

Equilibrios sobre el hielo: una breve (pero completa) revisión del conocimiento sobre el impacto humano en la Antártida

P. Tejedo ¹, L. Pertierra ², J. Benayas ², M. Boada ³

(1) IE Universidad, Campus de Santa Cruz la Real, C/ Cardenal Zúñiga 12, 40003 Segovia, España

(2) Departamento de Ecología. Facultad de Ciencias. Campus de Cantoblanco. Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, España

(3) Departamento de Geografía, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). Campus de Bellaterra, 08193 Cerdanyola del Vallès, España

➤ Recibido el 14 de noviembre de 2010, aceptado el 1 de diciembre de 2010.

Tejedo, P., Pertierra, L., Boada, M., Benayas, J. (2011). Equilibrios sobre el hielo: una breve (pero completa) revisión del conocimiento sobre el impacto humano en la Antártida. *Ecosistemas* 20(1):69-86.

La Antártida es una de las zonas de nuestro planeta menos alteradas. Aún así, está sometida a una serie de impactos provocados por la presencia del hombre que son revisados brevemente en este artículo. Para cada tipo de alteración se citan los casos de estudio más representativos, las principales medidas de minimización y/o mitigación adoptadas, así como las contribuciones específicas realizadas recientemente por científicos de España, en caso de existir. Tras presentar la base de conocimiento existente en la actualidad respecto a los impactos humanos antárticos, el texto se cierra con una serie de recomendaciones dirigidas a mejorar el seguimiento de los mismos. Estas directrices deberán guiar los programas de investigación implementados en los próximos años para rentabilizar al máximo los recursos empleados y reforzar la protección de este emblemático lugar.

Palabras clave: Antártida, contaminación, especies exóticas, seguimiento ambiental, turismo

Tejedo, P., Pertierra, L., Boada, M., Benayas, J. (2011). Balancing on the ice: a brief (but complete) review of the current knowledge about human impact on the Antarctica. *Ecosistemas* 20(1):69-86.

Antarctica is one of the less disturbed areas of our planet. Even so, it is subject to several impacts caused by human presence which are briefly reviewed in this article. For each kind of alteration most representative case studies, main minimization and/or mitigation adopted measures, and specific contributions made recently by scientists from Spain, if any, are cited. The text ends with a series of recommendations to improve the monitoring of Antarctic human impacts. After presenting the state of knowledge of Antarctic human impacts, this text includes several recommendations lead to improve their monitoring. These guidelines should aim the future research to maximize the resources and to strengthen the protection of this emblematic place.

Key-words: Antarctica, pollution, non-indigenous species, environmental monitoring, tourism

Introducción

El extremo aislamiento de la Antártida la ha protegido de la presencia humana hasta los últimos 200 años. No obstante, desde el mismo momento de su descubrimiento "oficial" en 1819 (como sucede en otros muchos lugares, hay una fuerte controversia al respecto de esta cuestión), este territorio ha estado sometido a diferentes actividades que han generado una serie de alteraciones en sus ecosistemas. Ya en el verano austral de 1820-1821, entre 55 y 60 barcos establecen su base de operaciones en las Islas Shetland del Sur, capturando en tres meses alrededor de un cuarto de millón de focas (Chwedorzawska, 2009). Los buenos resultados de esta campaña animan a numerosas compañías a sumarse a esta actividad, lo que hace que en dos décadas la práctica totalidad de las colonias de focas con interés comercial de este archipiélago fueran exterminadas (Wise, 1973). En 1904 los cazadores de ballenas se incorporan de forma decidida a la explotación de la zona, construyendo en Grytviken, Isla Georgia del Sur, la primera estación ballenera (Kittel, 2004). En 1912 ya existían en la zona seis estaciones balleneras terrestres, 21 barcos-factoría y 62 navíos dedicados a la caza de cetáceos. En 1923 el gobierno británico advirtió del alarmante descenso de las poblaciones de ballenas con interés comercial, lo que

originó el primer gran estudio científico realizado en la Antártida, el cual fue llevado a cabo por el buque *Discovery*. Esta investigación motivó que en 1937 nueve naciones llegaran a un acuerdo para restringir el tamaño mínimo de las ballenas que fueran capturadas. Aún así, durante la campaña de 1937-38, más de 46.000 ballenas fueron masacradas (Wise, 1973). En la primera mitad del s. XX se desarrollan multitud de expediciones dedicadas a la exploración del continente. El objetivo era doble: por un lado, ampliar los conocimientos de un territorio que constituía uno de los últimos retos para los geógrafos y, por otro, identificar sus posibles recursos económicos. En esta fase, conocida como la *Etapa Heroica de los Descubrimientos*, intervienen exploradores mundialmente conocidos como Shackleton, Amudsen o Scott. A mediados de este siglo, las actividades de investigación tomaron el relevo de la explotación ballenera y la exploración antártica. La celebración en 1957/58 del Año Geofísico Internacional marca el comienzo de esta *Etapa Científica*, la cual continúa hasta hoy día gracias al Tratado Antártico, firmado en Washington en 1959, y al Protocolo de Madrid, ratificado en 1998. Estos dos acuerdos aseguran la protección de la Antártida al dedicar el continente por entero a la investigación científica con fines pacíficos, suspendiendo temporalmente a su vez todas las demandas territoriales que hasta entonces existían por parte de naciones como Argentina, Australia, Chile, Francia, Nueva Zelanda, Noruega y Reino Unido.

En la actualidad, la Antártida recibe cada año a un buen número de investigadores, personal de apoyo destinado al mantenimiento de las estaciones científicas (muchos de los cuales son militares que representan los intereses de sus naciones), algunos exploradores y aventureros, periodistas, pescadores que operan en las aguas del Océano Austral y una cifra cada vez mayor de turistas integrados en programas comerciales y expediciones privadas. Como vemos, las actividades humanas en el Continente Blanco están aumentando y diversificándose. Paralelamente, se ha producido un incremento en los últimos años de las investigaciones dedicadas al seguimiento de las consecuencias de dichas actividades sobre los ecosistemas antárticos. Tras dos décadas de trabajo, se ha generado una base de conocimiento suficientemente sólida que ahora debe ser integrada en los procedimientos de gestión destinados a asegurar la adecuada conservación de este territorio. El principal objetivo del presente artículo es precisamente revisar el estado actual del conocimiento sobre las consecuencias de las actividades humanas en la Antártida de cara a contribuir al fortalecimiento de la protección de los ecosistemas antárticos. Se describen brevemente los principales impactos generados por la presencia humana en este continente, destacando las investigaciones y casos de estudio más relevantes, así como las contribuciones realizadas por grupos de investigación y científicos españoles en caso de existir. Ante la imposibilidad de integrar tal volumen de conocimiento en unas pocas páginas, recomendamos la lectura de Bargagli (2005) y Tin et al. (2009) a aquellos que deseen profundizar en alguna de las cuestiones que son revisadas en el presente trabajo.

Principales impactos provocados por las actividades humanas en la Antártida

Infraestructuras

Las actividades humanas en la Antártida precisan de la existencia de una serie de infraestructuras de apoyo. En la campaña 2008/09 hubo 111 estaciones, refugios y campamentos activos en este territorio, los cuales tuvieron una ocupación de 4.460 personas durante la campaña de verano y 1.094 en la fase invernal (COMNAP, 2009). A estas instalaciones hemos de sumar las estaciones remotas para la toma automática de datos, los restos históricos procedentes de épocas pasadas y algunas estructuras terrestres destinadas a dar apoyo a las expediciones turísticas, como es el caso del campamento *Patriot Hills* de la compañía *Adventure Network International*, situado a tan solo 1.076 Km del Polo Sur geográfico. Todos estos elementos, los cuales han sido recientemente cartografiados (**Fig. 1**), generan diversos impactos, incluyendo una alteración visual y una ocupación del suelo derivadas de su mera existencia.

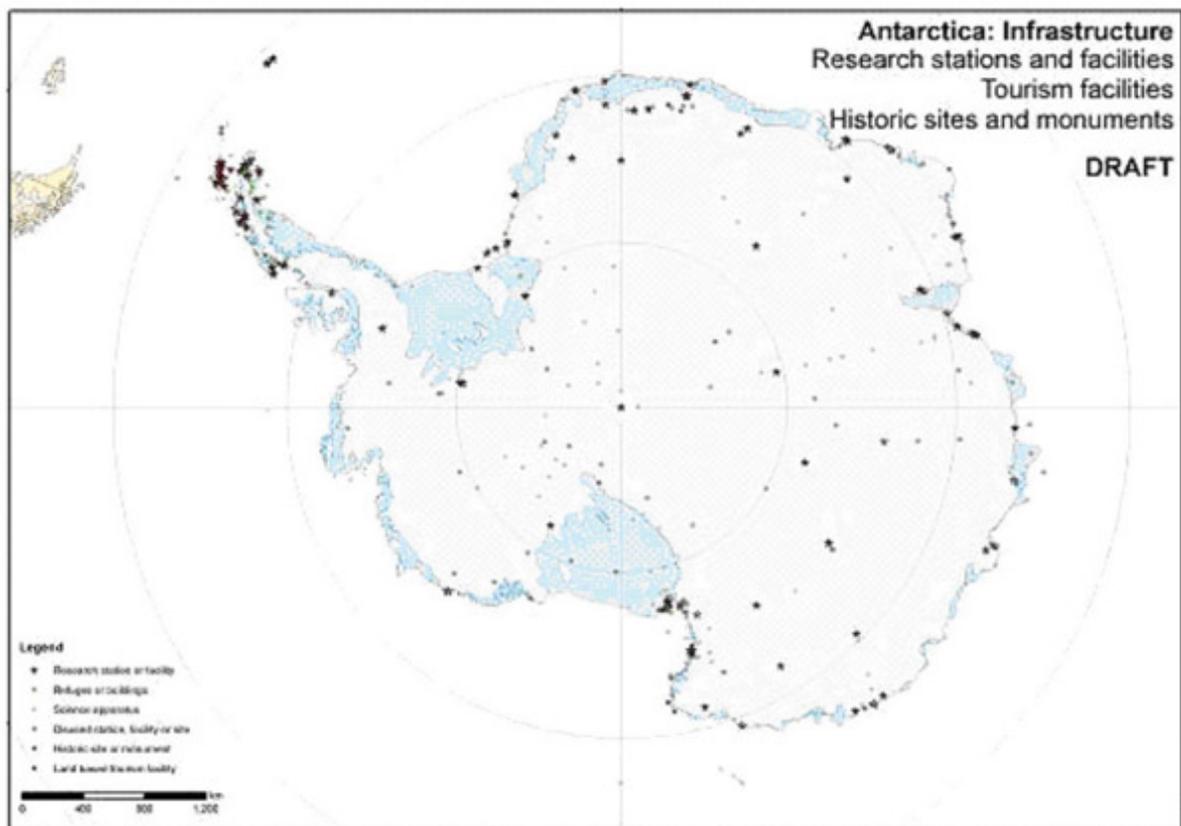


Figura 1. Versión provisional del mapa de las infraestructuras antárticas cuya presencia supera un año (New Zealand, 2010). Se incluyen estaciones científicas, refugios, campamentos, equipamientos científicos, estaciones climáticas automáticas, lugares de interés histórico e instalaciones destinadas al turismo terrestre.



Figura 2. La Península Fildes, en la Isla Rey Jorge, acoge diferentes estaciones científicas antárticas, algunas de considerable tamaño. Esta imagen no se corresponde con los paisajes prístinos que esperan encontrarse los turistas que visitan la Antártida, los cuales suelen destacar el elevado grado de antropización de algunas localizaciones.

Dentro de las infraestructuras antárticas hemos de incluir los senderos creados por los investigadores y turistas. Estos equipamientos originan diferentes impactos, incluyendo un aumento de la compactación del suelo, la reducción de la tasa de infiltración, el incremento de los procesos erosivos, daños a la vegetación y a la fauna edáfica, aparición de basuras, cambios en el microrrelieve que favorecen los procesos erosivos, etc. Nuestro equipo trabaja desde la campaña 2002/03 analizando los cambios en la compactación y en las poblaciones de invertebrados edáficos en suelos antárticos libres de hielo bajo diferentes niveles y condiciones de uso (Tejedo et al., 2005, 2009). Los datos muestran que una mínima actividad humana es

capaz de comenzar a alterar los frágiles y escasos suelos de la Antártida Marítima, aunque para que se produzcan cambios significativos que perduren en el tiempo es necesario un cierto nivel de uso que los estudios experimentales han permitido fijar en 100 desplazamientos por el sendero.

En la Antártida Continental se han desarrollado estudios similares. Ayres et al. (2008) observaron reducciones de hasta el 52% y el 76% entre senderos con tráfico peatonal intenso y zonas de referencia próximas en dos tipos de nemátodos, *Scottnema lindsayae* y *Eudorylaimus* sp. Los efectos del pisoteo en el pavimento antártico y el microrrelieve también han despertado el interés de los científicos. Un equipo liderado por Jerónimo López-Martínez, del Dpto. de Geología y Geoquímica de la Universidad Autónoma de Madrid, analizó entre 2008 y 2010 diferentes localizaciones de la Región del Mar de Ross, observando que a partir de tan solo 20 pisadas comenzaba a producirse un impacto visual en los suelos formados por materiales no consolidados (datos no publicados). Campbell et al. (1998) han podido localizar senderos perfectamente visibles en suelos de grava que fueron creados hace 30 años, lo cual nos da una idea de la duración potencial de este tipo de impacto.



Figura 3. *Turistas antárticos desplazándose por un sendero tras desembarcar en la Isla Barrientos, Archipiélago de las Aitcho, Antártida. En la parte central de la imagen se puede apreciar la bandera de color naranja utilizada por los guías para balizar el itinerario. Este tipo de medida está destinada a evitar la dispersión de los visitantes, algo fundamental cuando se atraviesa una zona de vegetación como sucede en este caso.*

Sustancias químicas

La contaminación debida al uso y manejo de combustibles fósiles, es una de las consecuencias más extendidas de la presencia humana en la Antártida (Bargagli, 2005). Las operaciones de recarga de los generadores y grupos electrógenos situados en tierra pueden producir pequeños derrames, aunque sus consecuencias se restringen en la mayoría de los casos a unos pocos cientos de metros (Stark et al., 2005). Afortunadamente, este tipo de accidentes son cada vez menores como consecuencia de la implementación de protocolos de actuación más estrictos. También el entorno marítimo puede sufrir episodios de contaminación por hidrocarburos. Destaca el hundimiento en 1989 del buque *Bahía Paraíso*, el cual provocó el vertido de 600.000 litros de petróleo en Arthur Port, afectando a un área de unos 3 Km de radio (Kennicutt et al., 1991). Aunque este tipo de situaciones es algo excepcional en la Antártida, en los últimos años se ha observado un incremento de los accidentes de los cruceros turísticos, algunos de los cuales han provocado pequeños vertidos (consultar **Tabla 1** para más detalles). La posibilidad de que se produzca una marea negra en la Antártida es una de las mayores preocupaciones de la comunidad internacional. Este riesgo ha llevado a la *Organización Marítima Internacional* a aprobar recientemente la

prohibición del uso y transporte de fueles pesados en la zona del Tratado Antártico a partir de agosto de 2011, decisión que ha sido muy bien acogida por parte de la comunidad científica internacional.

Crucero / fecha del siniestro	Descripción	Impacto ambiental
<i>Lyubov Orlova</i> (ahora <i>MV Orlav</i>) / 27 de noviembre de 2006	Este crucero embarrancó en Puerto Foster, Isla Decepción, con 150 pasajeros a bordo. Se cree que el capitán tardó en mandar un aviso de socorro 15 horas. El buque de la Armada española Las Palmas respondió a la llamada y tras ocho horas pudo liberar al <i>Lyubov Orlova</i> . Los pasajeros permanecieron a bordo y el barco pudo regresar a Ushuaia, Argentina, por sus propios medios.	No se informó de ningún impacto para el medio ambiente.
<i>MS Explorer</i> / 23 de noviembre de 2007	Este buque se hundió en las proximidades de la Isla Rey Jorge (62° 24' 18" S 57° 11' 46" W, Estrecho de Bransfield) tras colisionar con un bloque de hielo que perforó el casco, creando un agujero del tamaño de un puño. Los pasajeros y la tripulación abandonaron el barco y fueron recogidos por el crucero turístico <i>MS Nordnorge</i> tras permanecer 4-5 horas en los botes salvavidas. Esta embarcación los trasladó a la estación chilena Eduardo Frei, desde donde fueron evacuados en avión hasta Punta Arenas (Chile).	El crucero transportaba 185.000 litros de combustible en el momento del hundimiento. Aunque la mayor parte debería continuar en el interior del casco, es posible que en los próximos años se produzcan fugas.
<i>MS Fram</i> / 28 de diciembre de 2007	Se produjo una colisión con un témpano de hielo como consecuencia de una pérdida momentánea del sistema de propulsión. El iceberg produjo pequeños daños en el Puente, dejando inservible uno de los botes salvavidas. Tras una hora, se recuperó la energía. Se realizó una inspección del motor y por seguridad se canceló el crucero.	No se informó de ningún impacto para el medio ambiente.
<i>MS Nordkapp</i> / 30 de enero de 2008	Este buque encalló al acceder a la caldera de la Isla Decepción con 370 personas a bordo (294 pasajeros y 76 tripulantes). Tras evacuar al pasaje al <i>MS Nordnorge</i> para su regreso a Ushuaia, el <i>HMS Endurance</i> acompañó al <i>MS Nordkapp</i> hasta Argentina para ser reparado.	Se produjo una pequeña fuga de combustible, aunque la cantidad exacta no fue declarada. Los restos de gasoil marino habían desaparecido para el 3 de febrero.
<i>MV Ushuaia</i> / 4 de diciembre de 2008	El crucero encalló a la entrada del Bahía Wihelmina, al noroeste de la Península Antártica, en la posición 64° 35' S 62° 25' W. El <i>MV Antarctic Dream</i> llegó para asistir al <i>MV Ushuaia</i> . Los 82 pasajeros y 5 miembros de la tripulación fueron transferidos al buque naval chileno <i>Achiles</i> para su traslado a la estación chilena Eduardo Frei en la Isla Rey Jorge. Allí ellos fueron trasladados a Ushuaia, Argentina, a bordo de un Hércules C-130 argentino.	Dos tanques de diesel fueron dañados y se produjo un derrame de combustible, el cual se contuvo mediante la extensión de una barrera flotante. Los tanques tenían una capacidad de 18 y 27 m ³ .
<i>MV Ocean Nova</i> / 16 de febrero de 2009	Este buque encalló en las coordenadas 68° 08' S 67° 06' W, en la Bahía de Margarita, al oeste de la isla Debenham, aproximadamente a 2 km de la base de investigación argentina San Martín. Los pasajeros del <i>Ocean Nova</i> y su tripulación (106 personas) fueron transferidos al <i>Clipper Adventurer</i> para su retorno a Ushuaia, Argentina, punto de origen de este crucero.	No se informó de ningún impacto para el medio ambiente.
<i>Clelia II</i> / 26 de diciembre de 2009	El crucero encalló en la Isla Peterman, en la zona de la Península Antártica, concretamente en las coordenadas 65° 10' S 64° 10' W. La causa fue un inesperado golpe de viento que se produjo justo en el momento en el que se realizaba un desembarco de turistas. Los pasajeros fueron evacuados a tierra por razones de seguridad y volvieron a subir a bordo una vez la situación estuvo bajo control.	En el momento del impacto se vio afectado el propulsor de estribor, produciéndose un pequeño vertido de aceite lubricante. Varias zodiacs del crucero se mantuvieron alerta y comprobaron que el vertido se disolvía rápidamente.

Tabla 1. Accidentes de cruceros turísticos en aguas antárticas en los últimos años.



Figura 4. Crucero turístico realizando una arriesgada maniobra para facilitar el desembarco de los turistas en Bahía Balleneros, Isla Decepción, Antártida.

Las combustiones derivadas de las actividades humanas en la Antártida generan una serie de contaminantes gaseosos, algunos de los cuales contribuyen a fenómenos globales como el cambio climático. La huella de carbono de los programas nacionales antárticos no ha sido analizada en su conjunto hasta el momento, a pesar de que el *Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente* recomienda incluir un inventario de los gases con efecto invernadero en los procesos de evaluación de impacto ambiental de las actividades desarrolladas en el Continente Blanco (Amelung y Lamers, 2007). Las contribuciones del turismo basado en cruceros sí que ha sido recientemente puesta en cifras por un equipo internacional (Farreny et al., en prensa). En este estudio se analizan las emisiones durante 2008/09 de los cruceros turísticos. Esta forma de visitar el Continente Blanco fue escogida por el 99% de los casi 38.000 turistas que recibió la Antártida a lo largo de dicha campaña, manteniéndose las tendencias observadas en los últimos años (**Fig. 5**). El análisis de los datos reveló que el 75% de las emisiones de carbono se producen durante la fase de crucero, mientras que el 25% restante corresponde a los vuelos realizados desde los países de origen de los pasajeros antes de embarcar (**Fig. 6**). Pero el resultado más destacado de esta investigación es la huella de carbono promedio de los turistas antárticos, la cual se sitúa en 6,18 toneladas de CO₂ por pasajero. Una cifra muy elevada si consideramos que la emisión media per cápita a nivel mundial es de sólo 4,38 toneladas de CO₂ (International Energy Agency, 2009).



Figura 5. Cifras de visitantes antárticos para el período 1965-2010. Se muestran los datos disgregados para los cuatro productos turísticos más habituales en este territorio (Enzenbacher, 1992; Headland, 1994; Headland, 2009; IAATO, 2010).

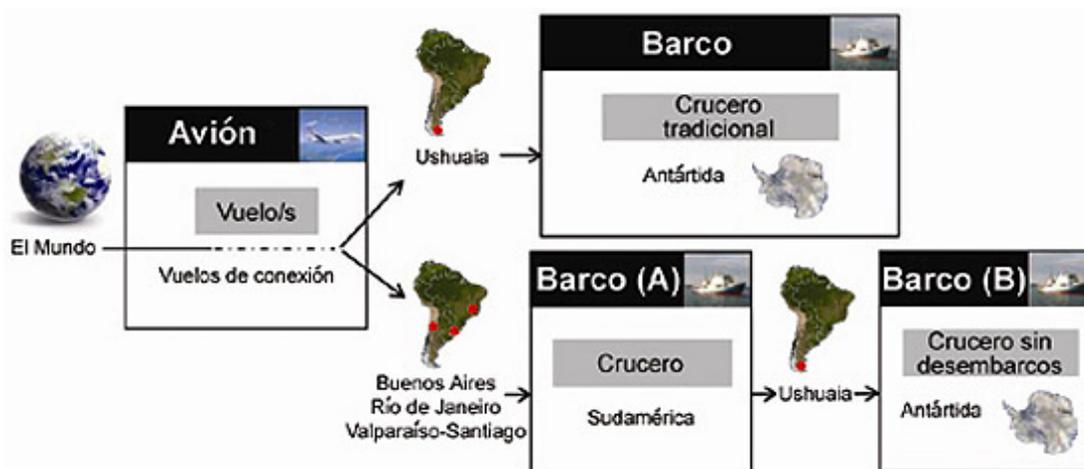


Figura 6. Diagrama de fases de los principales medios de transporte utilizados en el turismo antártico (adaptado de Farreny et al., en prensa).

Otros contaminantes presentes en la Antártida son los metales pesados, principalmente cobre, plomo, cinc, cadmio, mercurio y arsénico (Evans et al., 2000). También se han detectado diferentes contaminantes orgánicos persistentes (COPs), incluyendo policlorobifenilos (PCBs), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y varios pesticidas clorados (Goerke et al., 2004; Lohmann et al., 2004; Borghini et al., 2005; Bargagli, 2008; Klanova et al., 2008). Todos estos contaminantes tienden a presentar una mayor acumulación en suelos y biota próximos a las estaciones científicas (Corsolini, 2009), aunque una parte significativa es transportada hasta la Antártida desde otros continentes. Considerando que la mayoría de estos compuestos presentan una elevada persistencia en los ecosistemas afectados, todavía mayor en el caso de los entornos polares debido a las bajas temperaturas medias, se entiende inmediatamente la necesidad de llevar a cabo un estrecho seguimiento de los mismos. Otras fuentes menores de contaminación química incluirían las partículas de cemento procedentes de la erosión eólica (Adamson et al., 1994) y los contaminantes procedentes del transporte aéreo (O'Brien et al., 2004). Los efluentes de los emisarios procedentes de algunas estaciones científicas también han generado en determinados lugares un problema grave de contaminación, como es el caso de la Winter Quarters Bay, Isla de Ross, la cual recibió hasta mediados de los 80 los vertidos procedentes de la Estación McMurdo, alcanzándose unos niveles de contaminación muy elevados (Tin et al., 2009).

Aunque las sustancias polucionantes y los residuos en la Antártida son bastante variados, en términos globales podemos considerar que el volumen de material contaminado en la Antártida es pequeño. Las directrices establecidas al respecto en el Protocolo Ambiental del Tratado Antártico hacen que la mayor parte de los residuos sólidos y líquidos producidos sean evacuados en la actualidad. Existen ciertas excepciones a esta regla debidas a los elevados costes económicos y las limitaciones logísticas. Es el caso de los suelos contaminados y de los grandes depósitos de residuos creados antes de la entrada en vigor de las restrictivas normativas ambientales actuales. Para solucionar estos problemas se han aplicado en ciertos casos tratamientos in-situ, incluyendo sistemas para la depuración de las aguas residuales, barreras permeables con materiales activos y diferentes técnicas de bioremediación (Snape et al., 2001; Northcott et al., 2005; Filler et al., 2008). Las características climáticas de la zona hacen que este tipo de métodos requieran de largos períodos de tiempo, pero su coste es infinitamente menor a la alternativa de la retirada del material para su tratamiento *off-site*. En otros casos, se opta por la evacuación progresiva de los residuos aprovechando los desplazamientos de los buques de apoyo de los programas nacionales (Fig. 7).



Figura 7. Restos diversos, listos para su retirada, procedentes de un antiguo depósito que está siendo eliminado en la Base antártica chilena Presidente Eduardo Frei Montalva.

Contaminación procedente de las aguas residuales y los restos fecales

Una de las cuestiones ambientales que más preocupan a las naciones firmantes del Tratado Antártico es la gestión de las aguas residuales procedentes de sus estaciones científicas (Gröndahl et al., 2008). Estos residuos contienen heces y orina, microorganismos (incluyendo patógenos que potencialmente podrían afectar a parte de la fauna antártica), material orgánico, detergentes, metales pesados, hidrocarburos y salmueras procedentes de las plantas desalinizadoras. La mayoría de los estudios realizados hasta el momento para analizar las consecuencias para la biota de este tipo de contaminación se han centrado en los invertebrados bentónicos. Salvo en los lugares con niveles de contaminación muy elevados, lo que suele observarse es una biodiversidad igual o mayor que en los puntos de control tomados como referencia (Conlan et al., 2004), sobre todo debido al aumento de la megafauna detritívora en las proximidades de los emisarios (Kim et al., 2007). Estos efectos en la fauna bentónica no coinciden con los resultados observados en los estudios que incluyen otros grupos taxonómicos. Por ejemplo, la fauna piscícola puede sufrir efectos genotóxicos y anomalías patológicas como consecuencia de su exposición a este tipo de residuos, tal y como se ha demostrado a través de estudios experimentales (Van Ngan et al., 2007). Cuando se utilizan diferentes taxones, los estudios muestran descensos en la riqueza, biodiversidad y heterogeneidad (Stark et al., 2003). Los buques afrontan la eliminación de sus aguas residuales más fácilmente, ya que se considera que mientras sean vertidas a una distancia de la costa superior a 12 millas náuticas, el impacto ambiental es despreciable (Art. 6 del Anexo IV del Protocolo de Madrid).

En el caso de las actividades humanas que se desarrollan en el interior del continente (bases de investigación, expediciones científicas y campamentos turísticos), existen diferentes estrategias de gestión, incluyendo su depósito en pozos enterrados en el hielo o su almacenamiento y posterior evacuación junto al resto de residuos. Un efecto del calentamiento global en la Península Antártica ha sido la reducción de la nieve en algunos nunataks y zonas costeras, lo que precisamente ha dejado al descubierto antiguos depósitos de residuos fecales (Hughes y Nobbs, 2004). A través de técnicas moleculares se ha comprobado que microorganismos capaces de formar esporas resistentes como *Bacillus* y *Clostridium* sp. pueden sobrevivir más de 40 años (Hughes y Nobbs, 2004), mientras que los coliformes fecales suelen ser vulnerables a la radiación ultravioleta y la desecación, por lo que su persistencia es mucho menor (Hughes, 2003).

Impactos sobre la flora

No existen muchos trabajos científicos dedicados a analizar los efectos de la presencia humana en la vegetación terrestre antártica (Poland et al., 2003). Algunos estudios han identificado alteraciones significativas de la vegetación que incluyen la destrucción de tapetes de musgos por el pisoteo de los investigadores o turistas, la contaminación de musgos y líquenes con polvo de cemento y metales pesados, o el incremento de la compactación del suelo, lo que reduce la disponibilidad hídrica y la capacidad de germinación de nuevos brotes (Chen y Blume, 1997; Hansom y Gordon, 1998; Gremen et al., 2003; ASOC, 2004; Bargagli, 2005). El mayor problema en relación al pisoteo es que estos organismos presentan tiempos de recuperación muy lentos, que en el caso de algunos líquenes pueden rondar los 200 años. Este es el motivo por el cual se recomienda encarecidamente evitar el paso sobre zonas con cualquier tipo de vegetación. Miembros de nuestro equipo de investigación desarrollan en la actualidad un estudio destinado a valorar los efectos del pisoteo y los tiempos de recuperación para diferentes comunidades muscinales (**Fig. 8**). Los primeros resultados apuntan a que un exceso de pisoteo tiene consecuencias significativas en la resiliencia de estas comunidades, ya que se reduce la materia orgánica y la disponibilidad de ciertos nutrientes.



Figura 8. Experimento de pisoteo realizado por nuestro equipo en una pradera de musgo en zona de turbera de la Península Byers, Isla Livingstone. El impacto se incrementa de izquierda a derecha de 0 a 300 pisadas, con varios niveles de alteración intermedios. En este trabajo se obtuvieron datos de cobertura, resistencia a la compresión, porcentaje de materia orgánica y biomasa (pendientes de publicación).

Molestias a la fauna local

La respuesta de la fauna antártica ante la presencia humana es muy variable, tal y como ha quedado demostrado a través de la revisión realizada recientemente por de Villiers (2008), observándose diferencias entre especies e incluso entre colonias de la misma especie. Entre las colonias menos sensibles al contacto con el hombre se encontrarían los pingüinos de Adelia (*Pygoscelis adeliae* Hombron & Jacquinot) de la Estación Palmer y de la Isla Rey Jorge (Fraser y Patterson, 1997; Carlini et al., 2007). Lo mismo sucede para los pingüinos papúa (*Pygoscelis papua* Forster) de puerto Lockroy (Cobley y Shears, 1999). Sin embargo, todo parece indicar que la presencia humana afecta negativamente al éxito reproductivo del petrel gigante del sur (*Macronectes giganteus* Gmelin; Woehler et al., 2003) y a los petreles nivales (*Pagodroma nivea* Forster) en la Antártida oriental (Micol y Jouventin, 2001). Las poblaciones afectadas pueden sufrir cambios etológicos y fisiológicos que se traducen en un incremento del gasto energético en ciertas épocas críticas como la reproductiva o la dedicada al cambio de la pluma (Burger y Gochfeld, 2007). También se han observado incrementos en ciertas hormonas que son generadas por los animales en situaciones de estrés (Fowler, 1999), así como abandonos temporales o permanentes de los huevos y pollos, los cuales quedan desprotegidos ante aves depredadoras oportunistas, como págalos, petreles o gaviotas.

Aunque varios de estos efectos se estén produciendo en una colonia, es difícil correlacionar la presencia humana con la viabilidad de las poblaciones afectadas, sobre todo por la posibilidad de que éstas se habitúen a ciertas interacciones de baja intensidad con las personas (Cobley y Shears, 1999; Otley, 2005). De nuevo se dan grandes diferencias entre diferentes taxones, aunque es más sencillo que se produzca habituación si las perturbaciones son regulares y predecibles (de Villiers, 2008). Por ejemplo, Van Polanen et al. (2007) sugieren que las focas de Weddell (*Leptonychotes weddellii* Lesson) y sus crías en el Archipiélago Windmill dejan de alterarse ante la presencia humana tras diez aproximaciones a lo largo de dos horas, mientras que visitas irregulares no desencadenan ningún signo de habituación. Miembros de nuestro equipo de investigación han iniciado recientemente una línea de trabajo en colaboración con el Dr. Andrés Barbosa, del Departamento de Ecología Evolutiva del Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC, dedicada al análisis de los niveles de hormonas relacionadas con el estrés en plumas de pingüinos (**Fig. 9**). El objetivo final es poder comparar colonias visitadas por turistas con otras no sometidas a esta actividad, para ver si hay diferencias significativas en los niveles de estrés promedio. La técnica utilizada consiste en la cuantificación de los niveles hormonales por inmunodetección mediante la técnica ELISA de competición de

corticosterona, tras una extracción previa mediante metanol (Bortolotti et al., 2008, 2009). Los primeros resultados obtenidos han sido muy esperanzadores, aunque todavía es necesario realizar más experimentos.



Figura 9. Pingüino papúa (*Pygoscelis papua* Forster) con su cría. Esta especie ha sido seleccionada por nuestro equipo de investigación para poner a punto una técnica destinada a valorar el grado de estrés a través de la concentración en las plumas de ciertas hormonas.

La fauna antártica también se ve afectada por el ruido generado durante las operaciones aéreas (Harris, 2005; Hughes et al., 2008). Los efectos son de nuevo muy variables en función de la especie considerada, e incluyen cambios menores en el comportamiento (Southwell, 2005), incrementos de la tasa cardíaca y de los abandonos temporales de los nidos (Wilson et al., 1991), abandonos masivos de nidos (Sladen y Leresche, 1970) y situaciones de pánico en masa con resultado de muerte para miles de aves (Rounsevell y Binns, 1991). En el caso del petrel gigante del sur en Point Géologie, el descenso de sus efectivos poblacionales se ha atribuido en buena parte a la presencia de un helipuerto a tan solo 40 metros de la zona donde tradicionalmente se reproducían estas aves (Micol y Jouventin, 2001). En ciertas ocasiones es posible que se produzca una habituación a la presencia de tráfico aéreo, tal y como han propuesto diferentes autores (Cobley y Shears, 1999; Otley, 2005; Hughes et al., 2008). En el caso de la fauna marina, los vertebrados son los más sensibles a la contaminación acústica, llegándose a registrar casos de mortalidades masivas en pingüinos debidas a explosiones submarinas (Brown y Adams,

1983; de Villiers, 2008). El avistamiento de ballenas y su seguimiento con pequeñas embarcaciones también puede resultar perjudicial para estos animales si no se realiza correctamente (COMNAP 1999), habiéndose registrado en el pasado algunos casos de colisiones entre ballenas y embarcaciones turísticas. Como en el resto de los océanos, el uso de sónares constituye una amenaza para los cetáceos, aunque afortunadamente los equipos habitualmente utilizados en la Antártida poseen una baja potencia y no suelen generar alteraciones más allá de comportamientos de evitación (Kremser et al., 2005; SCAR, 2006a). Otro impacto físico que se suma al acústico es el que producen las luces de las estaciones científicas y embarcaciones, las cuales pueden desorientar a las aves por la noche. Las colisiones de aves con buques operando en el Océano Austral no son infrecuentes, habiéndose producido mortalidades masivas de ciertas especies de petreles en ciertas situaciones (para más detalles consultar Black, 2005).

Diferentes instituciones como el SCAR (*Scientific Committee of Antarctic Research*) o la IAATO (*International Association of Antarctica Tour Operators*) han desarrollado recomendaciones dirigidas tanto a los científicos como a los turistas para evitar las molestias a la fauna anteriormente descritas. Dichas directrices se basan en su mayoría en las investigaciones destinadas a identificar las distancias de huida mínimas que comenzaron en la década de los 90 y que siguen realizándose hoy día (Pfeiffer y Peter, 2003; de Villiers et al., 2006; Burger y Gochfeld, 2007; Holmes et al., 2008, entre otros). En base a estos estudios se han establecido una serie de distancias mínimas para diferentes situaciones (visitas a colonias costeras, avistamiento de cetáceos o aproximación aérea en zonas de anidamiento), así como códigos de conducta destinados a reducir al mínimo las posibles perturbaciones derivadas de la presencia humana.

Bioinvasiones

Comparados con otros entornos, los ecosistemas terrestres de la Antártida son pobres en especies y se caracterizan por la ausencia de muchos grupos taxonómicos. Estos sistemas tan simplificados son más vulnerables a la colonización por especies exóticas (Convey, 2006). La respuesta de la biota autóctona a estos cambios puede estar restringida por sus historias de vida, ya que aunque los organismos antárticos suelen estar muy especializados para poder prosperar en unas condiciones tan extremas, suelen carecer de habilidades competitivas y son vulnerables a una mayor competencia y depredación como consecuencia de la aparición de taxones exóticos (Frenot et al., 2005; Convey et al., 2006). Esta mayor vulnerabilidad ha quedado demostrada en los procesos invasivos observados en las islas subantárticas, donde ya se han detectado más de 200 especies exóticas (Frenot et al., 2005, 2008; Convey et al., 2006). Estos archipiélagos están más expuestos a las invasiones biológicas debido a que el clima no es tan extremo y a que presentan una mayor accesibilidad desde los continentes cercanos.

En la Antártida continental las especies exóticas no lo tienen fácil ya que deben estar preadaptadas evolutivamente a unas condiciones ambientales similares para poder establecerse exitosamente. Esto ha hecho que hasta el momento sólo se hayan identificado cinco especies exóticas probadas: tres herbáceas (*Poa annua* L., *Poa pratensis* L., *Poa trivialis* L.; esta última fue erradicada en 2007), un gusano enquitreido (*Christensenidrilus blocki* Dozsa-Farka & Convey) y una mosca quironómida (*Eretmoptera murphyi* Schaeffer). Todas estas especies se sitúan en la proximidad de estaciones científicas. De hecho, se cree que los invertebrados fueron introducidos accidentalmente durante unos experimentos de trasplantes de diferentes especies vegetales realizados durante la década de los 60 (Dozsa-Farkas y Convey, 1997). Existen otras citas sobre colémbolos exóticos y especies vegetales en la Antártida Marítima, aunque no se ha confirmado el estatus actual de estas poblaciones. Hasta el momento, ninguna de estas especies exóticas parece haberse convertido en invasora (Tin et al., 2009). Las tendencias actuales relacionadas con el cambio climático seguramente contribuirán a agravar el problema en las próximas décadas al disminuir las barreras climáticas para el establecimiento y la invasión por parte de especies exóticas. Otro riesgo que también ha comenzado a preocupar en los últimos años es la transferencia de organismos antárticos entre diferentes regiones biogeográficas dentro del propio Continente Blanco, especialmente en el caso de los ácaros, colémbolos y nemátodos, los cuales presentan una distribución fuertemente influida por la frontera biogeográfica que se sitúa a lo largo de la zona austral de la Península Antártica, la denominada *Línea Gressitt* (Chown y Convey, 2007).

Grupo biológico	Islas subantárticas	Antártida Continental	Antártida Marítima
Dicotiledóneas	62	0	0
Monocotiledóneas	45	1	2
Pteridófitos	1	0	0
Invertebrados	72	0	2-5
Vertebrados	16	0	0

Tabla 2. Especies exóticas exitosamente establecidas en tres zonas biogeográficas terrestres de la Antártida (Tin et al., 2009).

Los mayores vectores de transmisión de especies exóticas son los cargamentos, los vehículos, la comida, la ropa y la propia gente (Sjoling y Cowan, 2000; Whinam et al., 2004; Frenot et al., 2005; Lewis et al., 2005, 2006; Hughes et al., 2006). En un estudio realizado recientemente por el equipo del proyecto internacional *Aliens in Antarctica* se comprobó que el 30% de los visitantes antárticos llevan consigo semillas de plantas, las cuales pertenecen a más de 250 especies distintas. Las fundas de los equipos fotográficos, las mochilas y el calzado son los elementos que concentraron un mayor número de semillas. Los turistas y la tripulación de los cruceros turísticos llevaban menos semillas consigo que los miembros de los programas nacionales (investigadores, técnicos de apoyo y personal de las bases). Mención aparte merecen las posibles introducciones de microorganismos y patógenos, las cuales han recibido una mayor atención en los últimos años, aunque todavía hay poca información disponible al respecto (Frenot et al., 2005; Barbosa, 2011). Entre los especialistas antárticos preocupan las posibles infecciones relacionadas con las aguas residuales producidas a partir de diferentes actividades humanas, así como los intercambios de agentes patógenos entre diferentes colonias de pingüinos o focas a través de los turistas e investigadores. Para evitar este riesgo, tanto algunos programas nacionales como los operadores antárticos han desarrollado directrices para la descontaminación de la ropa y las botas, partiendo de la base de que la prevención es mucho más eficaz que la mitigación posterior.

El potencial de introducción de taxones marinos en la región Antártica ha sido reconocido en los últimos años (Frenot et al., 2005; Lewis et al., 2005, 2006), aunque todavía no existen muchos datos al respecto. Se ha documentado que el alga verde exótica *Enteromorpha intestinalis* (L.) se ha establecido recientemente en la zona intertidal de la Isla Media Luna, posiblemente tras llegar adherida a los cascos de los cruceros turísticos (Clayton et al., 1997). Se piensa que otro de los principales vectores de introducción pueden ser las aguas de lastre, pero hasta la fecha no se han documentado casos específicos en la literatura científica. La falta de un conocimiento detallado de la biodiversidad marina antártica también contribuye a dificultar la identificación de los potenciales invasores.

Diferentes autores sostienen que la Antártida no se encuentra adecuadamente protegida ante la amenaza de las invasiones biológicas y que no se han logrado crear las condiciones adecuadas para asegurar la correcta protección de su patrimonio biológico (para una revisión en profundidad, consultar Hughes y Convey, 2010). En la actualidad, la comunidad científica clama por la implementación de medidas más rigurosas que eviten la introducción accidental de especies a través de las actividades de los programas nacionales, los tour-operadores turísticos y las ONGs.

Actividad de la industria pesquera antártica

Después de dos siglos de explotación comercial incontrolada, muchas especies antárticas muestran tamaños poblacionales preocupantes. Es cierto que especies como las focas oceladas antárticas (*Arctocephalus gazella* Peters) y los elefantes marinos del Sur (*Mirounga leonina* L.) se han recuperado casi por completo tras el cese de su caza (SCAR, 2006b). Pero no sucede lo mismo con ciertas especies piscícolas como el bacalao antártico (*Notothenia rossii* Richardson), el draco rayado (*Champsocephalus gunnari* Lönnberg) o los grandes cetáceos (Croxall y Nicol, 2004; Ballance et al., 2006). No olvidemos que estos últimos continúan sometidos a una cierta presión como consecuencia de las capturas con "fines científicos" realizadas por Japón, las cuales afectan a unos 440 rorcuales australes (*Balaenoptera bonaerensis* Burmeister) por temporada. Kock et al. (2004) demostraron que las poblaciones de bacalao antártico de la Isla Elefante continúan sin recuperarse dos décadas después del final de su explotación. En la actualidad, los tres principales recursos de interés comercial en el Océano Austral son la merluza negra patagónica (*Dissostichus eleginoides* Smitt), la merluza negra antártica (*Dissostichus mawsoni* Norman) y el krill antártico (*Euphausia superba* Dana). Hasta el momento, la gestión de las cuotas de captura de estos recursos realizada por la *Convención para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos* han permitido un control bastante eficaz de su explotación, pero en el caso del krill existe el temor de que el incremento del interés en su uso en la acuicultura y la producción de fármacos puedan modificar esta tendencia (Nicol y Foster, 2003). Este grupo posee un alto valor ecológico al constituir la base de la pirámide alimenticia antártica, por lo que una reducción en su biomasa conlleva un menor éxito reproductivo en los consumidores y superdepredadores. A la sobreexplotación debemos sumar los múltiples efectos negativos derivados de otras amenazas globales, tales como el incremento de la radiación ultravioleta en la superficie marina o el calentamiento global.

A la explotación directa y sus consecuencias, hemos de sumar los impactos indirectos generados por la industria pesquera. Destaca en este aspecto la muerte de aves marinas por capturas accidentales con los palangres destinados a la merluza negra, la cual parece estar correlacionada con los descensos poblacionales observados en diferentes especies de albatros y petreles (Croxall et al., 2007). Un dato muy revelador lo encontramos en el estudio de Delord et al. (2005), los cuales informaron de la muerte de 26.668 aves marinas entre 2001 y 2003 como consecuencia de la pesca con palangre en la zona de los archipiélagos de Kerguelen y Crozet. Se han tomado diferentes medidas técnicas y legales para evitar este problema, pero al tratarse de aves con áreas de campeo muy amplias, se siguen registrando mortalidades elevadas en zonas en las que estas soluciones están ausentes. Tampoco todas las embarcaciones han incorporado estas mejoras, ya que existen numerosos barcos que operan en esta agua de manera ilegal y que por lo tanto no pueden ser regulados adecuadamente. Aparte de las aves, existen otras especies que son afectadas por estas capturas accidentales, incluyendo distintas especies de focas y peces. Croxall y Nicol (2004) destacan la muerte de larvas y juveniles de diferentes especies de peces durante la

captura del krill antártico. Estos impactos sobre especies no-objetivo y la salud de los ecosistemas marinos todavía no han sido suficientemente analizados en el caso antártico (Ballance et al., 2006; Ainley y Blight, 2009). Se han descrito diferentes cascadas tróficas como consecuencia de situaciones de sobreexplotación (Worm et al., 2006; Ainley y Blight, 2009). Por ejemplo, las orcas (*Orcinus orca* L.) que se alimentan de pescado y los pingüinos de Adelia han cambiado sus preferencias alimenticias como consecuencia del descenso de la disponibilidad de merluza negra. Esta situación les ha llevado a consumir otras especies más pequeñas como el diablillo antártico (*Pleuragramma antarcticum* Boulenger), el cual a su vez es una presa habitual de la propia merluza negra, lo que retroalimenta el origen del problema (DeVries et al., 2008). Mencionar por último el impacto provocado por las embarcaciones sobre las comunidades bentónicas durante las operaciones de fondeo. Se trata en este caso de un daño que suele estar muy localizado en ciertos enclaves estratégicos y que es producido tanto por los buques dedicados a la pesca, como por los cruceros turísticos y los barcos de apoyo de los programas nacionales.

Principales recomendaciones para la mejora del seguimiento ambiental en el Continente Blanco

La adecuada conservación de los ecosistemas antárticos, incluyendo sus valores naturales, estéticos y científicos, es un reto que debemos asumir cuanto antes, ya que como hemos visto hay cada vez más evidencias que señalan que no estamos haciendo todo lo posible para lograr esta meta. A continuación, destacamos cuatro cuestiones claves en las que se debería trabajar para mejorar nuestro conocimiento de los impactos debidos a las actividades humanas en la Antártida:

1. Resulta imprescindible la realización de estudios a medio-largo plazo que permitan identificar los impactos acumulativos de las actividades humanas sobre los diferentes compartimentos ambientales. Estas investigaciones han de combinar las actividades de seguimiento con el desarrollo de estudios experimentales que generen la información necesaria para detectar y gestionar los impactos humanos.
2. En la actualidad existen multitud de investigaciones que analizan el impacto humano en pequeñas localizaciones o bajo la óptica de disciplinas concretas. Dichas iniciativas deben estar coordinadas para optimizar los recursos e identificar las tendencias globales, examinando estas alteraciones a escala regional o continental.
3. Es necesario identificar sitios que por sus especiales características constituyan emplazamientos adecuados para el desarrollo de estos programas de seguimiento a medio-largo plazo, ya que el aislamiento de este territorio hace logística y económicamente inviable el desarrollo de estudios en todas y cada una de las localizaciones afectadas por actividades humanas.
4. Los estudios sobre los impactos humanos deben ser diseñados de tal forma que puedan contribuir de forma directa a la toma de decisiones de gestión, mejorando la minimización y mitigación de dichas alteraciones. Esto es especialmente importante en el caso de las evaluaciones de impacto ambiental, las cuales pueden beneficiarse de las mejoras del conocimiento derivadas de las actividades de investigación en esta materia. Estos instrumentos constituyen una herramienta fundamental para decidir si una actividad puede o no desarrollarse en el Continente Blanco, por lo que este tipo de procesos deben estar consolidados sobre la mejor información disponible, especialmente en vista de la expansión de las actividades humanas que se está produciendo en los últimos años en la Antártida.

La implementación de estas recomendaciones mejoraría sustancialmente el seguimiento de los impactos humanos en la Antártida, tarea a la que contribuyen de forma destacada los científicos españoles, tal y como hemos visto a lo largo del artículo. Esta labor de monitorización resulta imprescindible para asegurar la correcta conservación de este emblemático territorio para las generaciones futuras.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto EVA-ANTARCTICA, el cual está dirigido a evaluar el impacto humano en la Antártida Marítima, con especial atención a las alteraciones de origen humano existentes en la Isla Decepción. Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación (CGL2007-28761-E/ANT y CTM2009-06604-E) y la Fundación Abertis.

Referencias

- Adamson, E., Adamson, H., Seppelt, R. 1994. Cement dust contamination of *Ceratodon purpureus* at Casey, East Antarctica: damage and capacity for recovery. *Journal of Bryology* 18:127-137.
- Ainley, D.G., Blight, L.K. 2009. Ecological repercussions of historical fish extraction from the Southern Ocean. *Fish and Fisheries* 10(1):13-38.
- Amelung, B., Lamers, M. 2007. Estimating the greenhouse gas emissions from Antarctic tourism. *Tourism in Marine Environments* 4(2):121-133.

- ASOC (Antarctic and Southern Ocean Coalition). 2004. *Environmental reports of Fildes Peninsula, 1988–1997: benchmarks for environmental management*. Antarctic and Southern Ocean Coalition report. December 2004. 15 pp.
- Ayres, E., Nkem, J.N., Wall, D.H., Adams, B.J., Barret, J.E., Broos, E.J., Parsons, A.N., Powers, L.E., Simmons, B.L. 2008. Effects of human trampling on populations of soil fauna in the McMurdo dry valleys, Antarctica. *Conservation Biology* 22:1544-1551.
- Ballance, L., Pitman, R.L., Hewitt, R.P., Siniff, D.B., Trivelpiece, W.Z., Clapham, P.J., Brownell JR, R.L. 2006. The removal of large whales from the Southern Ocean: evidence for long-term ecosystem effects? En: Estes, J.A., Demaster, D.P., Doak, D.F., Williams, T.E., Brownell JR, R.L., (eds.). *Whales, whaling and ocean ecosystems*, pp 215-230, University of California Press, Berkeley, CA, USA.
- Barbosa, A. 2011. Efectos del cambio climático sobre pingüinos Antárticos. *Ecosistemas* 20(1):94-103.
- Bargagli, R. 2008. Environmental contamination in Antarctic ecosystems. *Science of the Total Environment* 400(1-3):212-226.
- Bargagli, R. 2005. *Antarctic ecosystems: environmental contamination, climate change, and human impact*. 395 pp. Springer, Berlin, Alemania.
- Black, A. 2005. Light induced seabird mortality on vessels operating in the Southern Ocean: incidents and mitigation measures. *Antarctic Science* 17:67-68.
- Borghini, F., Grimalt, J.O., Sánchez-Hernández, J.C., Bargagli, R. 2005. Organochlorine pollutants in soils and mosses from Victoria Land (Antarctica). *Chemosphere* 58:271-278.
- Bortolotti, G.R., Marchant, T., Blas J., Cabezas, S. 2009. Tracking stress: localization, deposition and stability of corticosterona. *The Journal of Experimental Biology* 212:1477-1482.
- Bortolotti, G.R., Marchant, T.A., Blas, J. 2008. Corticosterone in feathers is a long-term, integrated measure of avian stress physiology. *Functional Ecology* 22:494-500.
- Brown, C.R., Adams, N.J. 1983. The effect of underwater explosions on ockhopper penguins *Eudyptes chrysocome*. *Cormorant* 11:68.
- Burger, J., Gochfeld, M. 2007. Responses of emperor penguins (*Aptenodytes forsteri*) to encounters with ecotourists while commuting to and from their breeding colony. *Polar Biology* 30:1303-1313.
- Campbell, I.B., Claridge, G.G.C., Balks, M.R. 1998. Short and long-term impacts of human disturbance on snow-free surfaces in Antarctica. *Polar Record* 34:15-24.
- Carlini, A.R., Coria, N.R., Santos, M.M., Libertelli, M.M., Donini, G. 2007. Breeding success and population trends in Adélie Penguins in areas with low and high levels of human disturbance. *Polar Biology* 30:917-924.
- Chen, J., Blume, H.P. 1997. Impact of human activities on the terrestrial ecosystem of Antarctica: a review. *Polarforschung* 65:83-92.
- Chown, S.L., Convey, P. 2007. Spatial and temporal variability across life's hierarchies in the terrestrial Antarctic. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* B362:2307-2331.
- Chwedorzawska, K.J. 2009. Terrestrial Antarctic ecosystems in the changing world: An overview. *Polish Polar Research* 30 (3):263-276.
- Clayton, M.N., Winncke, C., Klöser, H. 1997. New records and sub- Antarctic marine benthic macroalgae from Antarctica. *Polar Biology* 17:141-149.
- Cobley, N.D., Shears, J.R. 1999. Breeding performance of gentoo penguins (*Pygoscelis papua*) at a colony exposed to high levels of human disturbance. *Polar Biology* 21:355-360.

- COMNAP (Council of Managers of National Antarctic Programs). 2009. Antarctic facilities. Disponible en: www.comnap.aq/facilities.
- COMNAP. 1999. *An assessment of environmental emergencies arising from activities in Antarctica*. Working Paper 16 for XXIII Antarctic Treaty Consultative Meeting, Lima, 24 May-4 June 1999.
- Conlan, K.E., Kim, S.L., Lenihan, H.S., Oliver, J.S. 2004. Benthic changes during 10 years of organic enrichment by McMurdo Station, Antarctica. *Marine Pollution Bulletin* 49:43-60.
- Convey, P. 2006. Antarctic climate change and its influences on terrestrial ecosystems. En: Bergstrom, D.B., Convey, P., Huiskes, A.H.L. (eds.). *Trends in Antarctic terrestrial and limnetic ecosystems. Antarctica as a global indicator*, 253-272 pp. Springer, Dordrecht, Holanda.
- Convey, P., Frenot, F., Gremmen, N., Bergstrom, D. 2006. Biological invasions. En: Bergstrom, D.B., Convey, P., Huiskes, A.H.L. (eds.). *Trends in Antarctic terrestrial and limnetic ecosystems. Antarctica as a global indicator*, 193-220 pp. Springer, Dordrecht, Holanda.
- Corsolini, S. 2009. Industrial contaminants in Antarctic biota. *Journal of Chromatography A* 1216(3):598-612.
- Croxall, J.P., Nicol, S. 2004. Management of southern ocean fisheries: global forces and future sustainability. *Antarctic Science* 16:569-584.
- Croxal, J.P., Rivera, K., Moreno, C.A. 2007. Seabird by-catch mitigation: the southern Ocean (CCAMLR) experience, chapter 8. En: Kennelly, S.J. (ed.). *By-catch reduction in the world's fisheries*, 271-281 pp. Springer, New York, USA.
- De Villiers, M. 2008. *Review of recent research into the effects of human disturbance on wildlife in the Antarctic and sub-Antarctic region*. Working Paper 12 for XXXI Antarctic Treaty Consultative Meeting, Kiev, Ukraine, 2-13 June 2008.
- De Villiers, M., Bause, M., Giese, M., Fourie, A. 2006. Hardly hardhearted: heart rate responses of incubating northern giant petrels (*Macronectes halli*) to human disturbance on sub-Antarctic Marion Island. *Polar Biology* 29:717-720.
- Delord, K., Gasco, N., Weimerskirch, H., Barbraud, C. 2005. Seabird mortality in the Patagonian toothfish longline fishery around Crozet and Kerguelen islands, 2001-2003. *CCAMLR Science* 12:53-80.
- Devries, A.L., Ainley, D.G., Ballard, G. 2008. *Decline of the Antarctic toothfish and its predators in McMurdo sound and the southern Ross Sea, and recommendations for restoration*. CCAMLR Document.
- Dózsa-Farkas, K., Convey, P. 1997. *Christensenia*, a new enchytraeid genus from Antarctica. *Polar Biology* 17:482-486.
- Enzenbacher, D. 1992. Antarctic tourism and environmental concerns. *Marine Pollution Bulletin* 25(9-12):258-265.
- Evans, C.W., Hills, J.M., Dickson, J.M.J. 2000. Heavy metal pollution in Antarctica: a molecular ecotoxicological approach to exposure assessment. *Journal of Fish Biology* 57:A8-A19.
- Farreny, R. Oliver-Solà, J., Lamers, M. Amelung, B., Gabarrell, X., Rieradevall, J., Boada, M., Benayas, J. 2011, (en prensa). Carbon dioxide emissions of Antarctic tourism. *Antarctic Science* 00:000-000.
- Filler, D., Snape, I., Barnes, D. 2008. *Bioremediation of petroleum hydrocarbons in cold regions*. 288 pp. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Fowler, G.S. 1999. Behavioral and hormonal responses of Magellanic penguins (*Spheniscus magellanicus*) to tourism and nest site visitation. *Biological Conservation* 90:143-149.
- Fraser, W.R., Patterson, D.L. 1997. Human disturbance and long-term changes in Adélie penguin populations: a natural experiment at Palmer Station, Antarctic Peninsula. En: Battaglia, B., Valencia, J., Walton, D.W.H. (eds.). *Antarctic communities: species, structure and survival*, 445-452 pp. Cambridge University Press. Cambridge, UK.

- Frenot, Y., Convey, P., Lebouvier, M., Chown, S.L., Whinam, J., Selkirk, P.M., Skotnicki, M., Bergstrom, D.M. 2008. Antarctic biological invasions: sources, extents, impacts and implications. En: Roganfinnmore, M. (ed.). *Non-native species in the Antarctic: proceedings*, 53-96 pp. Christchurch: Gateway Antarctica
- Frenot, Y., Chown, S.L., Whinam, J., Selkirk, P., Convey, P., Skotnicki, M., Bergstrom, D. 2005. Biological invasions in the Antarctic: extent, impacts and implications. *Biological Reviews* 80:45-72.
- Goerke, H., Weber, K., Bornemann, H., Ramdhor, S., Plotz, J. 2004. Increasing levels and biomagnification of persistent organic pollutants (POPs) in Antarctic biota. *Marine Pollution Bulletin* 48:295-302.
- Gremmen, N.J.M., Smith, V.R., Van Torengen, O.F.R. 2003. Impact of trampling on the vegetation of subantarctic Marion Island. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 35:442-446.
- Gröndahl, F., Sidenmark, J., Thomsen, A. 2008. Survey of waste water disposal practices at Antarctic research stations. *Polar Research* 28: 298-306.
- Hansom, J.D., Gordon, J.E. 1998. *Antarctic environments and resources: a geographical perspective*. 402 pp. Longman Publisher, Harlow, UK.
- Harris, C.M. 2005. Aircraft operations near concentrations of birds in Antarctica: the development of practical guidelines. *Biological Conservation* 125:309-322.
- Headland, R. 2009. *A chronology of Antarctic exploration: a synopsis of events and activities from the earliest times until the international polar years, 2007-09*. Bernard Quaritch Ltd., Londres, UK.
- Headland, R. 1994. Historical development of Antarctic tourism. *Annals of Tourism Research* 21(2):269-280.
- Holmes, N.D., Giese, M., Kriwoken, L.K. 2008. Linking variation in penguin responses to pedestrian activity for best practise management on subantarctic Macquarie Island. *Polarforschung* 77:7-15
- Hughes, K.A. 2003. Aerial dispersal and survival of sewage-derived faecal coliforms in Antarctica. *Atmospheric Environment* 37:3147-3155.
- Hughes, K.A., Convey, P. 2010. The protection of Antarctic terrestrial ecosystems from inter and intra-continental transfer of non-indigenous species by human activities: a review of current systems and practices. *Global Environmental Change* 20:96-112.
- Hughes, K.A., Waluda, C.M., Stone, R.E., Ridout, M.S., Shears, J.R. 2008. Short-term responses of king penguins *Aptenodytes patagonicus* to helicopter disturbance at South Georgia. *Polar Biology* 31:1521-1530.
- Hughes, K., Ott, S., Bölter, M., Convey, P. 2006. Colonisation processes. En: Bergstrom, D.B., Convey, P., Huiskes, A.H.L. (eds.). *Trends in Antarctic terrestrial and limnetic ecosystems. Antarctica as a global indicator*, 35-54 pp. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Hughes, K.A., Nobbs, S.J. 2004. Long-term survival of human faecal microorganisms on the Antarctic Peninsula. *Antarctic Science* 16:293-297.
- IAATO (International Association of Antarctic Tour Operators) 2010. *IAATO Overview of Antarctic Tourism: 2009-10 Season and Preliminary Estimates for 2010-11 and Beyond*. XXXIII Antarctic Treaty Consultative Meeting. 24 pp., 3-14 May 2010. Punta del Este, Uruguay.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. 2009. *CO₂ emissions from fuel combustion. Highlights. 2009 edition*. Consultado en junio de 2010. Disponible en <http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>
- Kennicut, M.C., Sweet, S.T., Fraser, W.R., Stochton, W.L., Culver, M. 1991. Grounding of the Bahia Paraiso at Arthur Harbor, Antarctica. 1. Distribution and fate of oil spill related hydrocarbons. *Environmental Science and Technology* 25:509-518.

- Kim, S.L., Thurber, A., Hammerstrom, K., Conlan, K. 2007. Seastar response to organic enrichment in an oligotrophic polar habitat. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 346:66-75.
- Kittel, P. 2004. The centenary of the beginning of commercial whaling in Antarctica. XXX International Polar Symposium Gdynia. 23–25. IX. *Polish Polar Studies*:179-189.
- Klanova, J., Matykiewiczova, N., Macka, Z., Prosek, P., Laska, K., Klan, P. 2008. Persistent organic pollutants in soils and sediments from James ROSS Island, Antarctica. *Environmental Pollution* 152:416-423.
- Kock, K.H., Belchier, M., Jones, C.D. 2004. Is the attempt to estimate the biomass of Antarctic fish from a multi-species survey appropriate for all targeted species? *Notothenia rossii* in the Atlantic Ocean sector revisited. *CCAMLR Science* 11:141-153.
- Kremser, U., Klemm, P., Kötz, W.D. 2005. Estimating the risk of temporary acoustic threshold shift, caused by hydroacoustic devices, in whales in the Southern Ocean. *Antarctic Science* 17:3-10.
- Lewis, P.N., Bergstrom, D.M., Whinam, J. 2006. Barging in: a temperate marine community travels to the Subantarctic. *Biological Invasions* 8:787-795.
- Lewis, P.N., Riddle, M.J., Smith, S.D.A. 2005. Assisted passage or passive drift: a comparison of alternative transport mechanisms for nonindigenous coastal species into the Southern Ocean. *Antarctic Science* 17:183-191.
- Lohmann, R., Jaward, F.M., Durham, L., Barber, J.L., Ockenden, W., Jones, K.C., Bruhn, R., Lakaschus, S., Dachs, J., Booi, K. 2004. Potential contamination of shipboard air samples by diffusive emissions of PCBs and other organic pollutants: Implications and solutions. *Environmental Science and Technology* 38:3965-3970.
- Micol, T., Jouventin, P. 2001. Long-term population trends in seven Antarctic seabirds at Pointe Géologie (Terre Adélie): human impact compared with environmental change. *Polar Biology* 24:175-185.
- New Zealand. 2010. *The concept of human footprint in the Antarctic*. Information Paper 49. XXXIII Antarctic Treaty Consultative Meeting. 3-14 May, 2010. Punta del Este. Uruguay.
- Nicol, S., Foster, J. 2003. Recent trends in the fishery for Antarctic krill. *Aquatic Living Resources* 16:42-45.
- Northcott, K.A., Snape, I., Scales, P.J., Stevens, G.W. 2005. Dewatering behaviour of water treatment sludges associated with contaminated site remediation in Antarctica. *Chemical Engineering Science* 60:6835-6843.
- O'Brien, J.S., Todd, J.J., Kriwoken, L.K. 2004. Incineration of waste at Casey Station, Australian Antarctic Territory. *Polar Record* 40:221-234.
- Otley, H. 2005. Nature-based tourism: experiences at the volunteer point penguin colony in the Falkland Islands. *Marine Ornithology* 33:181-187.
- Pfeiffer, S., Peter, H.U. 2003. *Umsetzung des Umweltschutzprotokoll-Ausführungsgesetzes (AUG), Teilvorhaben 3: Bestandsaufnahme und Managementpläne für zwei touristisch genutzte Gebiete der Antarktis*. Umweltbundesamt, 247 pp. Berlin, Deutschland.
- Poland, J.S., Riddle, M.J., Zeeb, B.A. 2003. Contaminants in the Arctic and the Antarctic: a comparison of sources, impacts, and remediation options. *Polar Record* 39:369-383.
- Rounsevell, D., Binns, D. 1991. Mass deaths of king penguins (*Aptenodytes patagonica*) at Lusitania Bay, Macquarie Island. *Aurora* 10:8-10.
- SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research). 2006a. *SCAR report on marine acoustics on the Southern Ocean*. Working Paper 41 for XXIX Antarctic Treaty Consultative Meeting, Edinburgh, 12–23 June 2006, 17 pp.
- SCAR. 2006b. *Proposal to delist fur seals as specially protected species*. Working Paper 39 for XXIX Antarctic Treaty Consultative Meeting, Edinburgh, 12–23 June 2006, 13 pp.

- Sjoling, S., Cowan, D.A. 2000. Detecting human bacterial contamination in Antarctic soils. *Polar Biology* 23:644-650.
- Sladen, W.L., Leresche, R.E. 1970. New and developing techniques in Antarctic ornithology. *Antarctic Ecology* 1:585-596.
- Snape, I., Morris, C.E., Cole C.M. 2001. The use of permeable reactive barriers to control contaminant dispersal during site remediation in Antarctica. *Cold Regions Science and Technology* 32:157-174.
- Southwell, C. 2005. Response behaviour of seals and penguins to helicopter surveys over the pack ice off East Antarctica. *Antarctic Science* 17:328-334.
- Stark, J.S., Snape, I., Riddle, M.J., Stark, S.C. 2005. Constraints on spatial variability in soft-sediment communities affected by contamination from an Antarctic waste disposal site. *Marine Pollution Bulletin* 50:276-290.
- Stark, J.S., Riddle, M.J., Simpson, R.D. 2003. Human impacts in soft sediment assemblages at Casey Station, East Antarctica: spatial variation, taxonomic resolution and data transformation. *Austral Ecology* 28:287-304.
- Tejedo, P., Justel, A., Rico, E., Benayas, J., Quesada, A. 2005. Measuring impacts on soils by human activity in an Antarctic Special Protected Area. *Terra Antarctica Reports* 12:57-62.
- Tejedo, P., Justel, A., Benayas, J., Rico, E., Convey, P., Quesada, A. 2009. Soil trampling in an Antarctic Specially Protected Area: tools to assess levels of human impact. *Antarctic Science* 21:229-236.
- Tin, T., Fleming, Z.L., Hughes, K.A., Ainley, D.G., Convey, P. Moreno, C.A., Pfeiffer, S., Scott, J., Snape, I. 2009. Impacts of local human activities on the Antarctic environment. *Antarctic Science* 21:3-33.
- Van Ngan, P., Gomez, V., Passos, M.J.A.C.R., Ussami, K.A., Campos, D.Y.F., Rocha, A.J.D. 2007. Biomonitoring of the genotoxic potencial (micronucleus and erythrocyte nuclear abnormalities assay) of the Admiralty Bay water surrounding the Brazilian Antarctic Research Station "Comandante Ferraz," King George Island. *Polar Biology* 30:209-217.
- Van Polanen, T.D., Giese, M.A., Wotherspoon, S., Hindell, M.A. 2007. The behavioural response of lactating Weddell seals (*Leptonychotes weddellii*) to over-snow vehicles: a case study. *Canadian Journal of Zoology* 85:488-496.
- Whinam, J., Chilcott, N., Bergstrom, D.M. 2004. Subantarctic hitchhikers: expeditioners as vectors for the introduction of alien organisms. *Biological Conservation* 121:207-219.
- Wilson, R.P., Culik, B., Adelung, D. 1991. People in Antarctica – how much do Adélie penguins *Pygoscelis adeliae* care? *Polar Biology* 11:363-370.
- Wise, T. 1973. Polar Exploration. Almark Publishing Co Ltd, London. 167 pp.
- Woehler, E.J., Riddle, M.J., Ribic, C.A. 2003. Long-term population trends in southern giant petrels in East Antarctica. En: Huiskes, A.H.L., Gieskes, W.W.C., Rozema, J., Schorno, R.M.L., Van der Vies, S.M., Wolff, W.J. (eds.). *Antarctic biology in a global context*, 290-295 pp. Backhuys Publishers. Leiden, The Netherlands.
- Worm, B., Barbier, E.B., Beaumont, N., Duffy, J.E., Folke, C., Halpern, B.S., Jackson, J.B.C., Lotze, H.K., Micheli, F., Palumbi, S.R., Sala, E., Selkoe, K.A., Stachowicz, J.J., Watson, R. 2006. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science* 314:787-790.