígeno durante la fotosíntesis que realizan. Y, además, son importantes como responsables de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica mediante la oxidación o reducción del óxido nitroso, uno de los denominados gases de efecto invernadero.

Los manglares desempeñan, también, un papel esencial desde el punto de vista económico y socio-cultural. Estos ecosistemas son fuente de recursos para muchas poblaciones campesinas, especialmente en aquellas

regiones donde las tierras adyacentes a los manglares son áridas. Muchos manglares han sido explotados durante siglos para obtener carbón vegetal, leña, madera para la construcción, sal y taninos. La pesca, tanto industrial como artesanal, ha constituido siempre un recurso imprescindible para los habitantes de estas zonas, junto con la explotación de algunas especies de invertebrados marinos que crecen entre las raíces de los mangles, como la ostra, el cangrejo, el langostino y el camarón del mangle. Más recientemente, se han convertido en lugares muy apreciados y explotados para el turismo.

Arrecifes de coral

Los arrecifes de coral constituyen otro ejemplo de los biomas más diversos y productivos y, para científicos como yo dedicados a estudiar los organismos marinos, son sin duda los ecosistemas más idílicos del planeta. Los arrecifes de coral se desarrollan en fondos someros muy iluminados. En muchos lugares, debido a la protección que los arrecifes ofrecen frente al oleaje, ayudan a la conservación de los manglares y praderas de fanerógamas marinas en océanos que, sin la existencia de los arrecifes, serían profundos y pobres en nutrientes. A pesar de la gran extensión que ocupan, los arrecifes están incluidos entre los hábitats marinos más sensibles a las alteraciones ambientales; de hecho, se trata del ecosistema marino más amenazado por la degradación provocada por el hombre, sobre todo por la sobrepesca, la contaminación y el actual cambio climático.

Los arrecifes de coral son estructuras biogénicas, es decir, están contruidos por organismos vivos. Los corales y las algas calcáreas tienen la capacidad de fijar el calcio disuelto en el agua, depositando carbonato cálcico y originando a través de los años enormes estructuras calizas que llegan a ocupar miles de kilómetros de costa y cientos de metros de profundidad. La extensión mundial de los arrecifes de coral es de unos 290.000 km², lo que significa tan sólo un 3% del área total de la plataforma continental tropical; no obstante, son hábitats con una extraordinaria biodiversidad. El arrecife de mayor longitud es la Gran Barrera de Arrecifes localizada en Queensland (Australia), una de las construcciones naturales más grandes del mundo con más de 2.000 km y una superficie de 48.000 km² (Kaiser *et al.* 2005). A pesar de que los pequeños pólipos que forman los corales tienen apenas unos milímetros de diámetro y sólo son visibles bajo un microscopio, las formaciones de arrecifes coralinos se observan claramente desde el espacio. Probablemente, los arrecifes de coral sean los responsables de que algunos de nosotros hayamos iniciado nuestros estudios en biología marina. Tal es la variedad de organismos, con multitud de formas y colores, que conviven en estos hábitats de aguas cristalinas, que bucear en un arrecife de coral es una experiencia inolvidable.

La mayoría de los arrecifes presentan una distribución geográfica entre los 30°N y 30°S, coincidiendo en gran medida con la distribución de los manglares. Su extensión latitudinal se corresponde con un rango de temperatura entre 18 y 36°C, aunque el desarrollo óptimo del arrecife tiene lugar a 26-28°C. La temperatura del agua de mar ayuda a explicar la ausencia de arrecifes en la mayor parte de las costas tropicales de América y África occidental, donde la existencia de afloramientos de aguas frías impide el crecimiento de los corales. En lugares donde las temperaturas varían mucho en espacio y tiempo, los arrecifes muestran un crecimiento intermitente, como ocurre por ejemplo en las islas Galápagos, lugar de encuentro de diversas corrientes oceánicas con distintas temperaturas. La mayor riqueza de especies se encuentra en el Indo-Pacífico, especialmente en el Sudeste de Asia, siendo mucho menor en el Atlántico.

Los arrecifes de coral son de varios tipos, según el sustrato disponible, los cambios en el nivel del mar, el grado de iluminación y la hidrodinámica marina. En la mayoría de las islas tropicales, la línea de costa se caracteriza por presentar plataformas rocosas a modo de repisas, en las que se desarrollan los denominados ‘arrecifes de borde’. En estos arrecifes, los corales crecen hacia la superficie y originan una plataforma muy próxima al nivel del mar, que después de miles de años incluso sobresale durante las bajamares. En ese momento, el crecimiento en altura no continúa, ya que los corales no toleran la desecación ni la acción intensa del oleaje. Sin embargo, el arrecife continúa creciendo horizontalmente mientras las condiciones ambientales lo permiten. Los ‘arrecifes en parches’ tienen poca extensión, crecen en lagunas costeras y con frecuencia están rodeados por arena. Pueden crecer en vertical justo hasta el nivel del agua en marea baja, pero generalmente son más profundos. Los ‘arrecifes de barrera’ rodean muchas islas tropicales, están separados de la costa por lagunas, y son visibles desde tierra como una línea donde rompe el oleaje. Estos arrecifes se desarrollan rápidamente, ya que la exposición de los corales a las corrientes dominantes favorece su crecimiento. Por último, los ‘atolones’ son el clásico ejemplo de un arrecife de coral, constituyendo anillos de diez o más kilómetros de diámetro, que rodean a una laguna central formada por hundimiento de una isla volcánica.

Los corales son animales muy sencillos, que pertenecen a los cnidarios antozoos. Existen diferentes tipos de corales, principalmente incluidos en dos grandes grupos. Los corales hermatípicos, mejor conocidos como corales duros o pétreos (Scleractinia), son los constructores o formadores del arrecife y sólo crecen en los trópicos. Los corales ahermatípicos, blandos o córneos, presentan una amplia distribución mundial. En los arrecifes del Indo-Pacífico se han identificado unas 700 especies de corales, mientras que en el Atlántico se conocen unas 145 especies; en el Caribe, se han descrito 60 especies de corales pétreos (Spalding *et al.*, 2001). Algunas

de las especies de coral más conocidas son el ‘coral cerebro’ *Symphyllia*, el ‘coral rojo’ *Corallium rubrum*, el ‘coral negro’ *Antipathes*, el ‘coral hongo’ *Fungia*, el ‘coral de fuego’ *Millepora*, el ‘coral córneo’ *Acropora* y los ‘corales blandos’ *Plexaura*, *Eunicea* y *Pseudopterogorgia*.

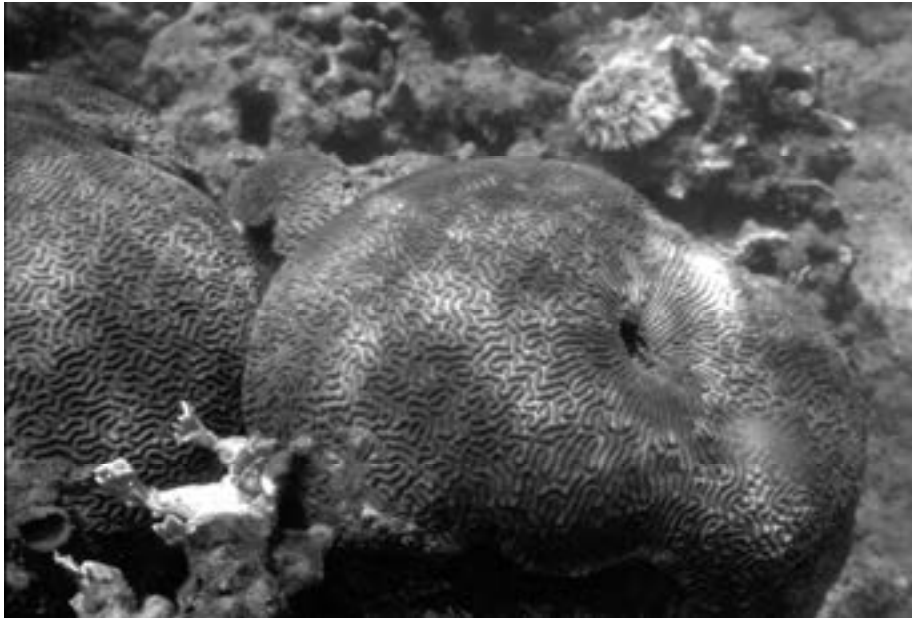


Los arrecifes de coral están contruidos principalmente por corales, como el ‘coral de fuego de cuchillas’ *Millepora complanata* (arriba), y por algas calcáreas (abajo). Estos dos grupos de organismos fijan calcio disuelto en el agua de mar, depositan carbonato cálcico y originan así enormes estructuras calizas, que ocupan miles de kilómetros de costas en regiones tropicales.

Los pólipos de los corales hermatípicos generalmente contienen unas microalgas, denominadas zooxantelas, que realizan la fotosíntesis y proporcionan energía a los pólipos. La relación entre ellos es una simbiosis, ya que los pólipos ofrecen a las zooxantelas protección y nutrientes, mientras que las zooxantelas fijan carbono y producen energía para los pólipos de los corales. Esta simbiosis puede romperse y, por último, provocar la muerte de los corales bajo condiciones de estrés, como valores de temperatura, luz ultravioleta y niveles de nutrientes muy elevados. Las zooxantelas son dinoflagelados, la mayoría pertenecientes al género *Symbiodinium*. Pueden vivir independientemente del coral, en forma de célula flagelada de vida libre; sin embargo, en los pólipos pierden sus flagelos y su movilidad. De acuerdo con Muller-Parker & D'Elia (1997), las zooxantelas se pueden transmitir durante la reproducción del coral, pero los corales también pueden obtenerlas directamente del agua de mar. Las aguas tropicales son pobres en nutrientes, por lo que los pólipos del coral obtienen los nutrientes necesarios capturando zooplancton, y a partir de los productos de la fotosíntesis de las zooxantelas. Las zooxantelas son autótrofas, es decir necesitan nutrientes, luz y dióxido de carbono para fijar carbono. Los nutrientes los obtienen reciclando productos de desecho del coral, directamente del zooplancton capturado por los pólipos o del agua de mar. Durante la fotosíntesis, a partir del dióxido de carbono producen materia orgánica. Cuando la tasa de fotosíntesis es alta, la toma rápida de CO₂ estimula la precipitación de carbonato cálcico en la base de los pólipos.

El éxito en la reproducción y reclutamiento de los corales es esencial para el desarrollo de los arrecifes. La reproducción asegura la formación de nuevos individuos y el reclutamiento es el proceso por el cual los corales jóvenes se unen a la comunidad. Los corales se reproducen asexual y sexualmente. Muchas colonias de corales se multiplican por gemación, es decir, formando yemas. Los pólipos también pueden desprenderse de algunas colonias y dar lugar a otras nuevas. Los corales ramificados, por ejemplo, pueden fragmentarse y originar nuevas colonias. No obstante, la dispersión a larga distancia se logra mediante la reproducción sexual. Muchas especies son hermafroditas. Las células sexuales, huevos y esperma, son expulsadas al mar, siguiendo ritmos relacionados con ciclos lunares. La fecundación es externa, muchas veces sincrónica, y las puestas son tan numerosas que llegan a teñir las aguas. Cuando esto ocurre es todo un espectáculo, como el lector ha podido observar alguna vez en algunos documentales. Aunque muchos huevos son devorados por los peces, se producen tantos que la mayoría sobrevive. Los huevos fecundados se desarrollan en una larva con cilios, denominada plánula, que puede impulsarse y alcanzar grandes distancias antes de fijarse. Estas larvas generalmente adquieren las zooxantelas después de fijarse y sufrir la metamorfosis, durante la cual secretan en su base una placa calcificada y

desarrollan la forma del pólipo. Los pólipos mueren después de un cierto tiempo, pero las estructuras calcáreas se mantienen y son colonizadas por nuevos pólipos, generación tras generación. Kaiser *et al.* (2005) dedican un capítulo a los arrecifes de coral, donde describen de una forma muy amena todos estos acontecimientos.



Los corales duros o pétreos forman estructuras muy firmes y con aspecto de roca, son los verdaderos constructores del arrecife. En esta imagen, el 'coral cerebro' *Diploria strigosa* muy abundante en arrecifes poco profundos del Caribe.



Los corales córneos tienen esqueletos elásticos, a veces formando abanicos dispuestos transversales a la corriente principal. En la fotografía, un espécimen de *Gorgonia ventalina* en un arrecife en República Dominicana.



Los corales blandos forman localmente grandes poblaciones, entremezclados con corales pétreos, con los que compiten por el espacio. Estos corales, con formas y dimensiones tan espectaculares, contribuyen a la configuración y a la gran biodiversidad de los arrecifes.

Los arrecifes de coral constituyen un hábitat biológicamente muy diverso y ecológicamente muy complejo. Son auténticos laboratorios naturales, extraordinarios para estudiar la ecología, el comportamiento y la dinámica de las poblaciones marinas. Aunque ocupan menos del 1% de la superficie total de los océanos, casi la mitad de todas las especies de peces marinos conocidos se encuentra en estas aguas tropicales poco profundas. En general, podemos decir que la diversidad de especies en los arrecifes es comparable con la de los bosques lluviosos tropicales. Además de las numerosas especies de corales, en estos ecosistemas habitan muchas especies de algas, gasterópodos, bivalvos, equinodermos y peces (Spalding *et al.*, 2001). La mayoría de los corales necesitan la presencia de algas rojas coralinales para que la metamorfosis de sus larvas y el establecimiento de los pólipos tengan éxito. Estas algas, por su parte, necesitan que los peces e invertebrados ramoneen y mantengan limpia su superficie, lo que contribuye a que su tasa de fotosíntesis sea óptima. Además de estas algas

rojas, otro grupo de algas verdes calcificadas, al que pertenece el género *Halimeda*, son también dominantes y contribuyen a la cementación de los arrecifes y a la producción de la arena orgánica que se encuentra en las lagunas internas al arrecife. Muchas áreas de arrecifes que no han sido colonizadas por los corales son ocupadas por poblaciones de algas filamentosas o frondosas, que son directamente consumidas por los herbívoros. La presión de los herbívoros y el nivel de nutrientes son los responsables de que en estos hábitats dominen los corales o las algas. De acuerdo con Littler & Littler (1985), cuando la cantidad de nutrientes es baja y la actividad de los herbívoros es alta, dominan los corales; por el contrario, cuando los niveles de nutrientes son elevados y la actividad de los herbívoros es reducida dominan las algas frondosas.

Desde el punto de vista ecológico, los arrecifes de coral son ecosistemas muy productivos. Los corales son responsables de una elevada fijación de carbono, aunque menos de la mitad del carbono fijado queda finalmente disponible para los consumidores. La mayor parte del carbono es utilizado, reciclado o acumulado dentro de la propia colonia. De hecho, son muy pocos los animales del arrecife que consumen directamente los pólipos de coral, entre ellos el ‘gasterópodo’ *Drupella*, la ‘estrella corona de espinas’ *Acanthaster*, y algunos ‘peces loro’ o ‘peces mariposa’. Por el contrario, las algas de los arrecifes son muy productivas, y el carbono que fijan juega un papel mucho más importante en el mantenimiento de las cadenas tróficas, ya que ellas sí que son directamente consumidas por muchos herbívoros. Las tasas de producción primaria bruta de las algas de los arrecifes oscilan entre 1 y 14 gramos de carbono por m² y día, de los cuales un 20 a 90% queda disponible después de la respiración (Kaiser *et al.*, 2005).

Los arrecifes de coral son los hábitats marinos en los que podemos encontrar una mayor diversidad de asociaciones biológicas entre sus habitantes. Ya he comentado anteriormente la relación de simbiosis entre los corales hermatípicos y las zooxantelas, imprescindibles en la construcción de los arrecifes. Pero existen muchísimas más. Por ejemplo, algunos crustáceos viven asociados con peces; algunos peces viven entre los tentáculos de las anémonas; existen cangrejos que habitan en corales cerebro; algunas gambas viven dentro de las conchas de cangrejos ermitaños; pequeños peces limpian la superficie de peces de mayor tamaño eliminando sus parásitos, etc. Todas estas asociaciones contribuyen significativamente a la elevada complejidad de estos ecosistemas.

Los arrecifes juegan un papel muy importante como barreras naturales muy efectivas frente al oleaje en las zonas costeras de las regiones tropicales. Sobre todo frenan y rompen las grandes olas antes de llegar a la línea de costa, disminuyendo así su efecto mecánico. De esta forma, no sólo protegen a la población en estas costas tan vulnerables durante las épocas de tormentas, sino que también protegen a los otros ecosistemas marinos

singulares en estas regiones, los manglares y las praderas de fanerógamas marinas tropicales, formados más próximos a la costa.

Desde el punto de vista económico y socio-cultural, los arrecifes coralinos también son lugares de gran importancia. Para millones de personas, con frecuencia de los países más pobres del planeta, los arrecifes constituyen la fuente principal de alimentos. En muchas costas tropicales, el consumo de pescado es el aporte esencial de proteínas en la dieta de la población. Los arrecifes además son muy valiosos porque generalmente constituyen una gran fuente de ingresos. Estos lugares siempre han atraído turismo, especialmente buceadores fascinados por la riqueza de los fondos marinos, lo que se traduce en beneficios económicos para algunos sectores de estos países tropicales.

Efectos del cambio climático sobre estos biomas tropicales

Los manglares y los arrecifes de coral, junto con las praderas de fanerógamas marinas, han sido reconocidos por el PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) como los hábitats marinos más valiosos y con mayor biodiversidad del mundo. Como les he mostrado previamente, son biomas excepcionales y únicos desde el punto de vista biológico, ecológico, económico y socio-cultural. Por ello, su deterioro y su pérdida tienen consecuencias irreparables, no sólo para la gran variedad de organismos que viven en ellos sino también para los habitantes de estas regiones tropicales, habiéndose estimado por ejemplo que por cada mangle destruido se pierden anualmente más de setecientos kilos de especies marinas con importancia comercial.

Aunque estos ecosistemas han sido tradicionalmente explotados por la población local, no todos los aprovechamientos de los recursos naturales se realizan actualmente respetando un equilibrio con el medioambiente. Desde mediados del siglo XX, el crecimiento de la población, la expansión urbana, el consumismo y la utilización de nuevas tecnologías para la extracción de los recursos han causado directa o indirectamente daños en los manglares y los arrecifes de coral en muchas regiones del mundo.

En relación con los manglares, las extracciones abusivas para empresas madereras o papeleras, la construcción de infraestructuras y la cría intensiva del camarón para la exportación han representado los peligros más graves hasta el momento. En la actualidad, se han talado más de un millón de hectáreas de bosques de mangles para instalar piscinas para la cría del camarón, causando una gran deforestación. Para estos cultivos se emplean grandes cantidades de productos químicos (alimento, fertilizantes, plaguicidas, antibióticos) que contaminan los recursos hídricos locales y provocan la degradación del hábitat y de los ecosistemas marinos próximos.

La asociación ecologista Greenpeace estimó que, en 1980, había unos 17 millones de hectáreas de manglares a nivel mundial. Según datos de la FAO, actualmente más de un 50% de estos manglares ya han desaparecido. Las alteraciones del hábitat como consecuencia del actual cambio climático están potenciando aún más esta pérdida. Por una parte, las lluvias torrenciales son cada vez más frecuentes e intensas en estas regiones tropicales, lo que provoca que los manglares se vean muy afectados por un brusco descenso de la salinidad, una excesiva sedimentación, así como un aumento de sustancias contaminantes que llegan hasta las costas arrastradas desde tierra. Por otra parte, el ascenso del nivel del mar, como consecuencia del aumento de la temperatura en el planeta, está causando la inundación progresiva de estos ecosistemas cuyos organismos, adaptados durante mucho tiempo a tolerar las oscilaciones de mareas, no soportan una inmersión continua en el agua marina. Además, las tormentas y el aumento del nivel del mar determinan una mayor erosión de las costas, ya que se pierden estas barreras naturales.

Con respecto a los arrecifes de coral, las prácticas de pesca destructivas, la sobrepesca, la contaminación y el fondeo de embarcaciones han sido las principales amenazas para estos biomas excepcionales. El impacto de estas actividades humanas ha causado debilidad en los corales, lo que ha favorecido la aparición de enfermedades por patógenos o parásitos agravando la situación (Richardson, 1998). Incluso, algunos arrecifes se han visto seriamente amenazados y dañados por algunos predadores del coral, como la estrella de mar ‘corona de espinas’, cuya elevada abundancia y proliferación ha estado relacionada con la sobrepesca de sus predadores naturales. Como comenté para los manglares, las alteraciones del hábitat relacionadas con el actual cambio climático están potenciando la pérdida de los arrecifes a nivel mundial. La luz es vital para el desarrollo de los corales. Por ello, cuando la sedimentación es elevada y las aguas se vuelven turbias, las zooxantelas no pueden fotosintetizar y los corales mueren. Algunos corales pueden eliminar cierta cantidad de sedimentos de su superficie pero, en general, los sedimentos ahogan a los corales y causan abrasión, sombreado e impiden su reproducción. Actualmente, la excesiva sedimentación en estos hábitats se debe a determinadas prácticas agrícolas, obras de dragados y desarrollo costero, pero también al gran arrastre de sedimentos desde tierra, como consecuencia de las tormentas provocadas por el cambio climático, que no pueden ser frenados ni filtrados por los manglares próximos. Generalmente, los corales no resisten oleajes intensos, y el efecto mecánico de las olas provoca roturas y desprendimientos. Debido a que las tormentas tropicales, ciclones y huracanes se están produciendo con mayor intensidad y frecuencia, los corales de crecimiento lento no tienen tiempo para recuperarse. Los corales, además, son muy sensibles a cambios de temperatura. Una de las consecuencias más

evidentes del incremento de la temperatura en el agua del mar es el denominado blanqueamiento de los corales. Un aumento de temperatura de 1-2°C provoca la expulsión de las zooxantelas de los pólipos, quedando visible el esqueleto blanco de los corales. El blanqueamiento lleva a una disminución del crecimiento, de la reproducción y, si se prolonga en el tiempo, a la muerte del coral. Estos corales sin zooxantelas son colonizados por algas verdes filamentosas que transforman el arrecife. Los peces e invertebrados característicos del arrecife desaparecen, y los herbívoros se vuelven dominantes. Si la temperatura, la acidificación del agua y el nivel del mar continuaran subiendo al ritmo actual, se produciría la muerte generalizada de los arrecifes de coral (Miller, 2007). Sólo el ascenso del nivel del mar, a una velocidad más rápida que la tasa de crecimiento del coral, provocaría su desaparición al quedar a demasiada profundidad e impedir la fotosíntesis de las zooxantelas, como ocurrió hace 8.000 años al final de la última glaciación (Veron, 2000).

Quiero terminar mi exposición utilizando parte de la información recogida en la Exposición sobre El Cambio Climático (CLARITY), en la que participa el Organismo Autónomo Parques Nacionales (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2008), con el propósito de que el lector reflexione sobre este problema global que entre todos podemos contribuir a frenar:

“El cambio climático está ya en marcha, pero aún no es demasiado tarde para actuar. Todos podemos contribuir a construir soluciones para este grave problema global. Los cambios en nuestros hábitos cotidianos son importantes, pero también hay que resaltar la responsabilidad de gobiernos locales, regionales o nacionales para hacer posible la protección del clima... Impuestos a las energías más contaminantes, incentivos a las energías limpias, normas que limiten las emisiones asociadas a diferentes productos o servicios... Los gobiernos cuentan con diferentes herramientas para ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y para iniciar el camino hacia un futuro libre de combustibles fósiles”.

Referencias

- AMSLER, C.D., R.J. ROWLEY, D.R. LAUR, L.B. QUETIN & R.M. ROSS (1995). Vertical distribution of Antarctic peninsular macroalgae: cover, biomass and species composition. *Phycologia* 34: 424-430.
- APPENZELLER, T. (2007). El gran deshielo. *National Geographic España* 21: 26-41.
- BALLESTEROS, E. (1993). Algunas observaciones sobre las comunidades de algas profundas de Lanzarote y Fuerteventura (Islas Canarias). *Vieraea* 22: 17-27.

- BROWN, A.C. & A. MCLACHLAN (2002). Sandy shores ecosystems and the threats facing them: some predictions for the year 2025. *Environmental Conservation* 29: 62-77.
- FARNSWORTH, E.J. & A.M. ELLISON (1996). Scale-dependent spatial and temporal variability in biogeography of mangrove root epibiont communities. *Ecological Monographs* 66: 45-66.
- GIL-RODRÍGUEZ, M.C., J. AFONSO-CARRILLO & R. HAROUN (1992). Flora ficológica de las islas Canarias. In: Kunkel, G. (coord.), *Flora y vegetación del Archipiélago Canario. Tratado florístico. 1ª parte*. pp. 95-121. Edirca S.L. Las Palmas de Gran Canaria.
- GIL-RODRÍGUEZ, M.C., M. DEL ARCO, W. WILDPRET DE LA TORRE, C.L. HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ & R.J. HAROUN (2007). Biological information and comments on *Halophila decipiens* meadows of the Canary Islands (Hydrocharitaceae, Magnoliophyta). *Vieraea* 35: 77-85.
- HOGARTH, P.J. (1999). *The Biology of Mangroves*. Oxford University Press, Oxford.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability – Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- KAISER, M.J., M.J. ATTRILL, S. JENNINGS, D.N. THOMAS, D.K.A. BARNES, A.S. BRIERLEY, N.V.C. POLUNIN, D.G. RAFFAELLI & P.J.B. WILLIAMS (2005). *Marine Ecology: Processes, Systems, and Impacts*. Oxford University Press, Oxford.
- KENNISH, M. (2002). Environmental threats and environmental future of estuaries. *Environmental Conservation* 29: 78-107.
- LARKUM, A.W.D., A.J. MCCOMB & S.A. SHEPHERD (1989). *Biology of Seagrasses. A treatise on the biology of seagrasses with special reference to the Australian region*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands.
- LITTLER, D.S. & M.M. LITTLER (2000). *Caribbean Reef Plants. An identification guide to the reef plants of the Caribbean, Bahamas, Florida and Gulf of Mexico*. OffShore Graphics, Inc., Washington, USA.
- LITTLER, M.M. & D.S. LITTLER (1985). Models of tropical reef biogenesis: the contribution of algae. *Progr. Phycol. Res.* 3: 323-364.
- LÜNING, K. (1990). *Seaweeds. Their environment, biogeography and ecophysiology*. J. Wiley & Sons, Inc., New York.
- LUQUE, A.A. & J. TEMPLADO (Coords.) (2004). *Praderas y bosques marinos de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla.
- MILLER, D. (Ed.) (2007). Cambio climático. *National Geographic España (Supl.)* 21.

- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, MEDIO RURAL Y MARINO (2008). Exposición El Cambio Climático (CLARITY). <http://www.mma.es>.
- MULLER-PARKER, G. & C.F. D'ELIA. (1997). Interactions between corals and their symbiotic algae. *In*: Birkeland, C.F. (ed.), *Life and Death of Coral Reefs*. pp. 96-113. Chapman & Hall, New York.
- NICKLEN, P. (2007). Vida ártica amenazada. *National Geographic España* 21: 2-25.
- O'NEILL, T. (2007). La Tierra, un invernadero. *National Geographic España (Supl.)* 21.
- REYES, J., M. SANSÓN & J. AFONSO-CARRILLO (1995). Distribution and reproductive phenology of the seagrass *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson in the Canary Islands. *Aquat. Bot.* 50: 171-180.
- RICHARDSON, L.L. (1998). Coral diseases: what is really known? *Trends in Ecology and Evolution* 13: 438-443.
- SANSÓN, M., J. REYES & J. AFONSO-CARRILLO (2001). Flora Marina. *In*: Fernández-Palacios, J.M. & Martín Esquivel, J.L. (eds), *Naturaleza de las Islas Canarias. Ecología y Conservación*. pp. 193-198. Publicaciones Turquesa, Santa Cruz de Tenerife.
- SPALDING, M.D., C. RAVILIOUS & E.P. GREEN (2001). *World Atlas of Coral Reefs*. University of California Press, Berkeley.
- STENECK, R.S., M.H. GRAHAM, B.J. BOURQUE, D. CORBETT, J.M. ERLANDSON, J.A. ESTES & M.J. TEGNER (2002). Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Environmental Conservation* 29: 436-459.
- THOMPSON, R.C., T.P. CROWE & S.J. HAWKINS (2002). Rocky intertidal communities: past environmental changes, present status and predictions for the next 25 years. *Environmental Conservation* 29: 168-191.
- TOMLINSON, P.B. (1986). *The botany of mangroves*. Cambridge University Press, Cambridge.
- VAN DEN BERG, E. (2007). Gran Angular. Cambio climático en España. *National Geographic España* 21: 12 pp.
- VERON, J.E.N. (2000). *Corals of the World*. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Queensland, Australia.

4. La flora y la vegetación canaria ante el cambio climático actual

Marcelino del Arco Aguilar

Departamento de Biología Vegetal. Universidad de La Laguna.

En la actualidad, utilizando parámetros climáticos e índices bioclimáticos es posible analizar los posibles efectos que el cambio climático actual podría tener sobre la flora y vegetación canaria considerando una proyección futura para el periodo 2.070 – 2.100. Como consecuencia de la previsible elevación de las temperaturas y disminución estimada de las precipitaciones, los pisos bioclimáticos (cada uno de los tipos de medio, definidos por caracteres climáticos, que se suceden altitudinalmente) sufrirán desplazamientos. Así, los termotipos (definidos por los valores térmicos) tenderán hacia un ascenso y los ombrotipos (definidos por las precipitaciones) hacia la aridización. Estos cambios producirían un desplazamiento paralelo de los diferentes tipos de la vegetación potencial canaria asociada a los mismos, lo que supondrá una reducción generalizada de la superficie que ocupan excepto para los ambientes más áridos y para el pinar. Por otra parte, la tendencia de cambio que muestra el anticiclón de las Azores y otros datos climáticos indican que las áreas de nubes de las vertientes de barlovento podrían reducirse, con la consiguiente merma de la laurisilva. La respuesta de los principales tipos de vegetación potencial al cambio previsto será más lenta que la velocidad del cambio, lo que favorecería la expansión de comunidades arbustivas de sustitución más dinámicas. Estas consideraciones acerca de la flora y la vegetación pueden encontrarse también en Del Arco (2008) y ser ampliadas para otros aspectos ligados al cambio climático en Canarias en Méndez & Vázquez (2008).

La actual configuración de la Tierra, su particular biota y su distribución son producto de una evolución continua de millones de años, a lo largo de los cuales se han sucedido innumerables eventos climáticos, en ocasiones de tipo catastrófico. La intensidad y velocidad con la que han ocurrido los cambios han determinado la persistencia o extinción de estirpes, dependiendo de su adaptabilidad o de sus posibilidades de migración a lugares favorables para su desarrollo (Lovejoy & Hannah, 2005). En la escala geológica los cambios climáticos acaecidos durante las glaciaciones cuaternarias son relativamente cercanos. Los diversos periodos muy fríos que alternaron con otros más cálidos, causaron en ocasiones grandes extinciones o provocaron migraciones cuando fue posible. En alguno de los periodos glaciales se llegó a alcanzar una disminución de la temperatura global de 6-8 °C, aunque en las latitudes polares y boreales la disminución fue mayor. Por el contrario, en alguno de los periodos interglaciales, en el área mediterránea actual se alcanzaron temperaturas 4°C superiores a las actuales (Pons & Quezel, 1985). En general, las glaciaciones se dejaron sentir de diferente manera sobre el continente africano y sobre Canarias. En Canarias los periodos glaciales fueron periodos de abundante lluvia, mientras que los interglaciales fueron épocas cálidas y secas, a veces incluso áridas (Quezel, 1979). El actual modelado de las Islas Canarias es consecuencia de, por un lado, la actividad volcánica constructiva, y por otro, de la actividad erosiva destructiva, en la que los diferentes eventos climáticos acaecidos han tenido una influencia decisiva. Paralelamente a estos procesos, se ha producido la selección de la biota autóctona que albergan las islas.

Influencia del cambio climático sobre la flora y la vegetación

El cambio climático actual afecta a la biodiversidad vegetal tanto mediante impactos **directos** sobre las especies y comunidades vegetales, como por impactos **indirectos**, ya sea sobre el medio físico o por la modificación de las interacciones entre las especies.

Los **impactos directos** del cambio climático actual son consecuencia del calentamiento, que afecta al periodo de actividad vegetal y consecuentemente produce un incremento de la productividad. Pero también de la disminución de las lluvias, que reduce la disponibilidad de agua y limita el proceso anterior.

El aumento de las temperaturas conducirá al acoplamiento del ciclo de vida de las plantas a la nueva situación. Esto provocará cambios en el periodo de formación de las hojas (foliación), de las flores (floración), de los frutos (fructificación), etc., pero ha de tenerse en cuenta que la

plasticidad fenotípica de las especies es variable. Estos cambios afectarán también a las relaciones de competencia. En zonas de montaña las posibles heladas tardías, y el aumento de las temperaturas pueden revestir importancia. Así, temperaturas altas pueden inhibir fases del ciclo de las plantas de montaña inducidas por las bajas temperaturas.

La disminución de las disponibilidades de agua provoca el efecto contrario, esto es una disminución de la productividad potencial. Supondrá una exclusión de las especies menos tolerantes, por disminución de su tasa de reproducción y reclutamiento, y por el progresivo debilitamiento que las hará más susceptibles frente a predadores y plagas. Provocará también una reducción estructural de la vegetación, que afectará a la altura y al recubrimiento.

Si el cambio climático implica la aparición de eventos extremos como incidencias de tormentas violentas en territorios no sometidos regularmente a ellas, periodos secos en épocas no habituales u olas de calor, se acelerará la exclusión de especies no tolerantes a los mismos.

Los científicos señalan que el cambio climático actual es muy rápido en comparación con cambios climáticos anteriores. Esa rapidez puede impedir una respuesta de las plantas a través de posibles procesos microevolutivos. Estos procesos microevolutivos son particularmente importantes en plantas poco longevas (en general hierbas o arbustos) con una gran capacidad de radiación evolutiva. Sin embargo, para las especies longevas, supone la práctica imposibilidad de aclimatación de los individuos adultos. Los cambios previsibles harán que una parte importante de la flora vea superados sus límites de capacidad fenotípica, es decir, que no podrá acomodarse a las nuevas circunstancias.

Como consecuencia de los cambios en el clima, particularmente por la variación de la temperatura, los desplazamientos latitudinales y altitudinales de la vegetación serán la respuesta fundamental de los vegetales para acoplarse a la nueva situación y evitar las extinciones. La velocidad con la que tendrán lugar estos desplazamientos es relativa y dependerá de diversos factores que tienen que ver con la capacidad migratoria de las especies. Entre estos factores se deben destacar el grado de tolerancia al cambio, la longevidad, la producción y tipo de diáspora (esporas, semillas, frutos, etc.) y la competitividad frente a las especies que ocupan el nuevo territorio a colonizar. Verán favorecida su supervivencia las especies que muestren un mayor espectro altitudinal, geográfico y de hábitat, y, por supuesto, una mayor diversidad genética entre sus poblaciones. Los previsibles desplazamientos podrían ser imposibles para muchas especies que verían excedidas sus capacidades migratorias.

Como **impactos indirectos** sobre la vegetación se apuntan los cambios edáficos (relativos al suelo), los cambios en el régimen de los incendios y el previsible aumento del nivel del mar. Así, como consecuencia de una

mineralización más rápida, se prevé una reducción del contenido de carbono orgánico de los suelos. Esta rápida mineralización será resultado de la elevación de la temperatura y de una mayor incidencia de los incendios, que provocarán un aumento de la erosión, de la salinización y de los procesos de desertización. Todo ello irá acompañado de cambios en la composición florística, favoreciendo el desarrollo de plantas y comunidades tolerantes a estos cambios y adaptadas a las nuevas condiciones climáticas. La expansión térmica de los océanos y la fusión de los hielos provocará un ascenso del nivel del mar que afectará a la franja costera y a todos los procesos geomorfológicos y sistemas biológicos asociados.

Las **modificaciones de las interacciones** entre la especies (competencia, asincronías, herbivoría, plagas, invasiones) suponen una fuente potencial de impactos.

Las tendencias previsibles indican una simplificación estructural de la vegetación y un predominio de las extinciones locales frente a las recolonizaciones, llevadas a cabo por especies tolerantes y de distribución relativamente amplia (Fernández-González *et al.*, 2005).

Para prevenir o paliar los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad vegetal, diversas instituciones han desarrollado iniciativas en el marco de la Estrategia Global para la Conservación Vegetal, que fue aprobada en 2002 en la Convención sobre Diversidad Biológica de la ONU. A este respecto, para Canarias cabe citar tanto las aportaciones del denominado Grupo de Gran Canaria (Caujapé, 2006), como a nivel institucional por el Gobierno de Canarias, con la creación de la Agencia Canaria de Desarrollo Sostenible y de Lucha contra el Cambio Climático, que tiene rango de Dirección General (BOC 2007).

La herramienta de la Bioclimatología

La Bioclimatología es una ciencia ecológica que estudia la relación existente entre el clima y la distribución de los seres vivos y sus comunidades en la Tierra. En un principio, estas relaciones se comenzaron a estructurar tratando de correlacionar valores climáticos relativos a temperatura y precipitación con el área de distribución de las plantas y de las formaciones vegetales. Pero más recientemente se han podido establecer también otros tipos de correlaciones. Así, además del área de distribución de las **comunidades vegetales simples** (fitosociología clásica), se han establecido correlaciones con las **series de vegetación**, y con las **geoseries**. Como **series de vegetación** se conoce al conjunto de comunidades vegetales que están asociadas por procesos dinámicos o de sucesión en el seno de un territorio teselar, es decir, de un territorio homogéneo en sus características ecológicas y que por ello tiene un único tipo de vegetación potencial

(fitosociología dinámica) (por ejemplo, el herbazal de chirate, el barrillal, el cerrillal-panasal, el ahulagar-saladar y el tabaibal dulce, de los territorios áridos de Canarias, pertenecen a una misma serie de vegetación representada en su óptimo por el tabaibal dulce). Mientras que las **geoseries** (geosigmetum) expresan la concatenación de series de vegetación a lo largo de un gradiente ecológico o conjunto de gradientes asociados (fitosociología catenal) (por ejemplo, la concatenación en los barrancos de sauzal en sus zonas con agua o más húmedas y palmeral en la vega constituye una geoserie).

El conocimiento de la distribución de la vegetación y de las variaciones de la vegetación potencial o de sus etapas de sustitución permite reconocer los límites reales o potenciales de las unidades de vegetación. La cartografía de las series de vegetación y los mapas bioclimáticos constituyen herramientas básicas para determinar los valores climáticos umbrales que determinan los cambios en la vegetación. Así, se han ido estableciendo y ajustando los espacios correspondientes a las unidades bioclimáticas (bioclimas, ombrotipos y termotipos). Se constata que existe una ajustada y recíproca relación entre el clima, la vegetación y los territorios geográficos, es decir, entre los bioclimas, las series de vegetación y las unidades biogeográficas, lo cual es de gran relevancia en el seguimiento del cambio climático, a través de los posibles movimientos de la vegetación.

La Clasificación Bioclimática Mundial que seguimos (Rivas-Martínez, 1995, 1997, 2008), establece para el conjunto del globo cinco grandes macrobioclimas: tropical, mediterráneo, templado, boreal y polar. Estos macrobioclimas y sus unidades subordinadas o bioclimas, están representados por un conjunto de formaciones vegetales, biocenosis y comunidades vegetales propias. En los bioclimas, se reconocen un cierto número de variaciones en los ritmos estacionales de la precipitación (variantes bioclimáticas) y en los valores térmicos u ombrotérmicos (pisos bioclimáticos: termotipos y ombrotipos). De acuerdo con esta clasificación las Islas Canarias se incluyen en el macrobioclima mediterráneo, de carácter extratropical, cuya principal característica es la existencia de un período seco ($P < 2T$) de al menos dos meses de duración después del solsticio de verano. Este macrobioclima incluye siete bioclimas de los que sólo tres se reconocen en Canarias: el desértico-oceánico, el xérico-oceánico y el pluviestacional-oceánico.

En los últimos 15 años en Canarias se han desarrollado numerosos estudios bioclimáticos, siguiendo la pauta que ha ido marcando el desarrollo de la Clasificación Bioclimática Mundial (Del Arco *et al.*, 1996, 1999, 2002, 2006, 2008; Reyes-Betancort *et al.*, 2001; Rivas-Martínez *et al.*, 1993; Rodríguez-Delgado *et al.*, 2005). Paralelamente se ha llevado a cabo la cartografía de la vegetación de las islas (Del Arco *et al.*, 2006), en la que junto con la vegetación actual se han realizado mapas de vegetación

potencial. Estos estudios, han proporcionado un marco referencial preciso que permite correlacionar pisos bioclimáticos y unidades de vegetación, georreferenciados dentro de un contexto clasificatorio mundial. Toda esta información resulta fundamental para evaluar las variaciones que experimentará la vegetación derivadas del cambio climático en las islas.

Los pisos bioclimáticos

Uno de los objetivos de la Bioclimatología es el establecimiento de los pisos bioclimáticos de los territorios. Los pisos bioclimáticos son cada uno de los tipos o espacios termo-ombroclimáticos, esto es, los determinados por ciertos valores de temperatura y precipitación, que se suceden en una cliserie (catena) altitudinal o latitudinal y que muestran una correlación con los cambios vegetacionales que se van produciendo. Son espacios físicos, definidos por caracteres climáticos, en los que se albergan las comunidades vegetales. No deben confundirse con los pisos de vegetación, los cuales están definidos por la fisionomía concordante de diversas comunidades vegetales. Los pisos bioclimáticos de un territorio se delimitan en función de los factores termoclimáticos (termotipos; I_t , I_{tc} , T_p) y ombroclimáticos (ombrotipos; I_o).

Índices y parámetros para su caracterización: Para establecer los termotipos y ombrotipos bastan unos pocos índices:

Índice de termicidad compensado (I_{tc}). Índice térmico utilizado para determinar los termotipos, entidades territoriales caracterizadas por valores térmicos. $I_{tc} = I_t \pm C$.

Índice de termicidad (I_t) $= (T + M + m) \times 10$

[donde, **T** = temperatura media anual; **M** = media de las temperaturas máximas del mes más frío del año; **m** = media de las temperaturas mínimas del mes más frío del año; y **C** = valor de compensación. Cuando I_c (índice de continentalidad: diferencia entre la temperatura media del mes más frío y la del mes más cálido del año) es menor de 9 (oceánico) o mayor de 18 (continental), un valor de compensación (**C**) se sustrae o añade, según el caso, al valor de I_t para obtener I_{tc} . Este valor se usa en los territorios extratropicales de la Tierra (al norte de los 27°N y al sur de los 27°S) para compensar el exceso de frío invernal de los territorios muy continentales o el exceso de calor invernal de los territorios oceánicos, para que el I_{tc} resultante sea comparable en todos los territorios de la Tierra. En Canarias sólo necesitamos valores de compensación para $I_c < 9$. Este valor se obtiene a partir de la fórmula: $C = (9,0 - I_c) \times 10$].

Índice ombrotérmico (I_o). Coeficiente pluvio-termométrico que se utiliza para establecer los bioclimas y los ombrotipos y se define de acuerdo a la siguiente fórmula: **$I_o = (P_p/T_p) \times 10$** . Los ombrotipos constituyen entidades territoriales caracterizadas por valores ómbricos matizados en función de los valores térmicos del mismo.

Precipitación positiva (Pp). Precipitación media anual en mm de los meses en los que la temperatura media es superior a 0°C. Dado que en Canarias esto es así en todas las estaciones termométricas de las islas, Pp tiene el mismo valor que P (precipitación media anual en mm).

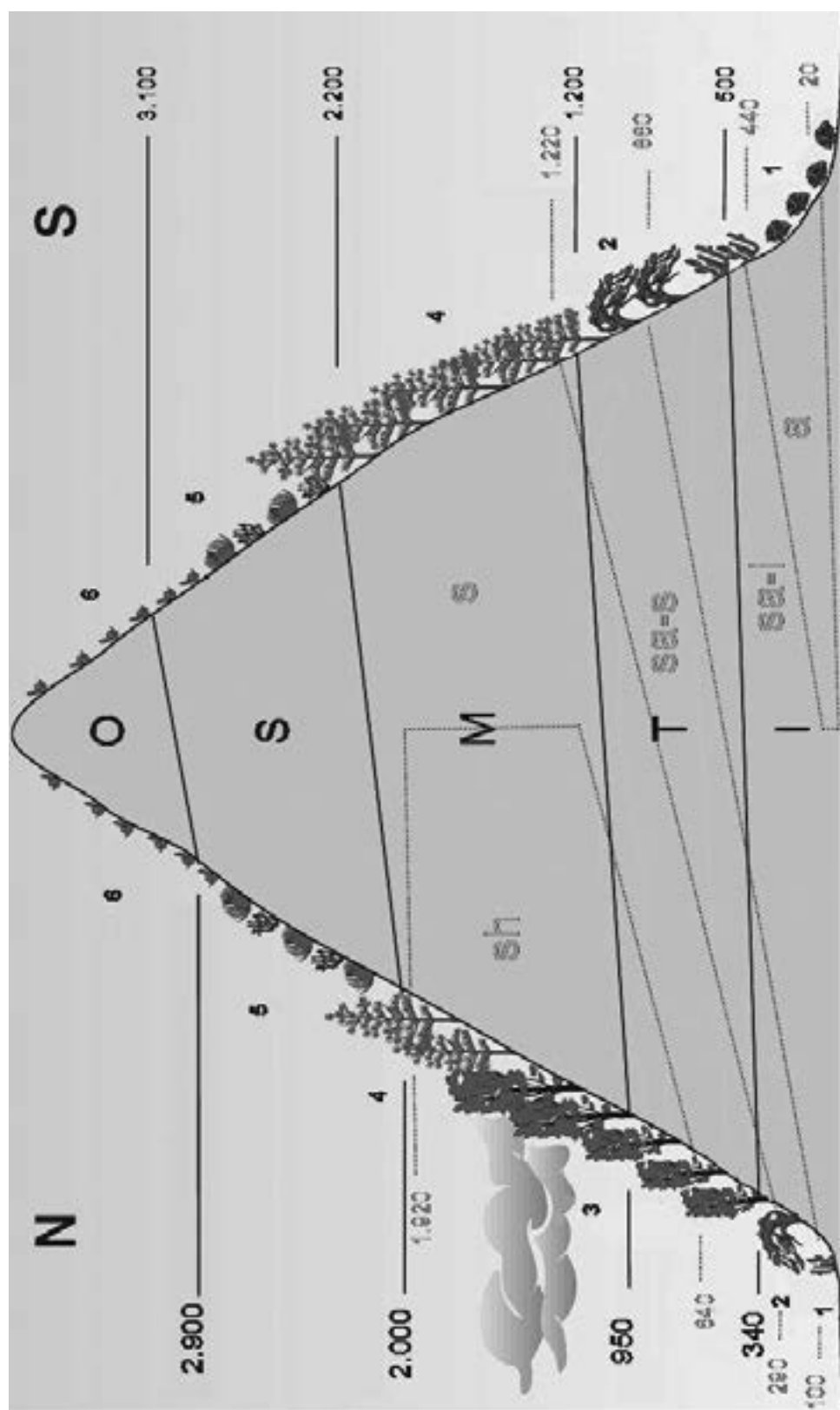
Temperatura positiva (Tp). Es el valor en décimas de grado de la suma de las temperaturas medias de los meses con temperatura media superior a 0°C. La temperatura positiva se utiliza también directamente para la determinación del termotipo cuando el valor de Itc es inferior a 120 ó cuando el valor de Ic es superior a 21.

Termotipos y ombrotipos presentes en Canarias: Como hemos visto, los termotipos (Fig. 1), constituyen entidades territoriales caracterizadas por determinados valores e índices térmicos. De forma similar, los ombrotipos (Fig. 1) constituyen espacios del territorio caracterizados por un rango de precipitaciones o por determinados valores de índices en los que intervienen de forma significativa las precipitaciones. En las tablas 1 y 2 (incluidas en el Apéndice), se muestran los valores definitorios de los termotipos y ombrotipos mediterráneos con representación en Canarias.

Mapas bioclimáticos: La confección de mapas bioclimáticos conlleva la colecta de datos de las estaciones meteorológicas existentes en el territorio. En función de los índices obtenidos a partir de sus datos, y de los valores umbrales de los índices para la delimitación de los termotipos y ombrotipos, se obtienen las cotas altitudinales que permiten trazar las isolíneas que los delimitan. La superposición de los mapas de termotipos y ombrotipos, así como en Canarias, la consideración del área de influencia más frecuente de nieblas del alisio, nos proporcionan los espacios del territorio propios de los diferentes pisos bioclimáticos (ver figuras 1 y 2).

Pisos bioclimáticos reconocidos en Canarias: Hasta ahora se han reconocido 32 pisos bioclimáticos para Canarias, aunque en realidad algunos son subpisos o combinaciones bioclimáticas de importancia para la vegetación (Tabla 3). Estos pisos se han establecido combinando los termotipos y ombrotipos presentes en el territorio y considerando también algún otro parámetro determinante del tipo de vegetación, particularmente la presencia o ausencia de nubes del alisio y el índice de continentalidad (Fig. 2, ejemplo en Tenerife).

Pisos bioclimáticos vs. series de vegetación: Como ya hemos visto, las series de vegetación constituyen conjuntos de comunidades vegetales asociadas por procesos dinámicos o de sucesión, que se suceden en un territorio teselar, es decir, en un territorio homogéneo en sus características ecológicas y que por ello tiene un único tipo de vegetación potencial. Cada unidad de vegetación que se sucede se conoce como etapa. Existe una etapa inicial, etapas intermedias y una etapa final. La etapa final de una serie es la comunidad cabeza de serie, y constituye el óptimo biológico estable de la vegetación.



Las series que se asientan en las situaciones edafotopográficas medias de un territorio y dependen directamente del clima (macroclima), constituyen las series climatófilas. Pero se puede distinguir también otro tipo de series, las edafófilas, dependientes en general de alguna particularidad del suelo. Así por ejemplo, en la típica catena valle - ladera - cresta, existe mayor acumulación de materiales finos y un superávit hídrico en el valle, y allí se desarrollan las series edafohigrófilas; en las crestas, existe mayor arrastre de materiales finos y un déficit hídrico, y se generan las denominadas series edafoxerófilas. Además, existen series especiales derivadas de particulares condiciones ecológicas.

Es posible establecer una relación recíproca entre los pisos bioclimáticos de un territorio y las series de vegetación climatófilas (también con ciertas series edafófilas) lo que nos faculta a predecir posibles cambios en la vegetación y probables pautas de su desplazamiento en función de los cambios climáticos esperados. También ello nos permite predecir posibles pautas de evolución y desplazamiento de las poblaciones de individuos componentes de estas comunidades, y por tanto de los elementos de la flora.

En la (Tabla 3) se muestra la correlación de pisos bioclimáticos y series de vegetación climatófilas de Canarias utilizando, por simplificación, una nominación general fisionómico-florística para ellas.

Cartografía de la vegetación y cartografía corológica-taxonomica

Como ya mencionamos antes, en la actualidad contamos con una cartografía digital de la vegetación a escala 1:20.000, que nos permite hacer un seguimiento de los posibles cambios que se produzcan en el futuro. También disponemos de la cartografía corológica taxonómica, es decir, la de distribución de las plantas. Ésta proporciona abundante información acerca de la distribución de nuestras plantas y constituye una herramienta valiosa en el análisis del cambio. La información abarca a todo el archipiélago aunque realizada a una escala menor; o está restringida a algunas islas o sectores insulares con una mayor escala, resultado de diversos proyectos o tesis (Barquín & Voggenreiter, 1987, 1988; Esquivel *et al.*, 2005; Naranjo *et al.*, 2004).

Fig. 1. Catena altitudinal de la vegetación potencial de Tenerife con termotipos y ombrotipos asociados (pisos bioclimáticos). Termotipos: I. inframediterráneo; T: termomediterráneo; M: mesomediterráneo; S: supramediterráneo; O: oromediterráneo. Ombrotipos: a: árido; sa-i: semiárido inferior; sa-s: semiárido superior; s: seco; sh: subhúmedo. 1: tabaibales y cardonales; 2: bosques termoesclerófilos (sabinares, almacigales y acebuchales); 3: monteverde; 4: pinar; 5: retamar de cumbre; 6: comunidad de violeta del Teide.

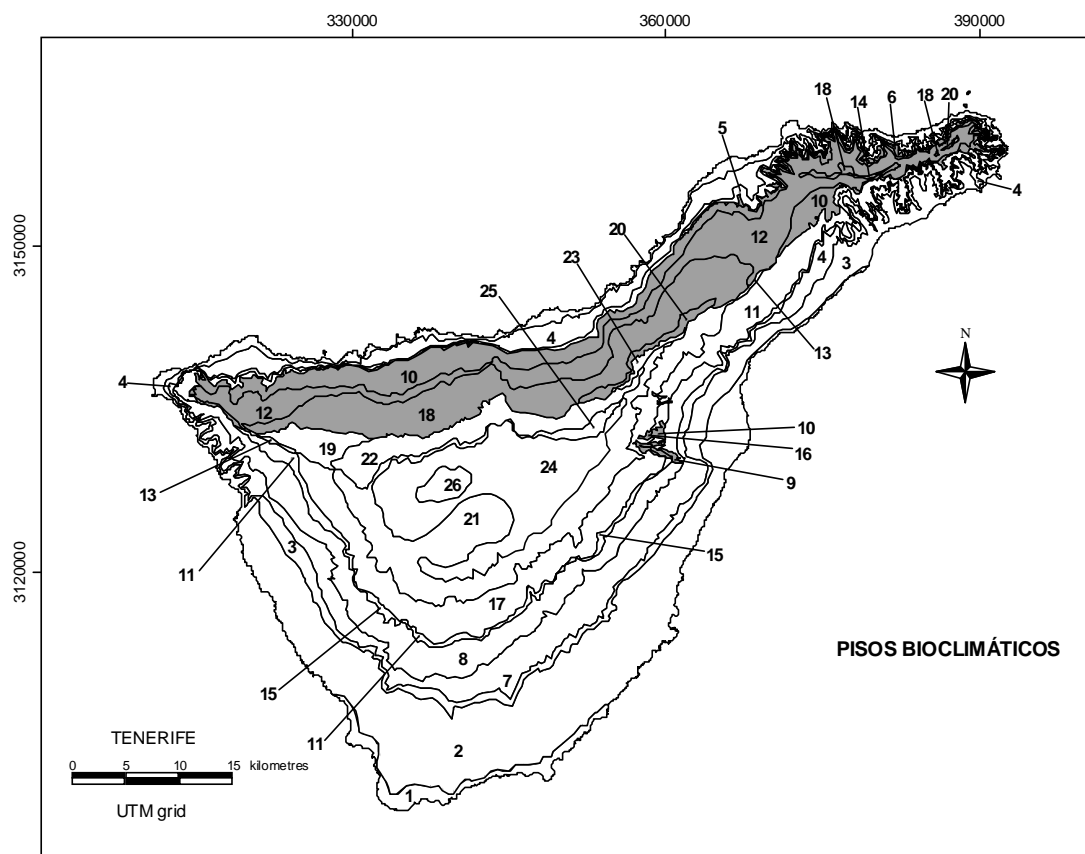


Fig. 2. Pisos bioclimáticos de Tenerife. 1. Inframediterráneo hiperárido; 2. Inframediterráneo árido; 3. Inframediterráneo semiárido inferior; 4. Inframediterráneo semiárido superior; 5. Inframediterráneo seco (-); 6. Inframediterráneo seco (+); 7. Termomediterráneo semiárido inferior; 8. Termomediterráneo semiárido superior (-); 9. Termomediterráneo semiárido superior (+); 10. Termomediterráneo seco (+); 11. Termomediterráneo seco inferior (-); 12. Termomediterráneo subhúmedo (+); 13. Termomediterráneo seco superior (-); 14. Termomediterráneo húmedo (+); 15. Mesomediterráneo inferior semiárido superior (+); 16. Mesomediterráneo inferior seco (+); 17. Mesomediterráneo inferior seco (-); 18. Mesomediterráneo inferior subhúmedo (+); 19. Mesomediterráneo inferior subhúmedo (-); 20. Mesomediterráneo inferior húmedo (+); 21. Mesomediterráneo superior seco (-); 22. Mesomediterráneo superior subhúmedo (-); 23. Mesomediterráneo superior húmedo (-); 24. Supramediterráneo seco; 25. Supramediterráneo subhúmedo; 26. Oromediterráneo seco. (+): con nieblas del alisio; (-): sin nieblas del alisio. [7] (Figura: Del Arco et al., 2006)

Datos de partida

Utilizaremos como datos de partida para el análisis de la variación climática y de los pisos de vegetación los datos del Proyecto ECCE (Proyecciones de PROMES). El Proyecto ECCE (Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático) (Moreno, 2005) desarrolló, en base a las proyecciones de variación del clima del modelo PROMES (Gallardo *et al.*, 2001), hipótesis acerca de los posibles cambios derivados de la modificación de ciertas variables climáticas en dos

escenarios diferentes denominados A2 y B2 para 2070-2100, en relación con sus valores en el periodo 1960-1990.

Si se analiza la variación térmica desde mediados de la década de los 70 del siglo XX, puede concluirse que se ha producido un incremento bastante general de la temperatura, el cual resulta más evidente durante el invierno. En lo que se refiere a la precipitación, su complejo reparto espacial y su variabilidad temporal no permiten predecir una tendencia general definida, aunque los resultados apuntan hacia una tendencia a su disminución en el S de la Península Ibérica y en Canarias en la segunda mitad del siglo XX (De Castro, 2005).

La tendencia del clima futuro, obtenida a partir de modelos globales, es incierta, pues depende de la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de aerosoles azufrados. Para su estudio se han establecidos diversos escenarios en función de la evolución de la población, de las actividades socio-económicas y del progreso tecnológico en el siglo XXI. Los escenarios A2 y B2 que aquí se consideran, responden a características socioeconómicas similares a las actuales.

El escenario A2 es “peor” en términos de cambio climático. En A2 la concentración global de CO₂ llegaría en el año 2100 a 850 ppm, un 120 % más que la actual, mientras que en B2 llegaría a 760 ppm, aproximadamente el doble que la actual. Con el fin de ampliar la resolución espacial que ofrecen los modelos globales, se han considerado para estos escenarios los resultados obtenidos a partir de un modelo regional de clima, con una resolución de 50x50 Km², anidado en un modelo global (De Castro, 2005). A pesar de esta ampliación, resulta evidente que la imprecisión de los resultados se magnifica en Canarias debido a la escasa resolución que representa esta cuadrícula y a la participación de superficie terrestre y oceánica en las mismas. A pesar de ello, hemos considerado estos datos asumiendo los errores que se pueden derivar.

En la Fig. 3 se indican las cuadrículas consideradas para Canarias. Las islas de La Palma y El Hierro no están incluidas en el ámbito geográfico del modelo y La Gomera entra parcialmente en la cuadrícula 11-17. Para la obtención de datos climáticos sólo se han tenido en cuenta los valores de las cuadrículas que contienen superficie terrestre. Debe tenerse en cuenta que la proyección del cambio climático se hace para la totalidad del área de la cuadrícula. El cambio es mucho más moderado en la superficie oceánica que en la terrestre, por lo que en las cuadrículas con mucha superficie marítima no se garantiza una buena previsión de lo que puede suceder en la superficie terrestre correspondiente. En el archipiélago canario, sólo la cuadrícula 13-16 contiene más superficie terrestre que marítima. El ascenso de la temperatura puede considerarse que se producirá de una forma más o menos lineal (homogénea) en altitud. El cambio en las precipitaciones es más complejo, puesto que representa un promedio para la superficie total de

la cuadrícula que puede repartirse de maneras muy diferentes dependiendo de la variación del montante de precipitaciones dentro de la cuadrícula.

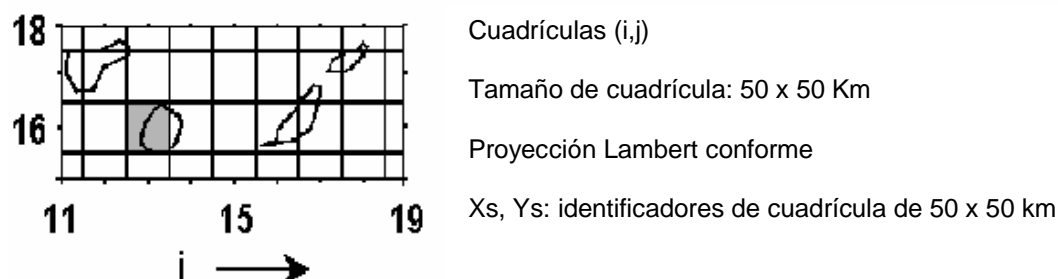


Fig. 3. Cuadrículas consideradas.

Los escenarios, variables climáticas y periodos de tiempo se han codificado de la manera siguiente:

A2, B2: escenarios contemplados en PROMES.

P, Mx, Mn, T: proyección de cambio para 2070-2100, con respecto a los valores actuales (1960-1990), de la precipitación (**P**) (valores en mm), de la temperatura media de las máximas (**Mx**), de la temperatura media de las mínimas (**Mn**) y de la temperatura media (**T**) (valores en °C).

01-12: dígitos del mes (**01:** enero, ..., **12:** diciembre).

Tp: proyección de cambio de la temperatura positiva anual (**Tp**).

Así, por ejemplo, **B2Mx08** indica para el escenario B2 el cambio de la temperatura media de las máximas (**Mx**) en agosto (**08**).

Valoración de los datos para el Archipiélago Canario

En la Tabla 4 están recogidas las previsiones de variación de **T**, **Mx**, **Mn** y **P** para cada uno de los escenarios **A2** y **B2**. Las filas de las tablas se han ordenado por islas, anotándose el valor medio de la variación mensual y anual obtenido a partir de los valores consignados para las cuadrículas que les corresponden.

Para cada uno de los escenarios A2 y B2, en la Tabla 5 se muestran las variaciones límites observadas para el Archipiélago [siglas de las islas entre paréntesis: T (Tenerife), C (Gran Canaria), F (Fuerteventura), L (Lanzarote)].

En ambos supuestos, en lo que respecta a temperaturas, se observa un mayor ascenso de las temperaturas (**T**, **Mx** y **Mn**) en las islas más occidentales estudiadas, Tenerife y Gran Canaria, aunque mayor en Gran

Canaria probablemente debido a su menor latitud. Las máximas variaciones térmicas se observan en la cuadrícula 13-16 (Fig. 3) que tiene una mayor proporción de tierra y ello puede ser la causa de que aparezcan estas cifras límites en Gran Canaria, aunque podría considerarse que estos datos altos se compensan con los valores bajos que muestra la cuadrícula 14-16, mayoritariamente oceánica, con la que se ha promediado (por abreviar, los datos de las cuadrículas no se han consignado en la tabla).

Este ascenso de las temperaturas provocaría un calentamiento más evidente en las islas occidentales que fueron estudiadas, lo que provocaría una aridización mayor de ellas en relación a las orientales que ya muestran actualmente un alto grado de aridez.

En lo que respecta a las lluvias, el comportamiento es más o menos similar en ambos supuestos, aunque la reducción de la cuantía afecta más en el escenario A2. Los descensos se muestran más o menos uniformes en todo el archipiélago en una cuantía media que oscila entre -5,8 y -8,5 mm de precipitación en el supuesto B2 y entre -11,5 mm y -17,55 mm en el supuesto A2, alcanzándose de nuevo los máximos de disminución por cuadrícula en la cuadrícula 13-16, con -11,7 mm para B2 y -25,5 mm para A2.

En relación a la distribución estacional de las precipitaciones, se observa un ligero aumento de las lluvias otoñales (oct., nov. y dic.), ligera disminución de las invernales, un ligero aumento en marzo (B2) o abril (A2) y la disminución máxima en el mes de julio.

Dado que el ascenso de temperatura se puede considerar lineal, es decir homogéneo, independientemente de la altitud, se han utilizado los valores de PROMES para evaluar la evolución del **I_{tc}** (índice de termicidad compensado) y de **T_p** (temperatura positiva) en diferentes estaciones (Tablas 6 y 7), más o menos escalonadas en altitud, en cada una de las islas consideradas. Ello nos permite estimar la variación en los límites altitudinales de los termotipos y, de acuerdo con el conocimiento actual del patrón de distribución altitudinal de las series climatofila y de su comportamiento bioclimático, determinar cuales podrían ser los desplazamientos que se provocarían en la vegetación.

De igual forma, pero asumiendo el error que conlleva la irregular distribución de las precipitaciones, en base a los valores de **T_p** (temperatura positiva) y de **P_p** (precipitación positiva), hemos considerado la variación pluviométrica de forma regular para calcular los valores del **I_o** (índice ombrotérmico) que se incluyen en la tabla 6. Estos valores de **I_o**, permiten evaluar los posibles cambios de ombrotipos y su distribución espacial, lo que conjuntamente con la valoración de la variación de **T_p**, permite pronosticar los cambios en la vegetación.

Asumiendo como valores umbrales de **I_{tc}**, **T_p** e **I_o** para los termotipos y ombrotipos mediterráneos los expuestos en las Tablas 1 y 2 y teniendo en

cuenta los incrementos estimados de **I_{tc}**, **T_p** e **I_o** tal como se presentan en las tablas 6 y 7, podemos considerar los desplazamientos en los termotipos y ombrotipos que se exponen a continuación.

Desplazamientos en los termotipos

En las tablas 7 y 8 (ver también fig. 4) se muestran los datos relativos a los desplazamientos previstos para los termotipos.

Supuesto B2.

Para este supuesto, las unidades de incremento del **I_{tc}** son las siguientes: (52,2 para Tenerife, 57,8 para Gran Canaria, 48,7 para Fuerteventura, y 47,7 para Lanzarote), (ΔT_p en cumbre de Tenerife = 205,2).

Se produce un incremento en altura del piso Inframediterráneo, debido a que absorbe casi en su totalidad al piso Termomediterráneo inferior (aproximadamente el 75% en Tenerife, Fuerteventura y Lanzarote; y aproximadamente el 90% en Gran Canaria). El piso Termomediterráneo actual, aunque pierde su tramo inferior, se enriquece en altitud por la incorporación de aproximadamente el 70% del actual horizonte inferior del piso Mesomediterráneo, piso que a su vez gana en altitud aproximadamente también un 70% del actual piso Supramediterráneo. Por último, el menguado piso Supramediterráneo, crece en altitud a expensas de un 45% del actual Oromediterráneo. Teniendo en cuenta las configuraciones insulares a modo de montañas cónico-piramidales, los desplazamientos, suponen mayor merma de superficie para los termotipos situados más altos. De acuerdo con los datos obtenidos, el mayor desplazamiento de pisos se produce en Gran Canaria.

Supuesto A2.

Para este supuesto las unidades de incremento del **I_{tc}** son las siguientes: (80 para Tenerife, 86,6 para Gran Canaria, 73,9 para Fuerteventura, y 72,5 para Lanzarote). (ΔT_p en cumbre de Tenerife = 316,8).

El cambio es más drástico. Todo el piso Termomediterráneo inferior y la mitad del superior se incorpora al piso Inframediterráneo. Todo el piso Mesomediterráneo inferior pasa a Termomediterráneo, e incluso hasta una parte de su horizonte superior (20% en Gran Canaria, 15% en Tenerife). Entre el 56% y 65% del piso Supramediterráneo pasa a Mesomediterráneo, y entre el 60% y 70% del piso Oromediterráneo pasa a Supramediterráneo.

En este escenario, los termotipos más cálidos ganan extensión en una mayor cuantía que en el supuesto B2. En líneas generales puede afirmarse que en B2 se produce un corrimiento de los termotipos de un horizonte y en A2 de horizonte y medio. La tabla 7 y la fig. 4, documentan, a modo de ejemplo, las variaciones altitudinales en Tenerife.

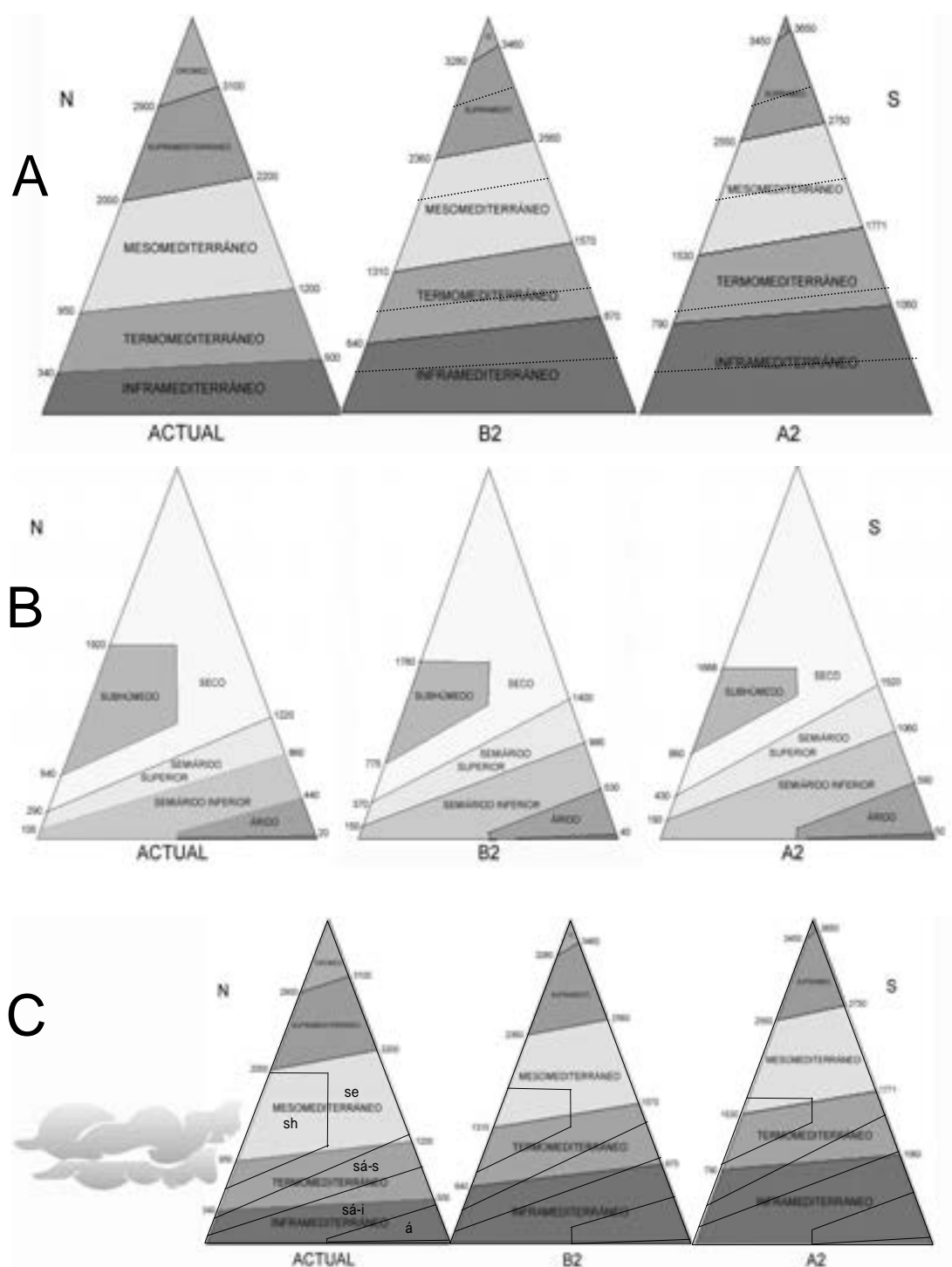


Fig. 4. Variación altitudinal de los termotipos (A), ombrotipos (B) y pisos bioclimáticos (C) para cada uno de los escenarios B2 y A2, en relación con su disposición actual. En A se ha transcrito para los escenarios B2 y A2, con líneas punteadas, la altitud actual de los termotipos.

Variación de los ombrotipos

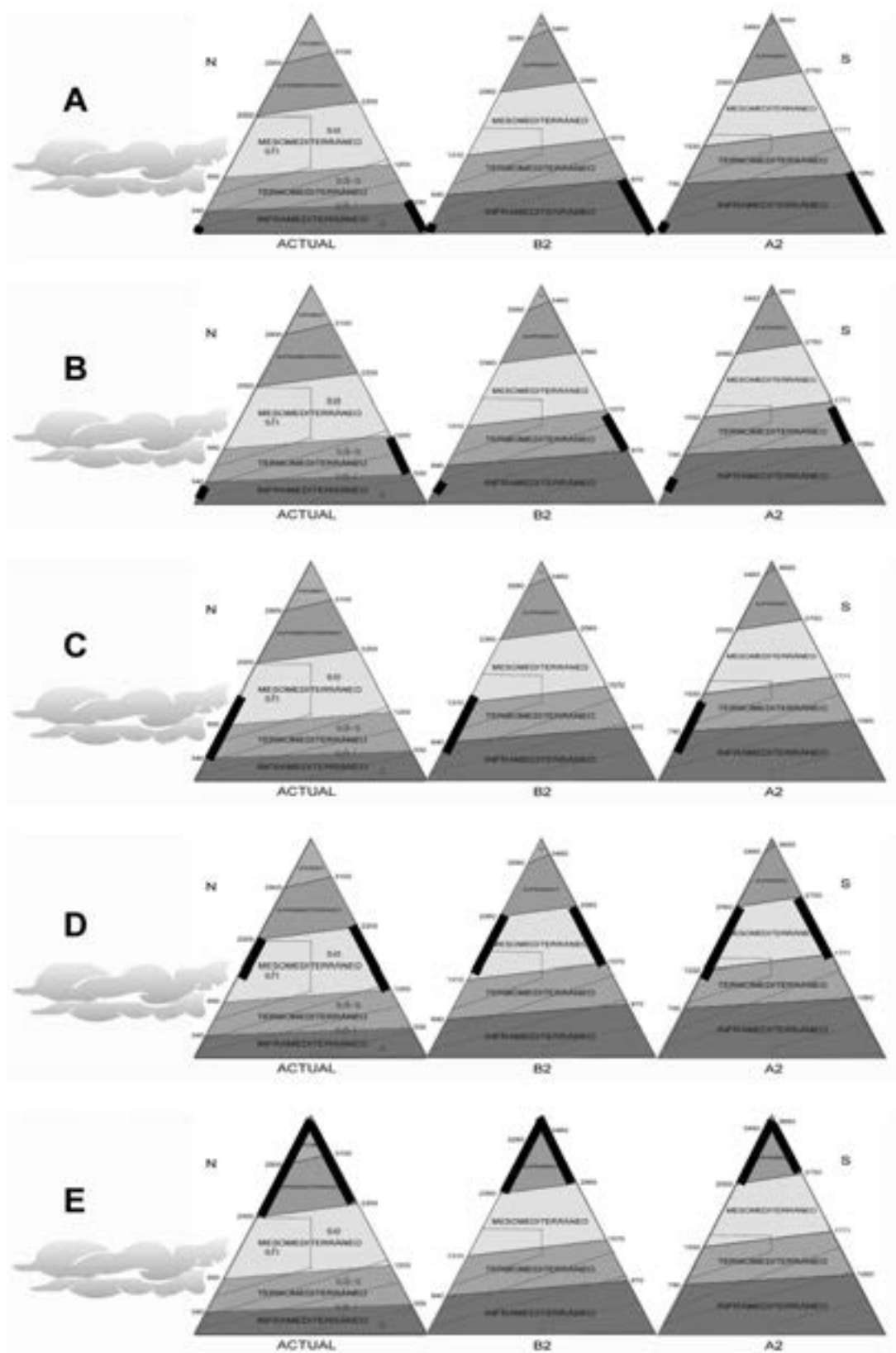
En las tablas 6 y 9 (ver también Fig. 4) se muestran los datos relativos a las variaciones previstas para los ombrotipos.

Los datos de la tabla 6 nos pueden dar una idea de cual podría ser la evolución del índice ombrotérmico (**Io**), y por tanto, de los ombrotipos a diferentes niveles altitudinales en las islas consideradas. Los valores actuales de **Io**, **Tp**, **Pp** necesarios para el establecimiento de las comparaciones han sido tomados de Del Arco *et al.* (2002, 2006), Reyes-Betancort (2001) y Rodríguez-Delgado (2005). Como consecuencia de la disminución de las precipitaciones y del aumento de las temperaturas se produce una disminución del **Io**, creciente con la altitud. Para el escenario B2, la variación del **Io** oscila entre un mínimo de -0,06 (en la zona inferior inframediterránea árida de Lanzarote, a 13 m s.m.; Fuerteventura a 29 m s.m. y Tenerife a 25 y 64 m s.m.), y un máximo de -0,65 (en la parte alta supramediterránea subúmeda de Tenerife en Izaña a 2371 m s.m.). Para el escenario A2 la variación respectiva observada es desde -0,08 en Lanzarote (13 m s.m.) hasta -0,95 en Tenerife (2371 m s.m.). Estos valores determinan un ligero desplazamiento altitudinal de los ombrotipos actuales, que se aridizan, y que al igual que ocurría en los termotipos como consecuencia de la configuración insular, provocan una merma espacial de los ombrotipos que se presentan a mayor altitud. Lógicamente, los cambios que se estiman para el escenario A2, son más acusados que para B2. Las variaciones altitudinales estimadas para Tenerife se muestran en la tabla 9 (ver también fig. 4).

Nieblas del alisio

No se ha considerado hasta el momento lo que ocurriría en el Norte de las islas, en la zona de influencia directa de las nieblas del alisio. Parece lógico pensar que un calentamiento general provocaría un desplazamiento en la altitud en la que se produce el punto de rocío determinante de la aparición de nubes de montaña, ya que el aire húmedo costero estaría más caliente y tendría que ascender más para condensarse. Sin embargo, también podría ejercer un papel compensador el hecho de que el aumento de la temperatura provocaría un mayor grado de saturación de agua en la atmósfera, con la consiguiente disminución de la altitud de condensación. El calentamiento general también podría provocar una disminución en la altura de la zona de inversión de los alisios, que se genera con el paso al estrato superior cálido de subsidencia.

Fig. 5. Posibles desplazamientos altitudinales de las principales comunidades potenciales canarias (ejemplo para Tenerife), representadas en trazo grueso. A: tabaibales y cardonales; B: bosques termoesclerófilos (sabinares, almacigales y acebuchales); C: monteverde; D: pinar; E: retamar de cumbre y comunidad de violeta del Teide



Como consecuencia del estudio de datos de temperatura y humedad relativa durante la estación seca (junio, julio y agosto), de una serie de estaciones meteorológicas en Tenerife realizado por Sperling *et al.* (2004), se ha comprobado que durante los últimos 30 años se ha producido un incremento de la humedad relativa y un ligero descenso del rango de variación de la temperatura “diurna” por debajo de la zona de inversión, lo que indica una tendencia futura hacia un aumento de la incidencia de nieblas a baja altitud. También se ha observado una tendencia a mayor sequedad en la capa del alisio superior del NW, lo que podría correlacionarse con un futuro incremento de la subsidencia que conllevaría un descenso del techo superior de las nubes.

La conclusión del “aumento durante el verano de la incidencia de nieblas a baja altitud” habría que reconsiderarla, puesto que, desde un punto de vista sinóptico, parece existir una tendencia de desplazamiento hacia el Este del anticiclón de las Azores en verano, y consiguientemente, un debilitamiento de los alisios (Cuevas, 2006). Además, como se espera una elevación de la temperatura superficial del océano, todo ello significaría cambios importantes en el aporte de agua por las nubes a las islas y en la vegetación de laurisilva.

Consecuencias del cambio climático en la flora y la vegetación de las islas Canarias

Los cambios climáticos mencionados, apuntan a una aridización general del clima, que supondría desplazamientos de los termotipos y ombrotipos (Fig. 4) y determinaría cambios sustanciales en la distribución de la vegetación de las islas (Fig. 5). El espacio temporal señalado para estos cambios climáticos, no parece lo suficientemente amplio como para que pueda ser seguido por un desplazamiento paralelo de la vegetación climatófila de los diferentes pisos o de la otra vegetación potencial insular, o, lo que es lo mismo, de la flora que las determina, por lo que es previsible una pérdida de biodiversidad. La ocupación previa del territorio, las potencialidades evolutivas de las plantas y sus capacidades dispersivas, así como, los nuevos tipos de interacciones biológicas que se generen serán, entre otros factores los que irán determinando la dinámica del acoplamiento a la nueva situación. En todo caso, se verán favorecidas en este desplazamiento las plantas de esas comunidades con diásporas de dispersión rápida y los matorrales de sustitución mucho más agresivos que aquellas.

En general podríamos decir que se incrementaría de forma notable la superficie inframediterránea, a la que habría que detraer en su límite inferior una estrecha banda que sería afectada por el mar como consecuencia de la previsible elevación del océano; también se apunta una ligera variación



La progresiva aridez reducirá aún más la extensión de los sauzales de fondo de barranco. Sauzal en la Caldera de Taburiente.



El pinar muestra una gran resistencia y adaptabilidad a los cambios de precipitación y temperatura. El cambio climático amenaza con una mayor reiteración de incendios en ellos.



El abandono de la agricultura y el cese del pastoreo ha permitido el inicio de la lenta recuperación de algunos territorios de sabinar, como el que se muestra de Arico, Tenerife. Los pinos, también muestran aquí su avidez colonizadora.



Las plantas de escasa distribución natural ven más limitada sus posibilidades de supervivencia. Tal es el caso del endemismo tinerfeño conocido como picopaloma (*Lotus berthelotii*).

ombrotípica hacia la aridización. Ello favorecería algo la expansión potencial de los tabaibales dulces (comunidad de *Euphorbia balsamifera*) del inframediterráneo árido, pero sobre todo la de los cardonales (comunidad de *Euphorbia canariensis*) típicos del inframediterráneo semiárido inferior y sus proyecciones edafoxerófilas hacia los pisos superiores. Los matorrales de tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*, *Euphorbia regis-jubae*, *Euphorbia berthelotii*), ahulaga (*Launaea arborescens*), salado (*Schizogyne sericea*) y vinagrera (*Rumex lunaria*), entre otros, propios de las etapas sustitutivas de tabaibales dulces y cardonales, podrían ser los principales protagonistas en la colonización de los nuevos territorios, por su mayor rapidez colonizadora. El cambio climático podría favorecer el desarrollo del herbazal de cerrillo y panasco (*Hyparrhenia sinaica* y *Cenchrus ciliaris*), pero también algunos invasores actualmente en expansión, como el rabogato (*Pennisetum setaceum*), verían potenciada su área. Evidentemente, estos posibles desplazamientos se verían constreñidos por la expansión urbana e industrial de las zonas bajas de las islas.

El territorio inframediterráneo semiárido superior del Norte se incrementaría ligeramente; la pérdida en el Sur del termomediterráneo semiárido inferior se compensaría con el mantenimiento del semiárido superior y con un incremento del termomediterráneo seco. Estos territorios son los potenciales del bosque termoesclerófilo, aunque parte del termomediterráneo seco es compartido con el pinar. Ello provocaría una ligera disminución del área potencial de este tipo de bosque: sabinar (comunidad de *Juniperus turbinata* subsp. *canariensis*), acebuchal (comunidad de *Olea cerasiformis*), almacigal (comunidad de *Pistacia atlántica*), lentiscal (comunidad de *Pistacia lentiscus*), con una exigua representación actual y con un potencial de recuperación muy reducido por deforestación y por la utilización de su territorio como urbano y agrícola.

El monteverde o laurisilva, típico de las áreas con nubes de las fachadas orientadas a los alisios del Nordeste, vería disminuida su área potencial como consecuencia de la supuesta disminución altitudinal del mar de nubes. Su posible desplazamiento a otras áreas se vería muy comprometido pues aunque resiste cierta sequía requiere de la presencia de nubes que, al menos durante la época estival más desfavorable en cuanto a precipitación, compensen el déficit hídrico al limitar la evapotranspiración. Si la disminución del mar de nubes se relaciona con la evolución térmica prevista, podría pronosticarse una reducción del monteverde o un reajuste del mismo, persistiendo preferentemente la laurisilva termófila (de lugares más cálidos y secos) y reduciéndose los tipos mesófilos (de lugares más frescos y húmedos) o quedando acantonados en las situaciones mesoclimáticas más favorables. De producirse el descenso del techo superior de las nieblas en verano y debilitamiento de la velocidad del alisio,



El cambio climático favorece la incidencia de eventos extraordinarios como el de la tormenta Delta que en 2005 azotó nuestras islas y produjo diversos daños como el desarraigo de estos pinos en La Palma.



El área potencial de tabaibales y cardonales podría ampliarse, pero la transformación urbana y rural del territorio los restringiría a los ambientes rupícolas apenas transformados.



Ciertas plantas invasoras de gran adaptabilidad a ambientes cálidos y secos como el rabo de gato (*Pennisetum setaceum*), verán favorecida su expansión.



Por su rapidez colonizadora, las comunidades de sustitución de la vegetación potencial, como este vinagreral-inciensal, tomarán la avanzadilla en los desplazamientos altitudinales que se produzcan, sobre territorios transformados, frente a algunas comunidades potenciales.

tal como se pronostica, también se vería afectada la actual laurisilva de cresterías húmedas en verano que podría reducirse o al menos verse sometida a un proceso de desplazamiento. En cotas superiores la disminución del techo del mar de nubes podría favorecer el descenso del pinar. A cotas inferiores, los principales matorrales de sustitución del monteverde, por su mayor capacidad dispersiva y colonizadora frente a las comunidades potenciales, serían los que tomarían la avanzadilla hacia los posibles lugares de desplazamiento, escasos si consideramos la situación urbana y rural actual. El matorral de granadillo y espinero (*Hypericum canariense* y *Rhamnus crenulata* respectivamente), en las cotas más bajas y el fayal brezal (matorral de *Myrica faya* y *Erica arborea* respectivamente) a mayor altitud, serían los más rápidos a la hora de colonizar.

Los territorios mesomediterráneos del Norte fuera de la influencia de las nubes del alisio y los correspondientes de la vertiente Sur de las islas, se reducirían, aunque aumentarían su cota altitudinal y en la vertiente norte incluso podrían descender por la posible disminución del techo del mar de nubes. La comunidad climatófila dominante, el pinar canario (comunidad de *Pinus canariensis*), tiene gran capacidad de colonización, por lo que podría expandirse con cierta facilidad en los territorios ganados. Incluso su persistencia en territorios bajos del Sur sería casi segura ante la falta de competencia con otros árboles de los bosques termoesclerófilos. El escobonal (comunidad de *Chamaecytisus proliferus* subsp. *angustifolius*) podría constituirse en avanzadilla sobre todo en terrenos pedregosos y solanas de los roquedos.

Por último, los territorios supramediterráneos y oromediterráneos de posible desarrollo del retamar (comunidad de *Spartocytisus supranubius*), quedarían reducidos, y a pesar de la posibilidad de su expansión altitudinal, la juventud geológica del territorio lo impediría en gran medida. Las comunidades glerícolas de la cima insular, no serían grandemente afectadas.

La vegetación rupícola, adaptada a la sequía y condiciones de estrés particulares de su hábitat, no parece especialmente afectada por este cambio climático, a excepción de las comunidades rupícolas propias de las áreas de nubes en el ámbito potencial del monteverde. Los grandes riscos que siguen la dirección de los barrancos radiales insulares, constituyen corredores que, de mediar tiempo suficiente, permitirán el desplazamiento de este tipo de vegetación, al igual que de otros tipos de vegetación no rupícola.

La vegetación hidrofítica, hoy en día en franco retroceso en las islas por el aprovechamiento del agua, incrementaría su retroceso como consecuencia de la disminución de los aportes. Así, los sauzales (comunidad de *Salix canariensis*) o los palmerales (comunidad de *Phoenix canariensis*) se verían seriamente afectados.

La vegetación costera de dunas, playas, acantilados y saladares, sufrirían grandes cambios como consecuencia de la previsible elevación del



La laurisilva podría ver mermada su área de distribución como consecuencia de una menor incidencia de nieblas en las vertientes de barlovento, provocada por la tendencia observada de un desplazamiento hacia el Este del anticiclón de las Azores durante el verano.



Los territorios cumbreños de óptimo desarrollo del retamar (comunidad de *Spartocytisus supranubius*) reducirán su área. Su posible expansión altitudinal se ve comprometida por la juventud geológica del territorio.

nivel del mar, que provocaría una remodelación profunda de la configuración de la costa. En Canarias se constata en la actualidad una elevación del mar de 0,77 cm por año (Cuevas, 2006). También, la evolución de la vegetación costera estaría estrechamente condicionada al grado de ocupación de la costa, que en la actualidad está ampliamente transformada, principalmente por el desarrollo urbano, particularmente turístico.

Referencias

- BARQUÍN, E. & V. VOGGENREITER (1987). *Prodromus del Atlas Fitocorológico de las Canarias Occidentales*, Vol. 1: Especies autóctonas y de interés especial. Bonn. 634 pp.
- BARQUÍN, E. & V. VOGGENREITER (1988). *Prodromus del Atlas Fitocorológico de las Canarias Occidentales (Hierro, La Palma, Gomera, Tenerife, Gran Canaria)*. Bonn-La Laguna.
- BOC (2007). *Boletín Oficial de Canarias* 2007/145, 19/07/2007, y 2007/154, 1/08/2007.
- CAUJAPÉ, J. (Traduc.) (2006). *La declaración de Gran Canaria II sobre el cambio climático y la conservación vegetal*. Área de Medio Ambiente y Aguas del Cabildo de Gran Canaria y Botanic Gardens Conservation Internacional. Gran Canaria. 7 pp.
- CUEVAS, E. (2006). Evolución futura del clima canario. En: *El Cambio Climático en Canarias*. Ciclo de conferencias organizado por la Academia Canaria de Ciencias.
<http://webpages.ull.es/users/acanacie/Academia.htm>
- DE CASTRO, M., J. MARTÍN-VIDE & S. ALONSO (2005). El clima en España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI. In: Moreno Rodríguez, J.M. (Coordinador). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Proyecto ECCE (Informe final)*. Ministerio de Medio Ambiente: 1-64.
- DEL ARCO, M., J.R. ACEBES & P.L. PÉREZ-DE-PAZ (1996). Bioclimatology and climatophilous vegetation of the Island of Hierro. *Phytocoenologia* 26(4): 445-479.
- DEL ARCO, M., J.R. ACEBES, P.L. PÉREZ-DE-PAZ & M.C. MARRERO (1999). Bioclimatology and climatophilous vegetation of Hierro (part 2) and La Palma (Canary Islands), *Phytocoenologia* 29(2): 253-290.
- DEL ARCO, M., M. SALAS, J.R. ACEBES, M.C. MARRERO, J.A. REYES-BETANCORT & P.L. PÉREZ DE PAZ (2002). Bioclimatology and climatophilous vegetation of Gran Canaria (Canary Islands). *Annales Botanici Fennici* 39: 15-41.

- DEL ARCO, M., O. RODRÍGUEZ-DELGADO, J.R. ACEBES, A. GARCÍA-GALLO, P.L. PÉREZ DE PAZ, J.M. GONZÁLEZ-MANCEBO, R. GONZÁLEZ-GONZÁLEZ & V. GARZÓN (2008). Bioclimatology and climatophilous vegetation of Gomera (Canary Islands). *Annales Botanici Fennici* (en prensa).
- DEL ARCO, M., P.L. PÉREZ DE PAZ, J.R. ACEBES, J.M. GONZÁLEZ-MANCEBO, J.A. REYES-BETANCORT, J.A. BERMEJO, S. DE ARMAS & R. GONZÁLEZ-GONZÁLEZ (2006). Bioclimatology and climatophilous vegetation of Tenerife (Canary Islands). *Annales Botanici Fennici* 43(3): 167-192.
- DEL ARCO, M., W. WILDPRET, P.L. PÉREZ DE PAZ, O. RODRÍGUEZ, J.R. ACEBES, A. GARCÍA-GALLO, V.E. MARTÍN, J.A. REYES-BETANCORT, M. SALAS, J.A. BERMEJO, R. GONZÁLEZ, M.V. CABRERA & S. GARCÍA (2006). *Mapa de Vegetación de Canarias*. GRAFCAN. Santa Cruz de Tenerife. 550 pp + 7 mapas despleables + CD.
- DEL ARCO, M. (2008). Consecuencias del cambio climático sobre la flora y vegetación canaria. In: MÉNDEZ PÉREZ, J.M. & M. VÁZQUEZ ABELEDO (Eds.). *El Cambio Climático en Canarias*. Academia Canaria de Ciencias. Serie Monografías Nº 1: 79-100.
- ESQUIVEL, J.L., N. ZURITA, M.C. MARRERO, I. IZQUIERDO, M. ARECHAVALETA, S. FAJARDO, M.A. CABRERA, S. MARTÍN, A. VERA, M. NARANJO & C. VALDIVIA (2005). *El Banco de Datos de Biodiversidad de Canarias*. Gobierno de Canarias, 163 pp. (<http://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/biodiversidad/ceplam/bancodatos/bancodatos.html>).
- FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F., J. LOIDI & J.C. MORENO (AUTORES); M. DEL ARCO, A. FERNÁNDEZ CANCIO, X. FONT, C. GALÁN, H. GARCÍA MOZO, R. GAVILÁN, A. PENAS, R. PÉREZ BADÍA, S. DEL RÍO, S. RIVAS-MARTÍNEZ, S. SARDINERO & L. VILLAR (Contribuyentes) (2005). Impactos sobre la biodiversidad vegetal. In: MORENO RODRÍGUEZ, J.M. (Coordinador), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Proyecto ECCE (Informe final)*. Ministerio de Medio Ambiente: 183-248.
- GALLARDO, C., A. ARRIBAS, J.A. PREGO, M.A. GAETNER & M. CASTRO (2001). Multi-year simulations with a high resolution regional climate model over the Iberian Peninsula. Current climate and 2xCO₂ scenario. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 127: 1659-1682.
- LOVEJOY, T.E. & L. HANNAH (Eds.) (2005). *Climate Change and Biodiversity*. Yale University Press. 418 pp.

- MÉNDEZ PÉREZ, J.M. & M. VÁZQUEZ ABELEDO (Eds.) (2008). *El Cambio Climático en Canarias*. Academia Canaria de Ciencias. Serie Monografías Nº 1, 106 pp.
- MORENO RODRÍGUEZ, J.M. (Coord.) (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático, Proyecto ECCE*. Informe final, Ministerio de Medio Ambiente. 822 pp.
- NARANJO, J., B. NAVARRO, J. NAVARRO & D. BRAMWELL (2004). Atlas de la flora de Gran Canaria. *Bot. Macaronesica* 25:189-196.
- PONS, A. & P. QUEZEL (1985). The history of the flora and vegetation and past and present human disturbance in the Mediterranean region, In: Gómez Campo, C. (Ed.), *Plant conservation in the Mediterranean area*. Dr. W. Junk Publ. Dordrecht.: 25-43.
- QUEZEL, P. (1979). Analysis of the Flora of Mediterranean and Saharan Africa. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 65: 479-534.
- REYES-BETANCORT, J.A., W. WILDPRET & M.C. LEÓN-ARENCIBIA (2001). The vegetation of Lanzarote (Canary Islands). *Phytocoenologia* 31(2): 185-247.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S. & S. RIVAS SÁENZ (2008). Centro de Investigaciones fitosociológicas, CIF. www.globalbioclimatics.org
- RIVAS-MARTÍNEZ, S. (1995). Clasificación bioclimática de la Tierra. *Folia Botanica Matritensis* 16: 1-29 (1995).
- RIVAS-MARTÍNEZ, S. (1997). Syntaxonomical synopsis of the North American natural potential vegetation communities I. *Itinera Geobotanica* 10: 5-148 (Bioclimatic classification system of the World: 10-11).
- RIVAS-MARTÍNEZ, S., W. WILDPRET, T.E. DÍAZ, P.L. PÉREZ-DE-PAZ, M. DEL ARCO & O. RODRÍGUEZ-DELGADO (1993). Excursion guide. Outline vegetation of Tenerife Island (Canary Islands). *Itinera Geobotanica* 7: 5-168.
- RODRÍGUEZ-DELGADO, O., A. GARCÍA-GALLO & M.V. MARRERO-GÓMEZ (2005). El bioclima y la biogeografía. In: Rodríguez-Delgado, O. (ed.), *Patrimonio Natural de la Isla de Fuerteventura*: 91-100. Cabildo de Fuerteventura. Gobierno de Canarias y Centro de la Cultura Popular Canaria. Arafo. Tenerife.
- SPERLING, F.N., R. WASHINGTON & R.J. WHITTAKER (2004). Future climate change of the subtropical North Atlantic: implications for the cloud forests of Tenerife. *Climatic Change* 65: 103-123 (2004).

Apéndice

Tabla 1. Termotipos mediterráneos reconocidos en Canarias.

Termotipos	Acrónimo	Valores climáticos		Horizonte	
(Rivas-Martínez 1997)		Itc	Tp*	Itc	
1. Inframediterráneo	Ime	580-450	> 2450	Inferior:	580-516
				Superior:	515-451
2. Termomediterráneo	Tme	450-350	2150-2450	Inferior:	450-401
				Superior:	400-351
3. Mesomediterráneo	Mme	350-210	1500-2150	Inferior:	350-281
				Superior:	280-211
4. Supramediterráneo	Sme	210-80	900-1500	Inferior:	210-146
				Superior:	145-80
5. Oromediterráneo	Ome	-	450-900		

* En los territorios latitudinalmente no tropicales, cuando $Ic \geq 21$ (continental), y cuando los valores de It o Itc < 120, el termotipo se calcula en función de Tp.

Tabla 2. Ombrotipos reconocidos en Canarias.

Ombrotipos (Rivas-Martínez 1997)*	Valores climáticos		
	Io	Horizonte	Io
1. Hiperárido	0,1-0,3	Inferior	0,1-0,2
		Superior	0,2-0,3
2. Árido	0,3-0,9	Inferior	0,3-0,6
		Superior	0,6-0,9
3. Semiárido	0,9-2,0	Inferior	0,9-1,45
		Superior	1,45-2,0
4. Seco	2,0-3,0	Inferior	2,0-2,5
		Superior	2,5-3,0
5. Subhúmedo	3,0-5,5	Inferior	3,0-4,25
		Superior	4,25-5,5
6. Húmedo	5,5-11,0	Inferior	5,5-8,25
		Superior	8,25-11

* Este mismo autor señala en 1999 nuevos valores para la definición de algunos ombrotipos: árido (0,3-1,0); semiárido (1,0-2,0); seco (2,0-3,6); subhúmedo (3,6-7,0); húmedo (7,0-14). En nuestros trabajos bioclimáticos para Canarias hemos utilizado los expresados en la tabla para favorecer la comparación de los estudios realizados en todas las islas y por el valor discriminatorio que proporcionan en el cambio de ciertos tipos de vegetación.

Tabla 3. Correspondencia entre pisos bioclimáticos y series de vegetación climatófilas en Canarias. * Para abreviar, se ha utilizado una denominación general fisionómico-florística para las series de vegetación.

Piso bioclimático	Serie climatófila*
1 Inframediterráneo hiperárido	Tabaibal dulce
2 Inframediterráneo árido	Tabaibal dulce
3 Inframediterráneo semiárido-inferior	Cardonal
4 Inframediterráneo semiárido-superior	Bosque termoesclerófilo (sabinar, acebuchal o almacigal)
5 Inframediterráneo seco (sin nieblas del alisio)	Bosque termoesclerófilo (sabinar, acebuchal o almacigal)
6 Inframediterráneo seco (con nieblas del alisio)	Monteverde seco
7 Inframediterráneo subhúmedo (con nieblas del alisio)	Monteverde húmedo
8 Termomediterráneo semiárido-inferior	Bosque termoesclerófilo (sabinar, acebuchal o almacigal)
9 Termomediterráneo semiárido-superior (sin nieblas del alisio)	Bosque termoesclerófilo (sabinar, acebuchal o almacigal)
10 Termomediterráneo semiárido-superior (con nieblas del alisio)	Monteverde seco
11 Termomediterráneo seco (con nieblas del alisio)	Monteverde seco
12 Termomediterráneo seco-inferior (sin nieblas del alisio)	Bosque termoesclerófilo (sabinar, acebuchal o almacigal)
13 Termomediterráneo seco-superior (sin nieblas del alisio)	Pinar
14 Termomediterráneo subhúmedo (con nieblas del alisio)	Monteverde húmedo
15 Termomediterráneo subhúmedo (sin nieblas del alisio)	Pinar
16 Termomediterráneo húmedo (con nieblas del alisio)	Monteverde húmedo
17 Termomediterráneo húmedo (sin nieblas del alisio)	Pinar
18 Mesomediterráneo semiárido-superior (sin nieblas del alisio)	Bosque termoesclerófilo (sabinar, acebuchal o almacigal)
19 Mesomediterráneo-inferior seco (con nieblas del alisio)	Monteverde seco
20 Mesomediterráneo-inferior seco (sin nieblas del alisio)	Pinar
21 Mesomediterráneo-inferior subhúmedo (con nieblas del alisio)	Monteverde húmedo
22 Mesomediterráneo-inferior subhúmedo (con nieblas del alisio; pero sin ellas en verano; $lc > 12$)	Fayal de altitud
23 Mesomediterráneo-inferior subhúmedo (sin nieblas del alisio)	Pinar
24 Mesomediterráneo-inferior húmedo (con nieblas del alisio)	Monteverde húmedo
25 Mesomediterráneo-inferior húmedo (sin nieblas del alisio)	Pinar (P, C)
26 Mesomediterráneo-superior seco (sin nieblas del alisio)	Pinar
27 Mesomediterráneo-superior subhúmedo (sin nieblas del alisio)	Pinar
28 Mesomediterráneo-superior húmedo (sin nieblas del alisio)	Pinar
29 Supramediterráneo seco	Retamar o retamar codesar de cumbre
30 Supramediterráneo subhúmedo	Retamar o retamar codesar de cumbre
31 Supramediterráneo húmedo	Retamar o retamar codesar de cumbre
32 Oromediterráneo seco	Retamar o retamar codesar de cumbre

Tabla 4. Previsiones de cambios de la temperatura media (T), temperatura media de las máximas (Mx), temperatura media de las mínimas (Mn) y precipitaciones (P) para los escenarios B2 y A2.

	B2T01	B2T02	B2T03	B2T04	B2T05	B2T06
Tenerife	1,65	1,76	1,48	1,55	2,01	1,95
Gran Canaria	1,79	1,98	1,38	1,52	2,33	2,18
Fuerteventura	1,57	1,65	1,34	1,42	1,99	1,83
Lanzarote	1,54	1,62	1,29	1,39	1,98	1,80
	A2T01	A2T02	A2T03	A2T04	A2T05	A2T06
Tenerife	2,63	2,68	2,64	2,41	2,93	2,86
Gran Canaria	2,75	2,97	2,87	2,34	3,17	2,91
Fuerteventura	2,40	2,50	2,46	2,23	2,81	2,56
Lanzarote	2,34	2,46	2,43	2,21	2,81	2,54
	B2Mx01	B2Mx02	B2Mx03	B2Mx04	B2Mx05	B2Mx06
Tenerife	1,65	1,75	1,47	1,53	1,99	1,94
Gran Canaria	1,86	2,07	1,30	1,51	2,54	2,37
Fuerteventura	1,56	1,62	1,34	1,40	1,99	1,80
Lanzarote	1,53	1,58	1,29	1,36	1,99	1,77
	A2Mx01	A2Mx02	A2Mx03	A2Mx04	A2Mx05	A2Mx06
Tenerife	2,62	2,70	2,64	2,37	2,91	2,84
Gran Canaria	2,81	3,21	3,07	2,30	3,38	3,07
Fuerteventura	2,36	2,49	2,48	2,18	2,78	2,51
Lanzarote	2,31	2,45	2,44	2,17	2,79	2,49
	B2Mn01	B2Mn02	B2Mn03	B2Mn04	B2Mn05	B2Mn06
Tenerife	1,64	1,76	1,48	1,57	2,03	1,96
Gran Canaria	1,73	1,90	1,45	1,54	2,11	1,99
Fuerteventura	1,58	1,69	1,33	1,45	1,99	1,86
Lanzarote	1,54	1,65	1,28	1,42	1,98	1,83
	A2Mn01	A2Mn02	A2Mn03	A2Mn04	A2Mn05	A2Mn06
Tenerife	2,63	2,66	2,63	2,44	2,96	2,87
Gran Canaria	2,69	2,74	2,67	2,38	2,97	2,74
Fuerteventura	2,43	2,52	2,44	2,27	2,83	2,60
Lanzarote	2,37	2,47	2,41	2,25	2,84	2,58
	B2P01	B2P02	B2P03	B2P04	B2P05	B2P06
Tenerife	-0,60	-5,30	2,60	-0,80	-2,00	-0,10
Gran Canaria	0,90	-2,55	0,30	-0,90	-2,10	-1,65
Fuerteventura	0,10	-2,40	1,20	-0,40	-2,20	-1,10
Lanzarote	-0,50	-2,70	0,90	-1,00	-2,30	-0,90
	A2P01	A2P02	A2P03	A2P04	A2P05	A2P06
Tenerife	-1,00	-5,20	-0,10	1,20	0,90	-0,70
Gran Canaria	-0,90	-3,60	-3,15	0,90	-0,45	-1,20
Fuerteventura	-1,20	-4,30	-1,80	0,10	-0,30	-0,80
Lanzarote	-2,00	-5,20	-2,30	-0,40	-0,40	-0,40

Tabla 4. Continuación.

	B2T07	B2T08	B2T09	B2T10	B2T11	B2T12	Δ Anual
Tenerife	2,12	1,79	1,59	1,52	1,50	1,66	1,72
Gran Canaria	2,52	1,86	1,52	1,40	1,48	1,80	1,81
Fuerteventura	1,94	1,48	1,34	1,30	1,32	1,54	1,56
Lanzarote	1,87	1,43	1,31	1,29	1,31	1,49	1,53
	A2T07	A2T08	A2T09	A2T10	A2T11	A2T12	
Tenerife	3,01	2,66	2,29	2,45	2,51	2,69	2,65
Gran Canaria	3,14	2,57	2,08	2,37	2,55	2,80	2,71
Fuerteventura	2,64	2,20	1,88	2,15	2,28	2,44	2,38
Lanzarote	2,55	2,10	1,79	2,12	2,22	2,38	2,33
	B2Mx07	B2Mx08	B2Mx09	B2Mx10	B2Mx11	B2Mx12	
Tenerife	2,11	1,78	1,58	1,50	1,48	1,66	1,70
Gran Canaria	2,86	2,04	1,55	1,33	1,44	1,82	1,89
Fuerteventura	1,93	1,46	1,31	1,29	1,33	1,52	1,55
Lanzarote	1,87	1,41	1,28	1,29	1,32	1,49	1,52
	A2Mx07	A2Mx08	A2Mx09	A2Mx10	A2Mx11	A2Mx12	
Tenerife	2,99	2,63	2,25	2,43	2,50	2,69	2,63
Gran Canaria	3,35	2,69	2,07	2,38	2,56	2,88	2,81
Fuerteventura	2,64	2,16	1,82	2,15	2,27	2,41	2,35
Lanzarote	2,55	2,05	1,74	2,12	2,23	2,35	2,31
	B2Mn07	B2Mn08	B2Mn09	B2Mn10	B2Mn11	B2Mn12	
Tenerife	2,12	1,79	1,59	1,54	1,52	1,65	1,72
Gran Canaria	2,18	1,68	1,49	1,48	1,52	1,78	1,74
Fuerteventura	1,94	1,49	1,37	1,30	1,32	1,55	1,57
Lanzarote	1,88	1,44	1,33	1,28	1,30	1,49	1,54
	A2Mn07	A2Mn08	A2Mn09	A2Mn10	A2Mn11	A2Mn12	
Tenerife	3,03	2,68	2,32	2,47	2,52	2,70	2,66
Gran Canaria	2,93	2,44	2,08	2,37	2,54	2,73	2,61
Fuerteventura	2,64	2,24	1,93	2,15	2,28	2,48	2,40
Lanzarote	2,56	2,14	1,84	2,11	2,22	2,41	2,35
	B2P07	B2P08	B2P09	B2P10	B2P11	B2P12	
Tenerife	-6,20	-1,20	-0,40	0,30	2,50	5,40	-5,80
Gran Canaria	-7,50	-2,55	-0,15	3,45	1,95	2,55	-8,25
Fuerteventura	-5,90	-1,20	-1,40	3,80	1,60	0,40	-7,50
Lanzarote	-5,10	-0,90	-1,70	3,90	0,70	1,10	-8,50
	A2P07	A2P08	A2P09	A2P10	A2P11	A2P12	
Tenerife	-4,40	-2,70	-2,70	-0,90	3,20	-0,90	-13,30
Gran Canaria	-4,50	-3,60	-3,60	0,75	3,30	-1,50	-17,55
Fuerteventura	-3,20	-2,40	-1,30	2,90	3,40	-3,30	-12,20
Lanzarote	-2,70	-1,90	-0,90	2,80	4,40	-2,50	-11,50

Tabla 5. Variaciones límite de temperatura media anual (T), temperatura media anual de las máximas (Mx), temperatura media anual de las mínimas (Mn) y precipitación media anual (P) estimadas para Canarias.

Variaciones límite			
Parámetro	Escenario	Valor (isla)	
T (°C)	B2	1,53 (L)	1,81 (C)
	A2	2,33 (L)	2,71 (C)
Mx (°C)	B2	1,52 (L)	1,89 (C)
	A2	2,31 (L)	2,81 (C)
Mn (°C)	B2	1,54 (L)	1,74 (C)
	A2	2,35 (L)	2,66 (T)
P (mm)	B2	-5,80 (T)	-8,50 (L)
	A2	-11,50 (L)	-17,55 (C)

Tabla 6. Variaciones de la temperatura positiva (Tp), del índice ombrotérmico (Io) y otros datos para su obtención, en algunas estaciones termopluviométricas de las islas consideradas.

Estación	Altitud	Escenario	Pp	Tp	Δ Pp	Δ Tp	Io	Δ Io
TENERIFE								
Puerto Cruz-Paz-Botánico	120 m	Actual	352,7	2.304			1,50	
		B2			-5,8	205,2	1,38	-0,12
		A2			-13,3	316,8	1,29	-0,20
Realejos. Icod Alto	2.198,16 ft	Actual	565,3	1.836			3,10	
		B2			-5,8	205,2	2,74	-0,36
		A2			-13,3	316,8	2,56	-0,54
Realejos. Piedra Pastores	1.610 m	Actual	562,4	1.392			4,00	
		B2			-5,8	205,2	3,48	-0,52
		A2			-13,3	316,8	3,21	-0,79
El Portillo	2.050 m	Actual	335,8	1.272			2,60	
		B2			-5,8	205,2	2,23	-0,37
		A2			-13,3	316,8	2,03	-0,57
Izaña	2.371 m	Actual	460,4	1.152			4,00	
		B2			-5,8	205,2	3,35	-0,65
		A2			-13,3	316,8	3,04	-0,95
Granadilla. Médano-Confital	25 m	Actual	73,4	2.328			0,32	
		B2			-5,8	205,2	0,26	-0,06
		A2			-13,3	316,8	0,23	-0,09
Granadilla	690 m	Actual	246,3	2.016			1,20	
		B2			-5,8	205,2	1,08	-0,12
		A2			-13,3	316,8	1,00	-0,20
Reina Sofía. Aeropuerto Tfe. Sur	64 m	Actual	114,1	2.556			0,45	
		B2			-5,8	205,2	0,39	-0,06
		A2			-13,3	316,8	0,35	-0,1
Vilaflor	1.378 m	Actual	401,6	1.800			2,23	
		B2			-5,8	205,2	1,97	-0,26
		A2			-13,3	316,8	1,83	-0,40

Tabla 6. Continuación.

Estación	Altitud	Escenario	Pp	Tp	Δ Pp	Δ Tp	lo	Δ lo
GRAN CANARIA								
Las Palmas	6 m	Actual	145,0	2.520			0,58	
		B2			-8,3	217,2	0,50	-0,08
		A2			-17,6	325,2	0,45	-0,13
Santa Brígida	390 m	Actual	391,5	2.304			1,70	
		B2			-8,3	217,2	1,52	-0,18
		A2			-17,6	325,2	1,42	-0,28
Tejeda. P.Pajonales	1.190 m	Actual	455,1	1.968			2,31	
		B2			-8,3	217,2	2,04	-0,27
		A2			-17,6	325,2	1,91	-0,40
FUERTEVENTURA								
Pto. Rosario-Aerop.	29 m	Actual	109,2	2.424			0,45	
		B2			-7,5	187,2	0,39	-0,06
		A2			-12,2	285,6	0,36	-0,09
Pto. Rosario-Los	228 m	Actual	159,4	2.268			0,70	
		B2			-7,5	187,2	0,62	-0,08
		A2			-12,2	285,6	0,58	-0,13
Betancuria	380 m	Actual	245,6	2.148			1,14	
		B2			-7,5	187,2	1,02	-0,12
		A2			-12,2	285,6	0,96	-0,18
LANZAROTE								
Yaiza	6/13 m	Actual	95,7	2.520			0,38	
		B2			-8,5	184,8	0,32	-0,06
		A2			-11,5	279,6	0,30	-0,08
Haría	335/390 m	Actual	210,5	2.160			0,97	
		B2			-8,5	184,8	0,86	-0,11
		A2			-11,5	279,6	0,82	-0,16

Tabla 7. Incrementos estimados de T, M, m, ltc, Tp y P.

		ΔT	ΔM	Δm	Δltc	ΔTp	ΔP
Tenerife	B2	1,71	1,75	1,76	52,20	205,20	-5,80
	A2	2,64	2,70	2,66	80,00	316,80	-13,30
Gran Canaria	B2	1,81	2,07	1,90	57,80	217,20	-8,25
	A2	2,71	3,21	2,74	86,60	325,20	-17,55
Fuerteventura	B2	1,56	1,62	1,69	48,70	187,20	-7,50
	A2	2,38	2,49	2,52	73,90	285,60	-12,20
Lanzarote	B2	1,54	1,58	1,65	47,70	184,80	-8,50
	A2	2,33	2,45	2,47	72,50	279,60	-11,50

Tabla 8. Altitud actual y estimada, para los escenarios B2 y A2 del límite superior altitudinal medio de los termotipos en Tenerife.

Termotipo	Limite superior		Límite superior altitudinal medio (m)					
			Actual		B2(Δ ltc: 52,2; Δ Tp:205,2)		A2(Δ ltc: 80; Δ Tp: 316,8)	
	ltc	Tp	N	S	N	S	N	S
Inframediterráneo	>450	-	340	500	637	865	790	1.060
Termomediterráneo	350	-	950	1.200	1.310	1.573	1.529	1.771
Mesomediterráneo	210	-	2.000	2.200	2.361	2.561	2.554	2.754
Supramediterráneo	80	815*	2.900	3.100	3.282	3.460	3.450	3.650
Oromediterráneo		450	3.580	>3.718	>3.718	>3.718	>3.718	>3.718

* Valor de Tp en el que se localiza el ltc 80, según datos de las estaciones de referencia Realejos C.V. (2.050 m) y Cañadas-Pico Teide (3.530 m).

Tabla 9. Altitud actual y estimada, para los escenarios B2 y A2 del límite superior altitudinal medio de los ombrotipos en Tenerife.

Ombrotipo	Limite superior	Límite superior altitudinal medio (m)					
		Actual		B2*		A2*	
	lo	N	S	N	S	N	S
Hiperárido	0,3	-	20		40		50
Árido	0,9	-	440		530		590
Semiárido inferior	1,45	100	860	150	980	190	1.060
Semiarido superior	2	290	1.220	370	1.400	430	1.520
Seco	3	640	-	775	-	860	-
Subhúmedo	5,5	1.920	-	1.780	-	1.688	-

* Δ lo considerado por tramos según los datos de las estaciones de referencia y las estimaciones para los escenarios B2 y A2 señalados en la Tabla 6.

5. Influencia del calentamiento global sobre la biodiversidad marina de las islas Canarias

Alberto Brito

Departamento de Biología Animal, Universidad de La Laguna
email: abrito@ull.es

Los posibles efectos del cambio climático derivado del calentamiento global sobre los ecosistemas marinos han sido objeto de amplia discusión científica en los últimos años. Aunque todavía no se tienen muchos conocimientos relativos a algunos de los efectos previsibles que pueden ser más negativos, como por ejemplo la incidencia del incremento de la radiación ultravioleta en el plancton o de la disminución del pH del agua sobre los esqueletos de los organismos, sí existe ya un conocimiento amplio, basado en procesos bien conocidos originados en diferentes zonas de los mares, sobre el efecto de la primera manifestación de dicho fenómeno de cambio climático, es decir, el calentamiento del agua. Diversos trabajos han puesto de manifiesto que el incremento de la temperatura del mar en zonas subtropicales y templadas está influyendo sobre los organismos marinos de diferentes formas: 1) aparición de nuevas especies de origen meridional, procedentes por lo tanto de latitudes más cálidas; 2) incremento de las poblaciones de las especies nativas termófilas mediante reclutamientos muy exitosos o llegada de individuos foráneos; 3) desaparición o enrarecimiento de especies de origen septentrional, es decir, de afinidades más frías; y 4) cambios en la fenología de las especies (migraciones, épocas de reproducción, crecimiento, duración de la fase larvaria, etc.).

Muchos de estos cambios afectan más rápidamente a las especies de ciclo de vida corto y se sospecha que a la larga pueden modificar la estructura trófica de las comunidades y tener una incidencia importante en la actividad pesquera, particularmente si favorecen o perjudican a alguna

especie clave o estructurante, es decir, aquellas que constituyen la base estructural o soporte físico de la comunidad, o las que controlan el mantenimiento de la misma mediante interacciones predador-presa. No obstante, existe todavía incertidumbre en algunos aspectos y se plantean dudas respecto al grado de transformación que es debido a fenómenos locales de mucha fuerza, como la sobrepesca, y el correspondiente al cambio climático. Se piensa también que la acción sinérgica con otras variables antropogénicas, particularmente la presión pesquera y la contaminación, pueden estar exacerbando los efectos inducidos por el cambio climático. A este respecto, también es interesante destacar que se ha constatado que algunas especies exóticas (introducidas por la acción humana) pueden ser favorecidas y desarrollarse como invasoras bajo las nuevas condiciones ambientales.

En el Atlántico Oriental, la influencia del cambio climático sobre la biodiversidad marina y los recursos es relativamente bien conocida en las zonas templadas afectadas por las oscilaciones del Atlántico Norte (NAO) y también para otros sectores como el Mediterráneo. En estos trabajos se constata un desplazamiento gradual de las especies termófilas hacia el norte y se habla de meridionalización o tropicalización de la biota. Dicho incremento de especies inmigrantes y el desplazamiento hacia el norte de las poblaciones de especies nativas han sido significativamente correlacionados con el incremento de temperatura en los últimos 40 años en el Atlántico Norte (Stebbing *et al.*, 2002; Perry *et al.*, 2005). En el caso del Mediterráneo se ha detectado también una relación entre los cambios en la biota marina y el incremento de la temperatura (Dulcic & Grbec, 2000; Bianchi, 2007). A este respecto, conviene señalar que muchas de las especies registradas en épocas recientes en dichas latitudes tienen población estable en Canarias desde que se conoce la naturaleza de las Islas. Por el contrario, muy poco se sabe sobre la influencia del calentamiento sobre la biota en la parte subtropical del Atlántico Oriental, en el sector canario-sahariano, una zona importante por la presencia del afloramiento sahariano y un gran banco de pesca, donde se ha producido también un incremento de la temperatura. Sólo recientemente se ha puesto de manifiesto que la ictiofauna litoral de las islas Canarias ha experimentado un cierto grado de transformación, independiente de la relacionada con las actividades pesqueras, mostrando una clara tendencia a la tropicalización (Brito *et al.*, 2002 y 2005). Para el ámbito insular se dispone también de conocimientos descriptivos y datos no publicados relativos a procesos que afectan a distintos componentes de la biodiversidad marina canaria, igualmente interesantes y reveladores de un proceso de cambio en el mismo sentido.

Nuestro objetivo en el presente trabajo es revisar el estado de conocimientos relativos a la influencia del cambio climático en la biodiversidad marina de Canarias, analizar procesos en los que existe una

sinergia clara o esperable con factores locales, delimitar el escenario previsible futuro en el marco de un proceso de incremento progresivo de la temperatura, plantear la necesidad de un programa de investigación que permita conocer mejor los efectos debidos al cambio climático y diferenciarlos de los relacionados con procesos de mucha fuerza de escala local o regional y, por último, abordar posibles medidas de ordenación para minimizar dichos efectos.

La temperatura del mar en Canarias: cambios recientes en un escenario muy particular

Las islas Canarias se encuentran en la zona de transición entre las aguas frías del afloramiento costero sahariano y las oceánicas más cálidas situadas al oeste, lo cual, junto a su disposición alineada en sentido este-oeste, permite la existencia de un marcado gradiente térmico entre las islas orientales y las occidentales. La otra característica de la temperatura de las aguas es el limitado rango de variación invierno-verano, en comparación con otras zonas templadas y subtropicales próximas, oscilando normalmente sus valores extremos actuales entre los 17.5° y 25° C.

La tendencia actual en casi todos los mares, en relación con el cambio climático, es el incremento de la temperatura media superficial. Un estudio de los datos disponibles para las islas Canarias (Fig. 1) muestra una fase de

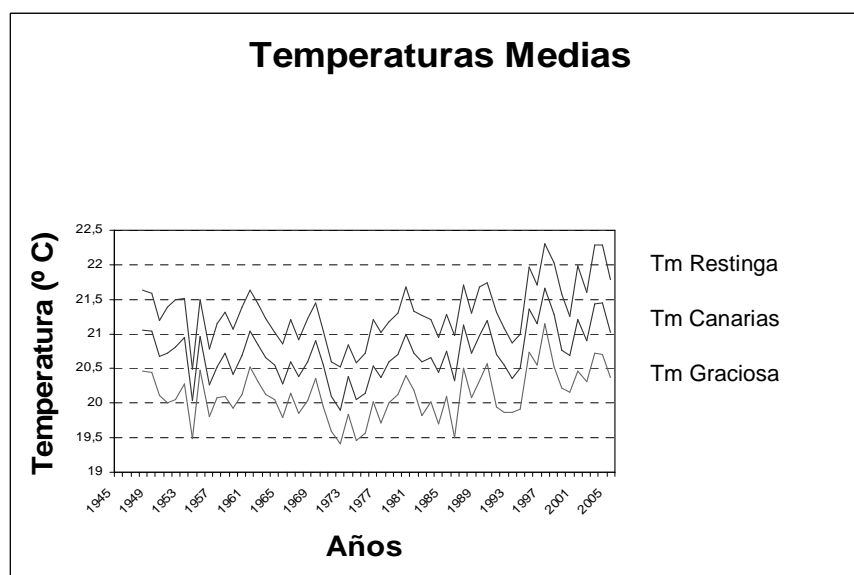


Fig. 1. Evolución de la temperatura superficial del mar canario en el periodo 1948 a 2006, diferenciando entre los sectores más frío (curva inferior) y más cálido (curva superior). Fuente: reanálisis de la NOAA (Kalnay *et al.*, 1996).

progresivo aumento en las últimas décadas (media de 21.11 °C), después de un periodo anterior más frío (en la década de los setenta la media fue de 20.33 °C), con el máximo valor en 1997 (21.66 °C) y una serie de años también muy cálidos posteriores como 2003 y 2004. La tendencia es clara al aumento, si bien el proceso no es uniforme y se producen ciertas alternancias de años más fríos y cálidos y también fenómenos esporádicos de intenso calentamiento en verano, como el ocurrido en 2004, cuando se registraron las temperaturas superficiales más altas conocidas en las islas, llegándose a los 27°-28° C; durante un periodo largo de julio-agosto se retiró el alisio, disminuyó el afloramiento sahariano y se calentó notablemente el agua, de forma que nos alcanzó el frente térmico tropical.

Efectos sobre la biodiversidad

La biodiversidad marina canaria se ha visto sin duda afectada por el cambio climático, aunque sin llegar a los niveles observados en latitudes más altas. El incremento de la temperatura ha tenido una clara influencia sobre la biota, principalmente con la aparición de nuevas especies termófilas, el incremento poblacional de las especies nativas de origen tropical, el enrarecimiento en las islas occidentales de las especies nativas de origen templado más exigentes y, lo más preocupante, la degradación de las comunidades algales cuya organización estructural está basada en especies de origen templado o propias del ámbito macaronésico. No obstante, algunos efectos parecen estar influidos por la sinergia con fuerzas transformadoras que tienen una escala regional o local (sobrepesca, contaminación, etc.), y no es fácil establecer su causalidad con precisión. La falta de series de datos largas dificulta la interpretación, téngase en cuenta que los estudios con cierta profundidad y continuidad de la mayoría de los componentes del ecosistema marino canario no se iniciaron hasta bien avanzada la década de 1970, o principios de los ochenta, y se centraron inicialmente casi con exclusividad en la composición de la biota, siendo bastante posteriores los enfoques cuantitativos.

La tendencia a la tropicalización de la fauna: un fenómeno esperable

Se trata de un proceso de incremento de la biodiversidad de origen tropical sin pérdida hasta ahora de especies de origen templado a nivel archipelágico. La gran mayoría de las especies nuevas parecen haber llegado por medios propios, en relación con el calentamiento de las aguas, dado que presentan poblaciones en áreas tropicales próximas y tienen capacidad de desplazamiento (especies muy nadadoras o con larvas pelágicas grandes comedoras de plancton) (Brito *et al.*, 2005). No obstante,

en algunos casos está claro que su aparición guarda relación con el transporte inducido por las actividades humanas, principalmente en las aguas de lastre de los buques mercantes, caso por ejemplo del pez mariposa *Chaetodon sanctaehelenae*, una especie endémica de las islas de Sta. Helena y Ascensión registrada en repetidas ocasiones (sólo uno o dos individuos cada vez) desde 1993 (Brito & Falcón, 1996) en el entorno del puerto de Santa Cruz de Tenerife.

Los peces óseos ha sido el grupo que más aportaciones nuevas ha tenido, pues desde 1991 hasta la actualidad han aparecido una treintena de especies litorales nuevas (Brito *et al.*, 2005; Brito & Falcón, 2006) (Fig. 2), todas termófilas. La gran mayoría sólo se conocen por el registro de uno o algunos ejemplares esporádicos, pero varias han conseguido crear poblaciones estables importantes, destacando el gallo aplomado (*Canthidermis sufflamen*) y el caboso tropical (*Gnatholepis thomsoni*). El gallo se registró por primera vez en El Hierro en 1994 (Brito *et al.*, 1995) y al año siguiente ya se reproducía con éxito, constituyendo actualmente un importante recurso en las islas occidentales; una función adicional de esta especie es que depreda sobre el erizo *Diadema* aff. *antillarum*, como ha demostrado recientemente Clemente (2008), cuya población constituye en la actualidad una verdadera plaga.

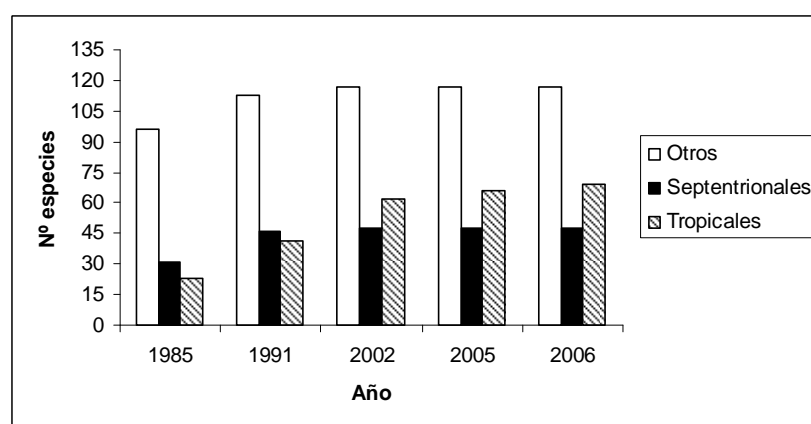


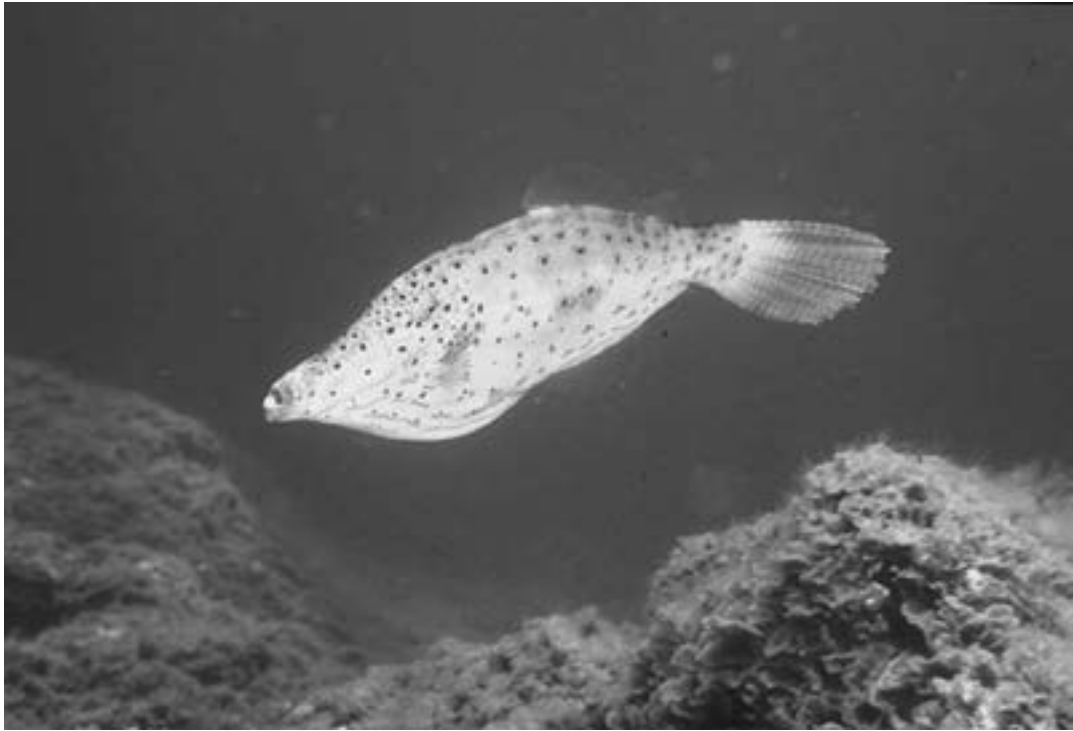
Fig. 2. Incremento del número de especies de peces óseos litorales de Canarias, organizados por amplios grupos de distribución, en los diferentes catálogos publicados; se observa como a partir de 1991 –cuando se considera que este componente de la ictiofauna es ya bien conocido– sólo crece el grupo de las de origen tropical.

Además, muchas especies nativas de origen tropical también han experimentado un crecimiento poblacional bajo las nuevas circunstancias climáticas, caso por ejemplo de la vieja (*Sparisoma cretense*), la catalufa (*Heteropriacanthus cruentatus*), el gallo azul (*Aluterus scriptus*) o el pejetrompeta (*Aulostomus strigosus*), e incluso algunas de las más exigentes

con la temperatura han expandido su distribución hacia las islas más frías, las orientales. En el caso del peto (*Acanthocybium solandri*), una especie pelágica migratoria de distribución pantropical, el cambio consistió en que se reprodujo por primera vez en nuestras aguas (El Hierro) en 1997 y experimentó posteriormente una expansión hacia las islas orientales, apareciendo incluso en La Graciosa, donde no era conocido antes del inicio del calentamiento. Por otra parte, las especies de origen templado han experimentado un retroceso poblacional, especialmente en las Canarias occidentales, como ocurre por ejemplo con el carajillo real (*Coris julis*), la corvina negra (*Sciaena umbra*) y el romero capitán (*Labrus bergylta*), y algunas se han enrarecido mucho e incluso han llegado a desaparecer de las islas más cálidas. No obstante, en el caso de las dos últimas especies y otras con interés pesquero, el efecto de la sobrepesca juega un papel importante.



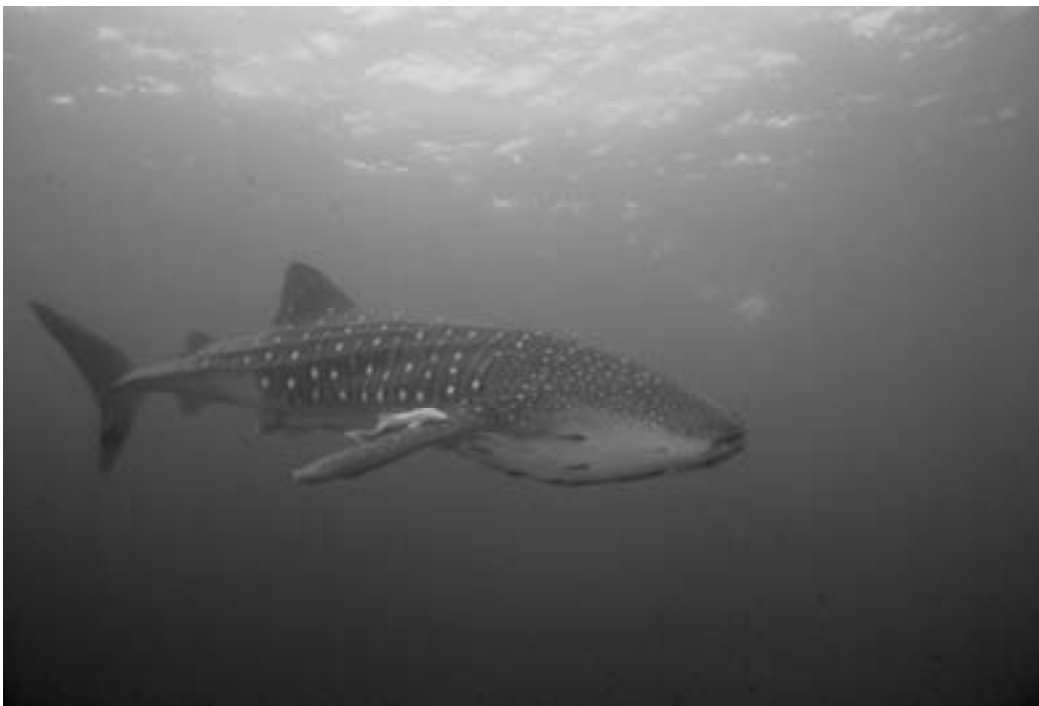
Chaetodon sanctaehelenae (arriba izquierda); gallo aplomado (*Canthidermis sufflamen*) durmiendo, momento en que los erizos salen de los agujeros a comer (arriba derecha); caboso tropical (*Gnatholepis thompsoni*) (abajo).



Gallo azul (*Aluterus scriptus*)

Los invertebrados se han visto igualmente afectados por los mismos procesos y con los mismos patrones, algunos han aparecido de nuevo y otros han visto acrecentadas o disminuidas sus poblaciones, aunque el conocimiento sobre el tema en muchos casos es más intuitivo que científico. Destaca la presencia del molusco *Micromelo undata*, una especie de distribución pantropical no conocida antes de la década de los noventa y que actualmente es frecuente en los charcos intermareales, al menos en el caso de Tenerife. Una especie nativa muy favorecida es el erizo *Diadema* aff. *antillarum*, del que trataremos con más detalle en el próximo apartado por su especial incidencia en la transformación de los ecosistemas costeros. En lado opuesto estaría, por ejemplo, la estrella *Marthasterias glacialis*, una especie de origen templado que se ha enrarecido notablemente en las islas, especialmente en las occidentales, al igual que ocurre con otras de límite sur de distribución en nuestras islas. En el caso de las lapas, que tienen distribución macaronésica con límite sur en Canarias, y otras especies explotadas la interpretación es más compleja debido al poder de las fuerzas transformadoras locales.

Entre los condricios, la presencia del tiburón ballena (*Rhincodon typus*) es también una de las novedades relacionadas con el calentamiento del agua (Brito *et al.*, 2005) y probablemente ocurre igual con la manta *Mobula tarapacana*, aunque las posibles confusiones taxonómicas con otras



Micromelo undata (arriba) y tiburón ballena (*Rhincodon typus*), abajo.

especies no permiten confirmarlo. El tiburón ballena se registró por primera vez en Canarias en 1993 (Brito *et al.*, 2005) y desde entonces se observa con cierta frecuencia, particularmente en las islas occidentales; migra desde el trópico hasta alcanzar nuestra latitud desde comienzos del verano. Se podría pensar que el efecto contrario lo representan el pez sierra (*Pristis*

pristis) y la pintaroja (*Scyliorhinus canicula*), que estaban presentes en las islas orientales, e incluso la última en las centrales, y de las que no se conocen registros desde la década de 1970; no obstante, su desaparición parece más bien relacionada con la sobrepesca, con el intenso uso del trasmallo antes de la regulación.

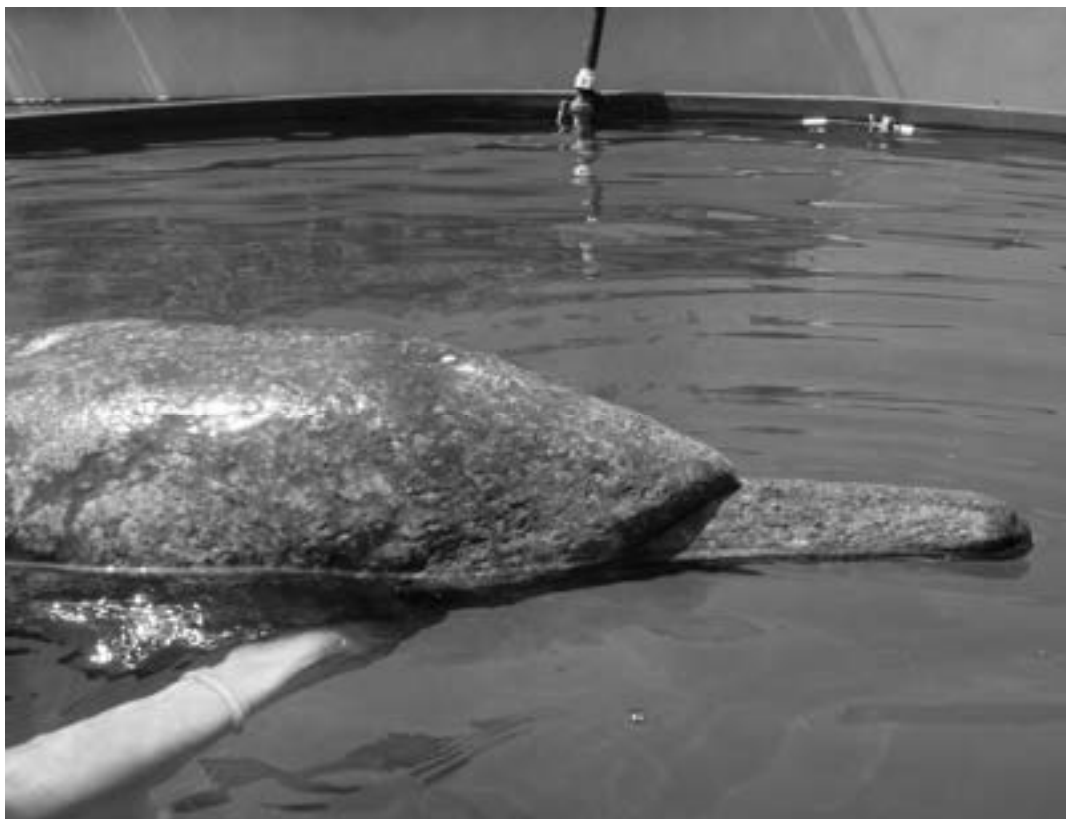
En cuanto a los vertebrados tetrápodos, cabe señalar que durante el episodio brusco de calentamiento del año 2004 aparecieron por primera vez en nuestras aguas una tortuga y un cetáceo tropical, en concreto la tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*) y el delfín tornillo o de hocico largo (*Stenella longirostris*), si bien no han vuelto a registrarse desde entonces. Probablemente el tamaño de las poblaciones de las especies residentes puede haberse visto afectado en un sentido u otro según el origen de cada una, pero no disponemos de datos precisos al respecto.



Tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*)

La degradación de las comunidades de algas fotófilas: la fuerza de la sinergia

Las algas se han visto afectadas por el mismo proceso de tropicalización descrito para la fauna, encontrándose entre las especies nativas más favorecidas algunas de características termófilas que forman la base de comunidades extensas, como las del género *Caulerpa* y *Lobophora variegata*, aunque los datos cuantitativos precisos no son bien conocidos.



Delfin tornillo (*Stenella longirostris*)

Sin embargo, el efecto más destacable tiene connotaciones negativas graves, pues se trata de la regresión experimentada en muchas zonas por las praderas dominantes en los fondos rocosos expuestos y semiexpuestos, en concreto las de *Cystoseira abies-marina* en el conjunto del archipiélago, particularmente en las islas occidentales, y también las de *Cystoseira mauritanica* que están limitadas a las islas más orientales. Estas especies crean extensas formaciones, que constituyen un paisaje submarino característico, cuyos cambios son fáciles de observar, aunque su cuantificación precisa no sea conocida. Ambas son de origen templado, la primera se distribuye básicamente por las islas macaronésicas y la segunda por la costa continental próxima, y cabe pensar que las importantes regresiones observadas, al menos en las zonas más someras, se deben al incremento de temperaturas. La falta de seguridad absoluta en las causas del proceso de degradación guarda relación con la sinergia que existe, al menos en parte, con fuerzas transformadoras locales de mucho peso, como la plaga de *Diadema* aff. *antillarum* a nivel general y la contaminación a nivel más local. Por otra parte, actualmente sabemos que el desarrollo de estos herbívoros está relacionado directamente con la sobrepesca de sus depredadores y con el propio calentamiento del agua (Clemente, 2008; Hernández, 2006).

Diadema aff. *antillarum* es un erizo de origen tropical distribuido por el Atlántico Oriental, entre Madeira y el Golfo de Guinea incluyendo las islas de Cabo Verde. Se trata de un herbívoro muy poderoso y de alta movilidad capaz de eliminar la vegetación de los fondos rocosos, salvo en las cotas someras de las zonas batidas, y vivir en altas densidades alimentándose de las yemas y otros propágulos que intentan continuamente desarrollarse sobre el sustrato. Los fondos rocosos de Canarias están muy afectados por este animal en su mayor parte, llegando hasta cotas de unos 50 m de profundidad, de forma que las comunidades algales han sido sustituidas en gran medida por una formación muy pobre en biodiversidad y producción, conocida como blanquizal. La densidad de erizos ha aumentado en los últimos años de una manera notable (Hernández *et al.*, 2008) (Fig. 3), incluso en una de las reservas marinas, y la causa se ha demostrado que reside en la conjunción de dos factores principales: la sobrepesca de los depredadores en casi todas las islas, especialmente en las centrales y orientales donde los depredadores específicos son además menos abundantes o están ausentes (Clemente, 2008), y el calentamiento del agua, que favorece su éxito reproductivo, ya que la supervivencia de las larvas aumenta exponencialmente en los años con veranos de temperaturas muy altas (Hernández, 2006).

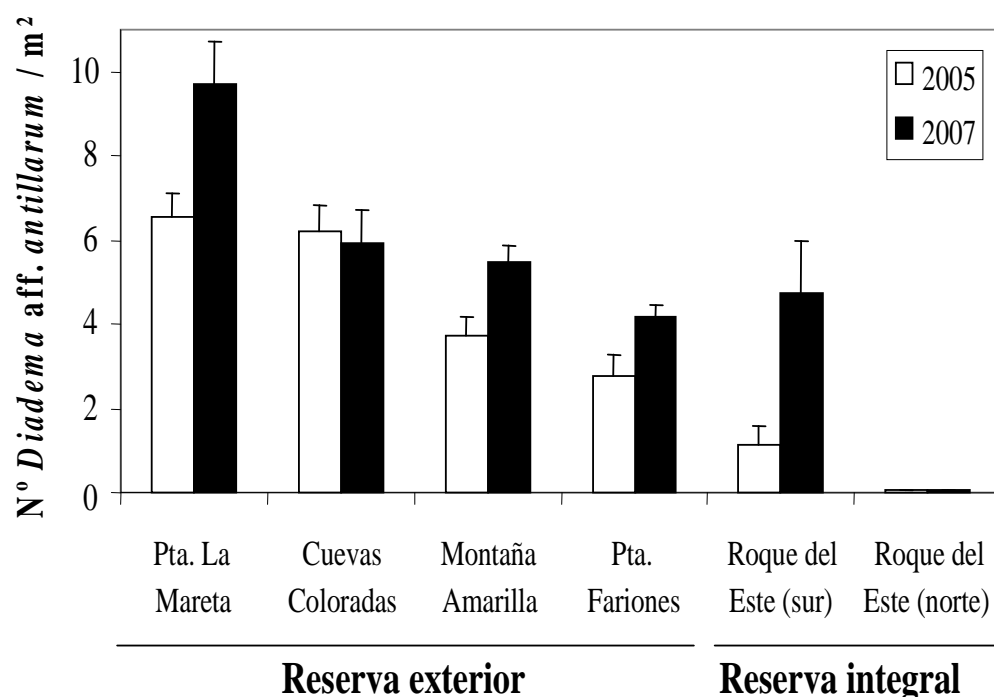
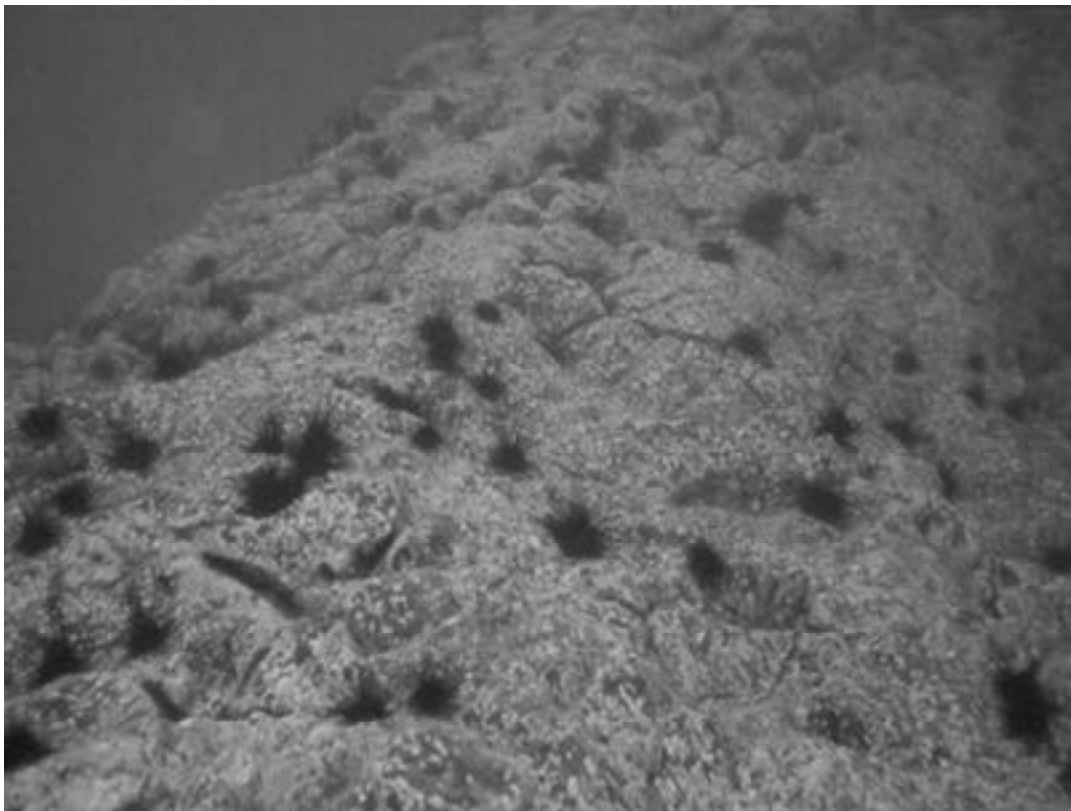


Fig. 3. Evolución de la densidad del erizo *Diadema* aff. *antillarum* en la reserva marina de La Graciosa y los islotes del norte de Lanzarote entre 2005 y 2007; se observan incrementos considerables, alcanzándose valores altos incluso en una de las localidades de la reserva integral.



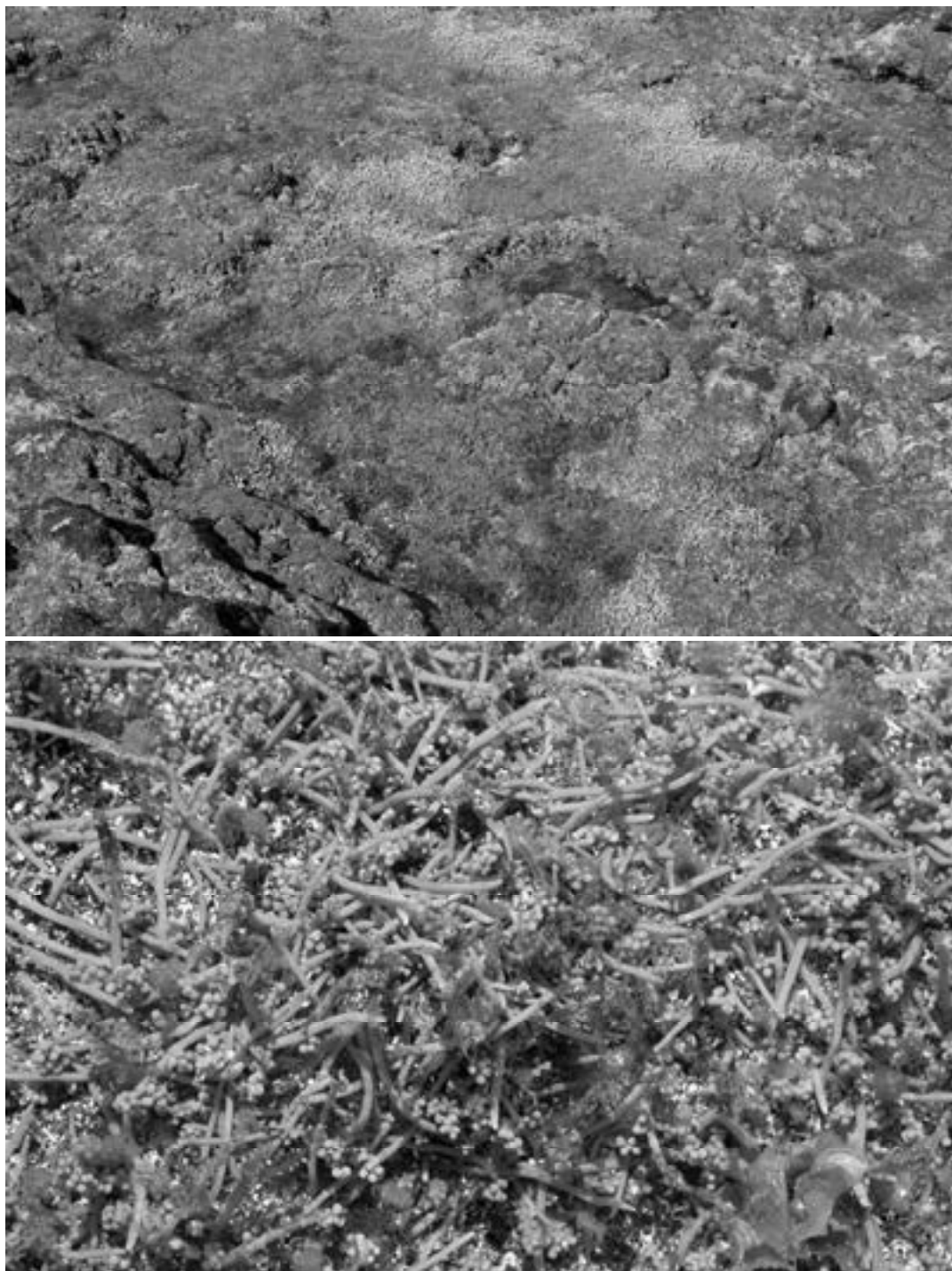
Comunidad de *Cystoseira abies marina*



Blanquizal generado por el erizo *Diadema* aff. *antillarum*

La amenaza de las especies exóticas invasoras

Uno de los riesgos que conlleva el cambio climático es la situación favorable para el desarrollo de especies exóticas invasoras de origen tropical. Este es el caso de la variedad agresiva (var. *cylindracea*) del alga verde *Caulerpa racemosa*, que ya está presente en los fondos costeros



Caulerpa racemosa ocupando un charco con fondo de arena y roca (arriba); detalle de la población (abajo).

arenosos de Canarias (Verlaque *et al.*, 2004) y en franca expansión. Se trata de una forma de origen australiano, que se ha introducido en varias zonas subtropicales con las aguas de lastre o el fouling adherido al casco de los barcos, capaz de experimentar explosiones que pueden llegar a recubrir y asfixiar a las formaciones de fenerógamas, como está ocurriendo en el Mediterráneo. En nuestro caso pueden llegar a ser afectados los sebadales de *Cymodocea nodosa* y la comunidad de *Halophila decipiens* y es preciso mantener un control para prevenirlo.

Fitoplancton y toxinas: ¿nuevos riesgos alimentarios?

En el verano de 2004 (julio-agosto) las aguas marinas canarias se calentaron hasta extremos nunca vistos, alcanzándose e incluso superándose los 27 °C en muchas zonas, en el curso de un evento climático muy particular que conllevó la retirada de los vientos alisios y la entrada de aire africano cálido cargado de polvo (calima). La coincidencia de las aguas calientes y la entrada de oligoelementos limitantes para la producción fitoplanctónica aportados por la calima, como es el hierro, produjo la aparición de grandes manchas a modo de suciedad en la superficie del agua, nunca vistas anteriormente, que resultaron estar formadas por una cianobacteria que utiliza el nitrógeno del aire (Ramos *et al.*, 2005).

Es preciso tener en cuenta que algunos organismos de este tipo, así como otros componentes del plancton (dinoflagelados) cuya presencia parece actualmente posible por las temperaturas –al parecer algunos ya se han detectado–, son productores de toxinas bioacumulativas que se concentran a lo largo de las cadenas tróficas. En este sentido, conviene señalar que recientemente se han producido varios casos de ciguatera en Canarias, uno de los cuales está bien documentado (Pérez-Arellano *et al.*, 2005), enfermedad frecuente en los trópicos por consumo de pescado, en concreto de peces grandes que han concentrado las toxinas durante mucho tiempo.

Efectos sobre los recursos pesqueros y la pesca

Algunas de las especies tropicales establecidas en tiempos recientes constituyen actualmente recursos pesqueros de importancia en las islas occidentales, principalmente el gallo aplomado (*Canthidermis suflamen*) y la llamada comercialmente caballa-chicharro (*Decapterus macarellus*). El primero se captura sobre todo en El Hierro, donde soporta una importante pesquería de gallos que a principios de la década de 1990 se limitaba a las esporádicas y escasas capturas de *Balistes carolinensis* (Fig. 4). La presencia de la caballa-chicharro se registró por primera vez en 1994 (Brito *et al.*, 2005) y ha empezado a capturarse en grandes cantidades a partir de

2006, convirtiéndose en una carnada importante para la pesca de túnidos en las islas más occidentales. No hemos podido constatar aún que se reproduzca en Canarias, pero en cualquier caso esta especie tiene una gran capacidad de desplazamiento y es abundante en las islas de Cabo Verde y el Golfo de Guinea. Por otra parte, las especies nativas termófilas (como la vieja, por ejemplo) han experimentado en el mismo periodo un incremento de sus poblaciones, debido a un mayor éxito reproductivo, e incluso algunas han expandido su rango de distribución hacia las islas orientales.

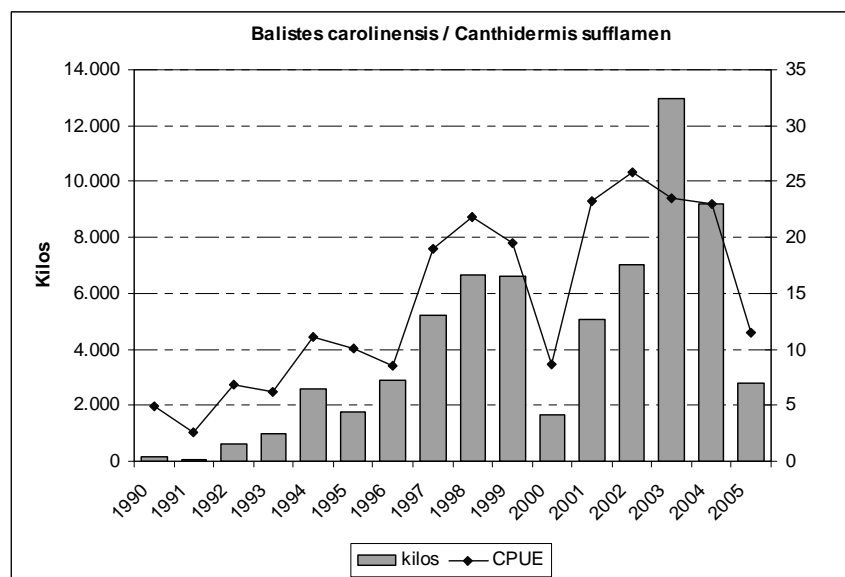


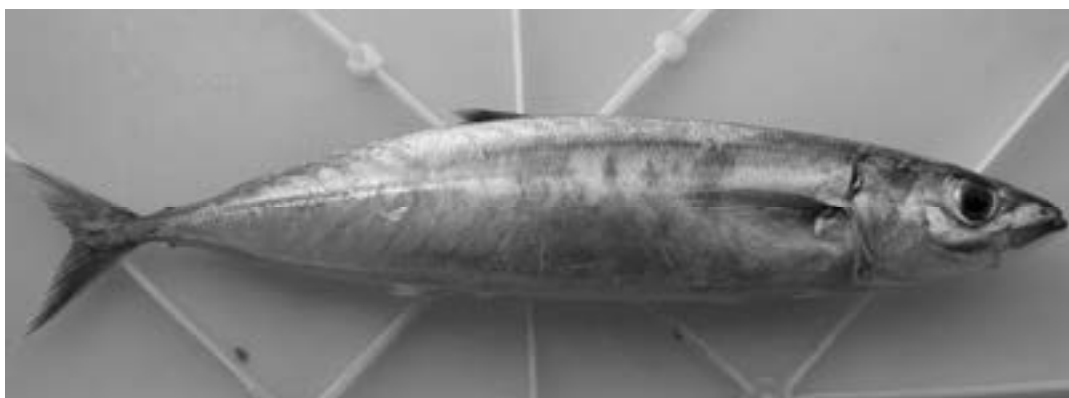
Fig. 4. Capturas de gallos, total y por unidad de esfuerzo pesquero, en El Hierro entre los años 1990 y 2005; se puede observar el notable incremento de este recurso desde la aparición en el ecosistema del Gallo aplomado (*Canthidermis sufflamen*) en 1994.

Entre los organismos pelágicos se ha observado un cierto grado de sustitución de la sardina de ley (*Sardina pilchardus*), de afinidad más templada, por la alacha (*Sardinella aurita*). También se detectó por primera vez en 1997 el desove del peto en Canarias (El Hierro), como ya comentamos anteriormente, a la vez que se expandió su población hacia las islas orientales, donde era poco conocido y hoy es objetivo importante de la pesca, sobre todo de la deportiva; sus capturas han aumentado en el conjunto del Archipiélago. Entre las especies litorales no es fácil detectar cambios en la pesquería de las de afinidad templada, pues no existen suficientes datos, pero ya vimos que algunas se habían enrarecido, sobre todo en las islas occidentales, aunque también se observa ese mismo efecto en las que tenían su presencia limitada a las islas orientales, como la sama guachinanga (*Dentex dentex*) o el berrugato manchado (*Umbrina rhonchus*). En

cualquier caso, no podemos diferenciar bien entre el efecto debido a la sobrepesca del relacionado con el cambio climático.



Gallo aplomado (*Canthidermis sufflamen*)

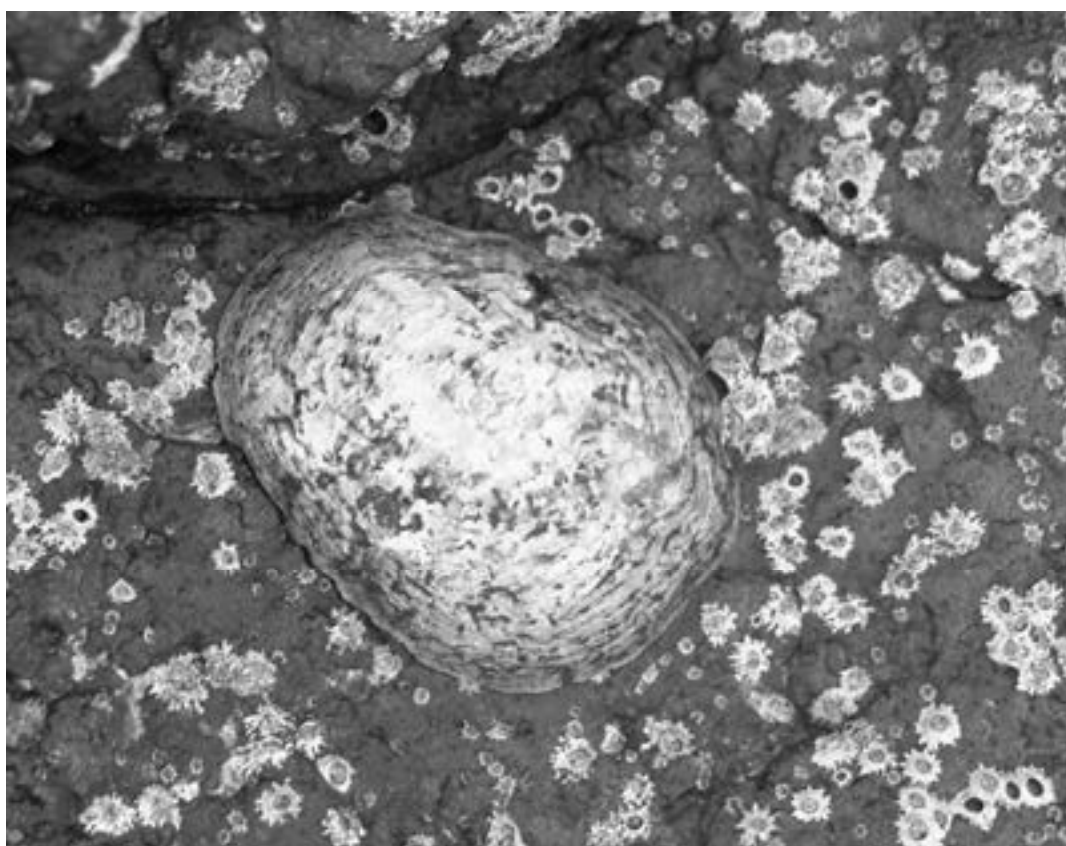


Caballachicharro (*Decapterus macarellus*)

Escenario previsible: especies y comunidades con mayor riesgo

No es fácil prever un escenario futuro para la biodiversidad marina canaria, incluso en un plazo no muy lejano, en el marco del proceso de cambio climático actual, pues todo dependerá de la fuerza y ritmo con que éste se manifieste. De continuar las tendencias actuales, cabe suponer que se

acentuarán los fenómenos descritos, seguirá incrementándose el número de especies de origen tropical, también el contingente poblacional de las nativas que tienen dicha afinidad, y las comunidades algales se organizarán entorno a las especies presentes más termófilas, pero podemos perder las menos tolerantes con las temperaturas altas y las comunidades estructuradas en base a las mismas. Por fortuna, la existencia de un importante gradiente térmico este-oeste y la heterogeneidad norte-sur en cada isla ayudarán a paliar el proceso de pérdida, así las zonas más frías de las islas orientales servirán de refugio para muchas especies dentro de unos límites razonables de cambio, aunque es muy posible que las que tienen distribución actual limitada a dichas islas desaparezcan. Hasta ahora se ha visto que en los años fríos que ocurren entre los más cálidos se produce un efecto de colonización horizontal hacia el oeste, un intento de restablecer las especies de origen templado enrarecidas o desaparecidas de las islas occidentales (Brito *et al.*, 2005), pero cada vez será más difícil lograrlo si la temperatura media sigue subiendo. Las fuerzas locales que generan efectos negativos (sobrepesca, contaminación, destrucción de hábitats, etc.) y entran en sinergia con el cambio climático juegan también a favor de la pérdida de biodiversidad.



Patella candei, una lapa distribuida actualmente sólo en Fuerteventura y las Islas Salvajes.

Las especies más amenazadas son sin duda las que tienen su distribución actual en Canarias limitada a las islas orientales, es decir, las más exigentes con temperaturas bajas, y particularmente si se ven afectadas por otros factores de riesgo locales. En general, el grado de vulnerabilidad es alto en las que presentan su límite meridional de distribución en Canarias o en las costas continentales algo al sur de nuestras islas. Entre éstas se encuentran algunas que organizan extensas comunidades costeras, como las algas pardas *Cystoseira abies-marina* y *C. mauritanica* y la fanerógama *Cymodocea nodosa*. La pérdida será más importante si las especies están distribuidas exclusivamente en la Macaronesia y/o si constituyen la base estructurante de comunidades esenciales.



Sebadal (comunidad de *Cymodocea nodosa*)

Investigación y conservación: indicadores, monitoreo y acciones para la conservación de la biodiversidad

Ya se mencionó con anterioridad que la falta de series largas de datos sobre la evolución de la biota marina canaria dificulta en muchos casos la interpretación de los efectos del cambio climático. Por ello, se hace necesario diseñar y poner en marcha un programa de vigilancia ambiental y monitoreo de indicadores, seleccionados fundamentalmente entre las especies y comunidades de tipo templado y las de distribución limitada a la

Macaronesia, principalmente aquellas que tienen su límite sur en Canarias o en latitudes algo más bajas sobre las costas continentales próximas.

El planteamiento de conservación para el futuro pasa en primer lugar por prever los efectos posibles e iniciar con urgencia el monitoreo de indicadores mencionados, mediante un plan estructurado y válido desde el punto de vista científico, de forma que permita discernir entre efectos de fondo debidos al cambio climático y los relacionados con fuerzas locales transformadoras importantes. En todo caso, dado que la sinergia entre estas fuerzas agrava los problemas, es preciso controlar y minimizar la presión de las que están en nuestras manos, las de ámbito local: ordenando adecuadamente el uso de los recursos pesqueros, limitando la destrucción de hábitats, depurando mejor los vertidos de aguas residuales, etc. Sin duda, una medida urgente es también incrementar y rediseñar las áreas marinas protegidas con un criterio previsor, intentando conservar las especies y comunidades más vulnerables y las funciones ecológicas que cumplen en cada isla y sector. La creación de más reservas marinas pesqueras, donde se minimice la presión sobre los recursos, parece esencial en este contexto y, por las peculiaridades geomorfológicas, oceanográficas y ecológicas, es preciso contar con más de una en cada isla a fin de favorecer la conservación de la biodiversidad y el uso sostenible de los recursos. Las acciones directas, más específicas, de recuperación de especies y comunidades deben también contribuir de forma importante a la conservación: control de la plaga de erizos, eliminación de especies exóticas invasoras, repoblación de especies en peligro, regeneración de hábitats, etc.

Agradecimientos: Agradezco la colaboración de varios investigadores que me han cedido datos, en especial a Emilio Cuevas, Jesús M. Falcón, Sabrina Clemente, Carmelo Dorta, Rogelio Herrera y Pascual Calabuig. A Julio Afonso mi reconocimiento por su paciencia.

Referencias

- BIANCHI, C.N. (2007). Biodiversity issues for the forthcoming tropical Mediterranean Sea. *Hydrobiologia* 580: 7-21.
- BRITO, A. & J.M. FALCÓN (1996). Capture of the St. Helena butterfly fish, *Chaetodon sanctaehelenae* (Chaetodontidae) in the Canary Islands. *Cybium* 20 (1): 99-100.
- BRITO, A. & J.M. FALCÓN (2006). Primera cita para Canarias de dos nuevos peces de origen tropical: *Diodon holocanthus* Linnaeus, 1758, y *Canthidermis maculata* (Bloch, 1786). *Rev. Acad. Canar. Cienc.* 18 (4): 89-92.

- BRITO, A., J.M. FALCÓN & R. HERRERA (1995). Occurrence of the ocean triggerfish in the Eastern Atlantic (Canary Islands). *Journal of Fish Biology* 47: 1099-1101.
- BRITO, A., J.M. FALCÓN & R. HERRERA (2005). Sobre la tropicalización reciente de la ictiofauna litoral de las islas Canarias y su relación con los cambios ambientales y actividades antrópicas. *Vieraea* 33: 515-525.
- BRITO, A., P.J. PASCUAL, J.M. FALCÓN, A. SANCHO & G. GONZÁLEZ (2002). *Peces de las Islas Canarias. Catálogo comentado e ilustrado*. La Laguna: Francisco Lemus Editor, 419 pp.
- CLEMENTE, S., 2008. Evolución de las poblaciones del erizo *Diadema* aff. *antillarum* en Canarias y valoración de la depredación como factor de control. Tesis doctoral, Universidad de La Laguna.
- DULCIC, J. & B. GRBEC (2000). Climate change and Adriatic ichthyofauna. *Fish. Oceanogr.* 9 (2): 187-191.
- HERNÁNDEZ, J.C. (2006). Estrategia reproductiva de la población canaria del erizo *Diadema* aff. *antillarum* Philippi, 1845: maduración gonadal, asentamiento larvario y reclutamiento. Servicio de Publicaciones de La Universidad de La Laguna, PhD. thesis, 241 pp.
- HERNÁNDEZ, J.C., S. CLEMENTE, C. SANGIL & A. BRITO (2008). The key role of the sea urchin *Diadema* aff. *antillarum* throughout the Canary Islands (eastern subtropical Atlantic) in controlling macroalgae assemblages: an spatio-temporal approach. *Marine Environmental Research*. DOI: 10.1016/j.marenvres.2008.03.002.
- KALNAY, E., M. KANAMITSU, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, A. LEETMAA & R. REYNOLDS (1996). The NCEP/NCAR Reanalysis 40-years Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77: 437-471.
- PÉREZ-ARELLANO, J.L., O. P. LUZARDO, A. PÉREZ-BRITO, M. HERNÁNDEZ-CABRERA, M. ZUMBADO, C. CARRANZA, A. ÁNGEL-MORENO, R.W. DICKEY & L.D. BOADA (2005). Ciguatera Fish Poisoning, Canary Islands. *Emerging Infectious Diseases* 11 (12): 1981-1982.
- PERRY, A.L., P.J. LOW, J.R. ELLIS & J.D. REYNOLDS (2005). Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science* 308: 1912-1915.
- RAMOS, A.G., A. MARTEL, G.A. CODD, E. SOLER, J. COCA, A. REDONDO, L.F. MORRISON, J.S. METCALF, A. OJEDA, S. SUÁREZ & M. PETIT (2005). Bloom of the marine diazotrophic cyanobacterium *Trichodesmium erythraeum* in the Northwest African upwelling. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 301: 303-305.
- STEBBING, A.R.D., S.M.T. TURK, A. WHEELER & K.R. CLARKE (2002). Immigration of southern fish species to South-west England linked to

warming of the North Atlantic (1960-2001). *Journal of the Marine Biological Association U K* 82: 177- 180.

VERLAQUE, M., J. AFONSO-CARRILLO, M.C. GIL-RODRÍGUEZ, CH. DURAND, CH. F. BOUDOURESQUE & Y. LE PARCO (2004). Blitzkrieg in a marine invasion: *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Bryopsidales: Chlorophyta) reaches the Canary Islands (north-east Atlantic). *Biological Invasions*, 6: 269-281.

ADDENDA

Reflexiones sobre una naturaleza en constante evolución. Actas II Semana Científica Telesforo Bravo. IEHC. (2007).

En el artículo «3. El paisaje vegetal en Las Cañadas: su transformación por la intervención humana», por Octavio Rodríguez Delgado, se omitió en la página 101 la referencia del libro: «MÉNDEZ PÉREZ, T. 2000. *Antecedentes Históricos del Teide y Las Cañadas*. Canarina, Consultoría Medioambiental. La Orotava, Tenerife. 277 pp.», debido a un error involuntario del autor, pues fue una obra de consulta básica para la primera parte de su trabajo.

OCTAVIO RODRÍGUEZ DELGADO