

NOVEDADES CIENTÍFICAS EN 2015

EN CIENCIAS AMBIENTALES

¿PREFIEREN LAS ABEJAS (*APIS MELLIFERA*)
NÉCTAR CON PESTICIDAS NEONICOTINOIDES?

Las abejas de miel (*Apis mellifera*) son especies libadoras que establecen relaciones de mutualismo con las flores, puesto que para la reproducción vegetal se necesita que el polen se traslade desde las anteras hasta los estigmas, ya sea de la misma planta o de otras que se encuentran a cierta distancia, y las abejas son las encargadas de transportarlo en su patas, alas y cuerpo y depositarlo en el pistilo. A cambio, para atraer a esas libadoras imprescindibles para la polinización, las flores producen el néctar que les sirve de alimento. La composición química del néctar es compleja y puede variar dependiendo del género y las especies vegetales, pero principalmente está formada por agua (entre 70%-90%), azúcares (glucosa, sacarosa y fructosa) y otras sustancias como sales minerales, vitaminas, aminoácidos, etc.

Los beneficios sociales y medioambientales del proceso de polinización llevado a cabo por *A. mellifera* y otros insectos polinizadores es incuestionable porque no solo contribuye a la conservación de especies y al mantenimiento de la diversidad biológica, o a la mejora de la cubierta vegetal de los ecosistemas, etc., sino que juegan también un papel fundamental en la producción de alimentos, puesto que según diversos estudios aproximadamente un 35% de la producción agrícola mundial para consumo humano depende de la acción de los polinizadores. La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) ha estimado que la polinización de *A. mellifera* reporta un valor económico treinta o cuarenta veces superior al de los productos derivados de la apicultura.

A pesar de la importancia en la seguridad alimentaria y la biodiversidad, desde hace años se viene detectando a nivel mundial la disminución alarmante de las poblaciones de abejas de miel, fenómeno que se ha denominado *Síndrome o Trastorno del Colapso de la Colmena*

(*Colony Collapse Disorder, CCD*) o síndrome de despoblamiento, donde una pérdida súbita e intensa de abejas en solo tres o cuatro semanas deja a la colonia con unas pocas abejas jóvenes en una situación inviable provocando el colapso de la misma, lo que ha generado una gran preocupación en términos medioambientales y socioeconómicos. Aunque existen múltiples factores que pueden causar de forma independiente este fenómeno como consecuencia de los efectos de diversos patógenos (bacterias, virus, protozoos, ácaros y hongos) o la exposición a pesticidas sistémicos, parece que puede ocurrir también un efecto sinérgico entre todas estas causas, que afectaría al sistema inmune y provocaría la muerte masiva de las abejas.

Entre los patógenos destaca el ectoparásito *Varroa destructor*, que se encuentra ampliamente extendido y que supone una de las grandes amenazas de la *A. mellifera* debido a que se alimenta de su hemolinfa y afecta a todos los estadios de desarrollo de una abeja. Otro de los patógenos de alta prevalencia en España es *Nosema ceranae*, microsporidio que produce una enfermedad en *A. mellifera* conocida como nosemosis tipo C con un largo periodo de incubación que mantiene a la colonia en estado asintomático durante gran parte hasta que se produce el colapso por la muerte continua de abejas infectadas y la incapacidad de la reina de compensarlas. La infección de las abejas se produce al ingerir las esporas maduras de *N. ceranae*, debido normalmente a comportamientos de limpieza o trofalaxia. Estas esporas extruyen en el intestino medio infectando las células epiteliales (Fig. 1).

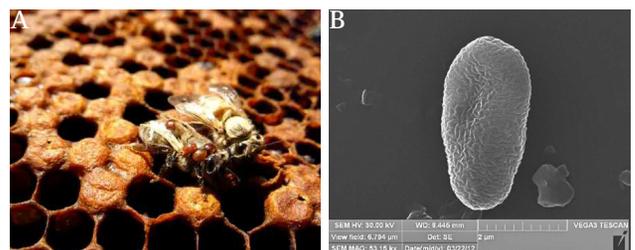


Figura 1. Diversos patógenos que pueden ocasionar o contribuir al Trastorno del Colapso de la Colmena (Colony Collapse Disorder, CCD). A) Infección por ectoparásitos *Varroa destructor*. B) Microfotografía de esporas del microsporidio *Nosema ceranae* obtenida por microscopía de barrido electrónico (SEM).

Con respecto a los plaguicidas los más usados en agricultura son herbicidas, acaricidas o fungicidas, aunque los que han sido señalados como los principales causantes de la mortalidad de colonias de abejas a nivel mundial son los insecticidas de la familia de los neonicotinoides y de los fenilpirazoles. Actualmente se utilizan en la agricultura y se aplican al suelo, semillas, en tratamientos foliares en cultivos, etc. Los neonicotinoides son compuestos derivados de la nicotina que actúan en el sistema nervioso central a nivel de los receptores nicotínicos postsinápticos (nAChRs) del neurotransmisor acetilcolina, dando lugar a una sobreestimulación de la sinapsis colinérgica que causa la parálisis del insecto y finalmente la muerte. Aunque inicialmente se consideraron productos con baja toxicidad para los insectos como *A. mellifera*, investigaciones más recientes ha indicado que pueden resultar tóxicos incluso cuando se encuentran en el néctar y polen a bajas concentraciones. La exposición crónica no suele matar directamente a las abejas, pero puede afectar a su comportamiento y habilidades para alimentarse de néctar, localización de flores, regreso a la colmena, etc.

Con el fin de determinar las consecuencias de estos productos en la colonias de abejas, en el año 2013 (R(U)E nº 485/2013 de la Comisión, de 24 de mayo de 2013) la Unión Europea decidió restringir durante un periodo de dos años el uso de los insecticidas imidacloprid, tiametoxan, clotianidina y sus metabolitos en el tratamiento de las semillas, aplicaciones al suelo y en tratamientos foliares de cultivos, aunque con algunas excepciones ya que está autorizado su uso en cereales de invierno, o en fumigaciones de cultivos atractivos para las abejas en invernadero o en campo abierto, después de la floración (Fig. 2).

Sin embargo, la evaluación del impacto de los insecticidas neonicotinoides en los insectos polinizadores ha causado gran controversia. Diversos estudios argumentan que los efectos negativos solo se registran cuando se encuentran en altas concentraciones en el néctar y el polen, y además proponen que las abejas podrían evitar la exposición o disminuirla si se les proporciona como fuentes alternativas otro tipo de flores disponibles que pueden elegir, o bien repeliesen aquellas tratadas con neonicotinoides. Para que estos últimos argumentos sean validos se requiere que los polinizadores sean capaces de detectar los neonicotinoides y así evitar la exposición. Por lo que para comprobarlo, investigadores de Institute of Neuroscience, Newcastle University, Newcastle, y del

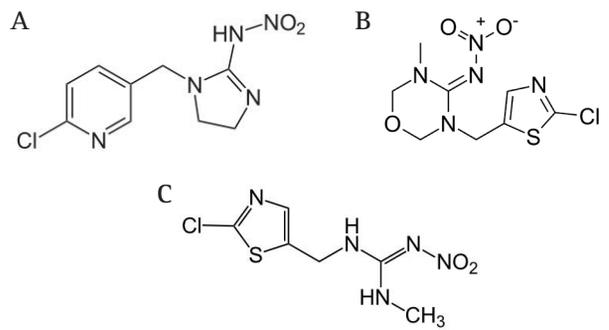


Figura 2. La Comisión Europea ha restringido el uso de algunos insecticidas neonicotinoides (derivados de la nicotina) por sus efectos en las colonias de *Apis mellifera*. A) Imidacloprid (IMD). B) Tiametoxan (TMX). C) Clotianidina (CLO).

Botany Department, Trinity College Dublin, entre otros, han llevado a cabo estudios con *A. mellifera* y abejorros comunes (*Bombus terrestris*) para determinar si son capaces de detectar los neonicotinoides y evitar así tomar néctar que contenga estos compuestos (*Nature*, 521, 74–76, 2015). Para ello han diseñado experimentos que permitan identificar los umbrales de detección gustativos para las toxinas presentes en el néctar de *A. mellifera* y *B. terrestris*. Los experimentos se llevaron a cabo con 40 cohortes (25 individuos por tratamiento) de 20 colonias diferentes de *A. mellifera* y 4 colonias de *B. terrestris*. Se dispusieron en cajas de plástico durante 24 h y se les dieron dos opciones de alimentación. Uno de los tubos a los que podían acceder, solo contenía una disolución de sacarosa (similar al néctar) mientras que en otro está disolución se encontraba mezclada con diferentes concentraciones específicas de imidacloprid (IMD), tiametoxan (TMX) y clotianidina (CLO). Los valores de concentraciones (0,5-150 nM) se encontraban dentro del rango descrito para el néctar y polen. Los resultados han demostrado que *A. mellifera* y *B. terrestris* no son capaces de detectar la presencia de estos tres pesticidas y por lo tanto, tampoco evitarlos lo que supone un riesgo cuando toman néctar contaminado. Además, comprobaron que las abejas mostraron una preferencia por las disoluciones que contenían dichos pesticidas (IMD o TMX) y que los abejorros consumieron más alimentos con pesticidas que las abejas, por lo que se expusieron a dosis más altas de insecticidas. Así mismo, observaron que ninguna de las disoluciones de sacarosa que contiene los insecticidas IMD, TMX o CLO afectan a la extensión o retracción de la proboscis (Fig. 3).

En conclusión, el consumo de néctar contaminado con neonicotinoides podría conducir a problemas de

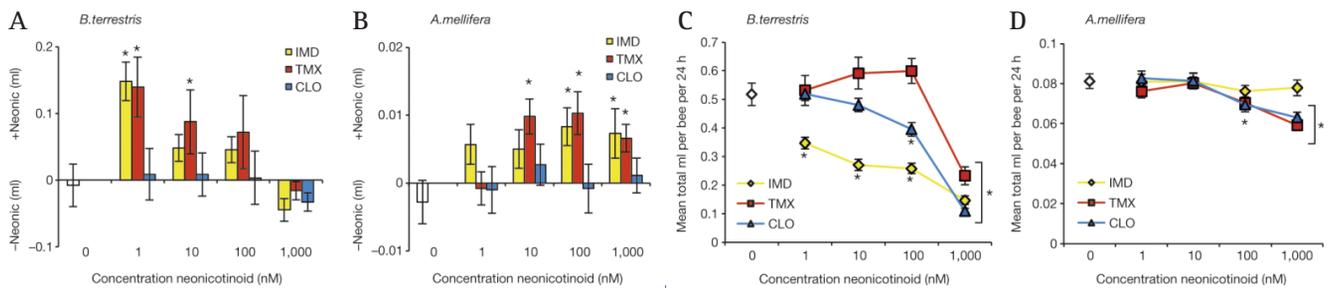


Figura 3. Las abejas recolectoras prefieren alimentarse de néctar que contiene neonicotinoides. A) y B) Tanto abejorros (*B. terrestris*) como abejas de miel (*A. mellifera*) cuando tuvieron la opción de elegir entre la disolución de sacarosa o sacarosa que contiene un pesticida neonicotinoide se alimentaron las disoluciones que contienen IMD (imidacloprid) y TMX (tiаметoxan).

comportamiento de las abejas, así como a la reducción de su eficiencia de recolección de polen. Además, al preferir las abejas recolectoras el néctar que contiene IMD y TMX llevarían estos compuestos a las colonias, que se verían expuestas a niveles más altos de neonicotinoides de lo que se preveía. Por otro lado, a raíz de estos resultados se puede cuestionar si las estrategias de mitigación basadas en la plantación de otras fuentes de néctar y polen serían suficientes para disminuir el riesgo a que están expuestos los polinizadores. Lo que parece indudable es que deben realizarse cambios en las políticas donde se contemple la reducción del uso de estos insecticidas para frenar el declive de las poblaciones de polinizadores.

GRAN IMPORTANCIA DE LA MEGAFUNA EN LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS DE NUTRIENTES

El estudio del ciclo global de nutrientes se ha centrado tradicionalmente en que éstos provienen en su mayoría de la meteorización de las rocas y, después, se transfieren a la hidrosfera por lixiviación y escorrentía o a la atmósfera como polvo o por incendios o volatilización. Así, los nutrientes fluyen lenta pero inevitablemente hacia los océanos, quedando atrapados como sedimentos marinos durante largos periodos de tiempo hasta que ciertos procesos geológicos los hacen aflorar nuevamente a la superficie y vuelven a ser meteorizados.

Hasta ahora los animales se han considerado únicamente como agentes pasivos en estos ciclos al consumir dichos nutrientes, ignorando su papel en el flujo espacial de estos elementos. Sin embargo, los animales aceleran el ciclo al transformar los nutrientes de formas más recalcitrantes en la biomasa de las plantas a formas más lábiles en los excrementos, facilitando así la liberación de estos elementos para ser reutilizados por otros seres vivos. Además, numerosos estudios han demostrado que los animales también son capaces de agilizar el flujo de

nutrientes al transferir elementos de un ecosistema a otro, actuando como vectores que ayudan a su redistribución. Así, los animales pueden transportar lateralmente nutrientes de zonas con exceso a zonas deficitarias, tanto en ecosistemas terrestres como oceánicos. Los animales también facilitan el movimiento vertical de nutrientes en el océano desde las aguas profundas, ricas en estos elementos, hacia la superficie, donde defecan y orinan. Incluso son capaces de devolver a los ecosistemas terrestres los elementos depositados en el mar al alimentarse en él y liberar los nutrientes en tierra a través de sus excrementos o la descomposición de sus cadáveres.

Entre los animales, los de gran tamaño tienen una importancia desproporcionadamente mayor que los pequeños en el transporte de nutrientes. La megafauna (animales con peso mayor de 44 kg) juega así un papel esencial en el reciclaje de los nutrientes. Tienen especial relevancia las ballenas en el movimiento vertical y lateral de nutrientes en el océano, los grandes mamíferos terrestres en el transporte lateral en los continentes y las aves marinas y peces anádromos (que nadan en el mar y en los ríos) en la transferencia de elementos del océano a tierra.

La mayoría de los ecosistemas han perdido un gran número de especies de megafauna. Aproximadamente 150 especies de grandes mamíferos se extinguieron durante el Cuaternario tardío, entre finales del Pleistoceno y principios del Holoceno, lo que ha continuado durante la Historia de la Humanidad y dura hasta nuestros días. En el océano, no se conoce la extinción de ninguna especie de ballena, pero sus poblaciones han descendido entre un 66% y un 99%, como por ejemplo la ballena azul, cuya población se ha reducido al 1% de su tamaño original en el Hemisferio Sur debido a la presión ejercida por la caza comercial. Asimismo, numerosas especies de

aves marinas y peces anádromos están amenazadas y sus poblaciones han sufrido un intenso declive.

En el pasado, cuando el mundo estaba dominado por “gigantes”, con animales de mayor tamaño medio en los océanos y tierras emergidas, éstos formaban un sistema de reciclaje de nutrientes completamente interconectado desde las profundidades del mar al interior de los continentes (Fig. 4). Sin embargo, la desaparición de la mayoría de estas grandes especies y la grave disminución de sus poblaciones ha alterado seriamente la dinámica de los nutrientes a escala global debido a las continuas presiones por parte del ser humano, pasando los animales de desempeñar un papel clave a uno secundario en la actualidad y, por tanto, reduciendo la eficiencia de este sistema de reciclaje. Esto es de especial importancia en ciertos nutrientes como el fósforo, el cual es un elemento clave en la fertilidad del planeta, pero de muy lenta redistribución y que podría agotarse en 50 años.

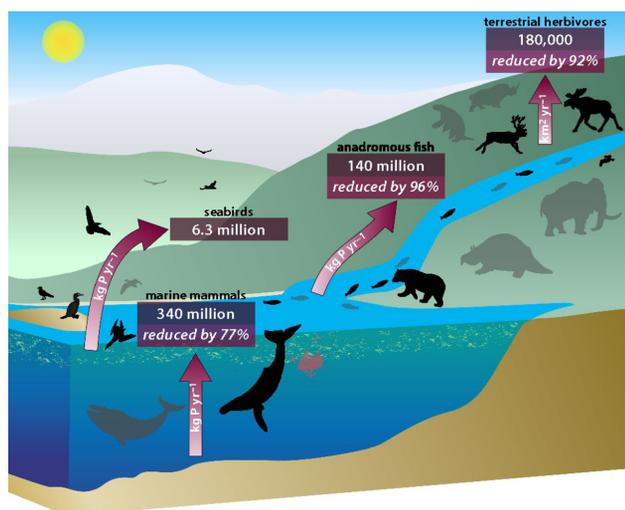


Figura 4. Sistema interconectado de reciclaje de nutrientes en el pasado. Las flechas rojas muestran el flujo o capacidad de difusión estimada de nutrientes. Los animales coloreados en gris representan los animales extinguidos o con una densidad de población reducida.

Un grupo de investigadores europeos y estadounidenses ha llevado a cabo recientemente un trabajo (*Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 868-873, 2015) para estudiar la importancia de la megafauna en el ciclo de nutrientes a escala global, comparando los cambios sufridos entre la época anterior a las grandes extinciones cuaternarias debidas al ser humano y la actualidad. Para ello, estimaron la capacidad total de los animales en la distribución de nutrientes a partir de datos sobre la distribución mundial de poblaciones y pesos de grandes animales actuales obtenidos de la Unión In-

ternacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), así como de la megafauna del Pleistoceno ahora extinguida obtenidos de otros estudios. También estimaron la capacidad de los animales para transportar los nutrientes mediante un modelo matemático similar al utilizado para calcular la difusión de calor, basándose en la biomasa animal, ritmo metabólico, densidad de población y el tiempo de tránsito intestinal, y a partir de simulaciones de movimiento aleatorio (“random walk”). Con ello, han cuantificado en distintas regiones del planeta la capacidad de distribución lateral de nutrientes por la megafauna en ambientes marinos y terrestres, el flujo vertical global de nutrientes por los mamíferos marinos hacia la superficie de los océanos y el flujo global de nutrientes del mar a los continentes por las aves marinas y los peces anádromos, tanto antes como después de las extinciones masivas.

Los resultados obtenidos de este estudio han demostrado que la disminución de las poblaciones de megafauna terrestre y de ballenas ha reducido la capacidad de los animales para distribuir lateralmente los nutrientes lejos de sus focos de concentración a un 6% de su capacidad global anterior, resultando en una menor fertilidad en las regiones distantes. En los continentes estas disminuciones no han sido homogéneas (Fig. 5), siendo Sudamérica, que antiguamente contaba con el mayor número de grandes animales, el continente que ha experimentado una reducción más drástica, con actualmente un 1% de su capacidad original, debido a la completa extinción de sus megaherbívoros (de más de 1.000 kg). En cambio, África no ha sufrido prácticamente cambios en su capacidad de distribución de nutrientes por los grandes animales, ya que estos se han conservado en su mayoría. En

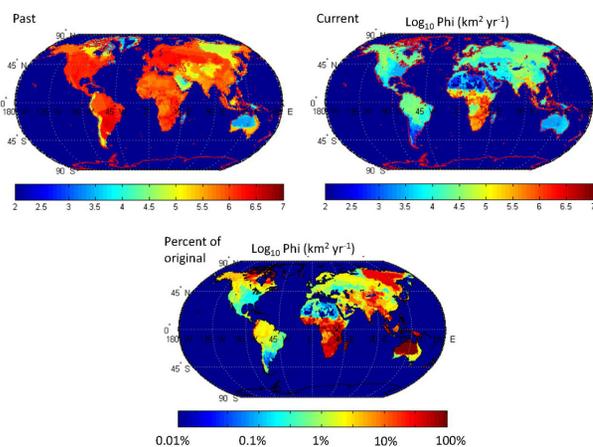


Figura 5. Capacidad de distribución lateral de nutrientes por mamíferos terrestres, en el pasado (izquierda), en el presente (derecha) y expresado en porcentaje de su valor original (abajo).

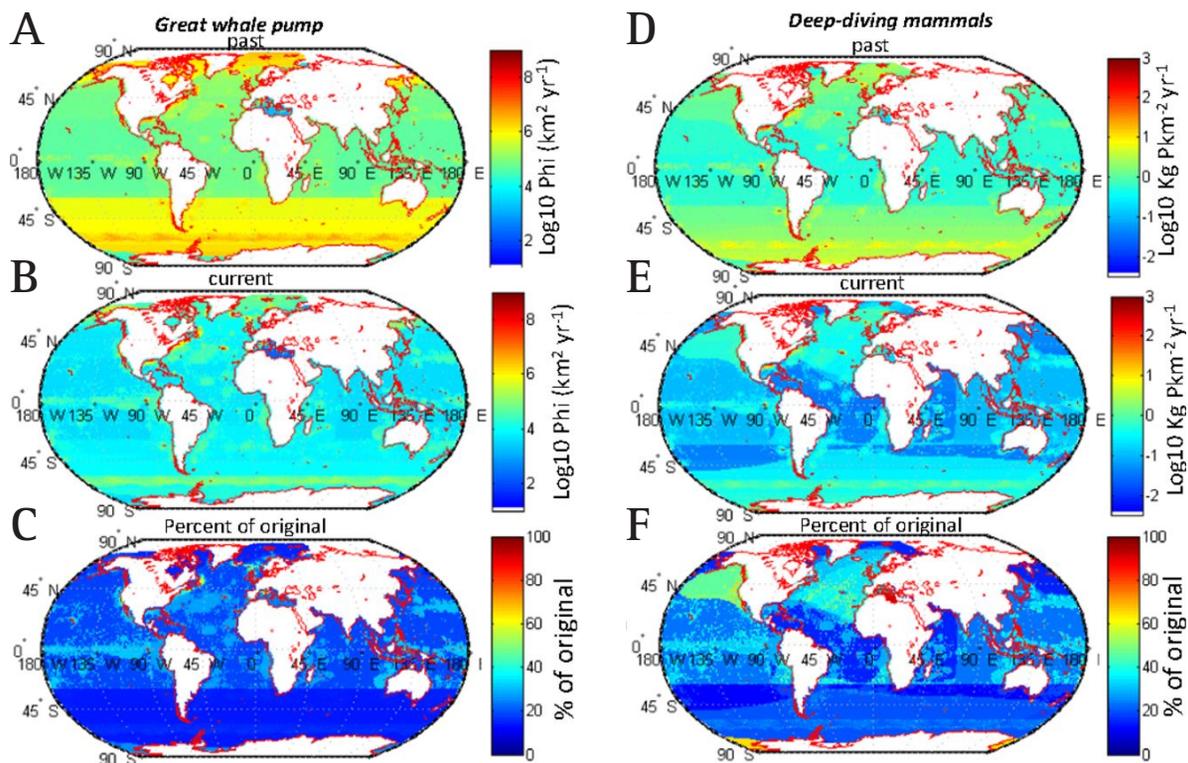


Figura 6. Capacidad de distribución lateral de nutrientes por las ballenas en el océano, en el pasado (A), en el presente (B) y expresado en porcentaje de su valor original (C). Movimiento vertical de nutrientes por mamíferos marinos, en el pasado (D), en el presente (E) y expresado en porcentaje de su valor original (F).

el océano, el movimiento lateral realizado por las ballenas es mayor que el de los ambientes terrestres, dado su enorme tamaño y gran movilidad en el agua. El océano Antártico ha sufrido mayores pérdidas de esta capacidad de distribución, siendo actualmente un 2% de su valor original, mientras que el Atlántico Norte mantiene un 14% y el Pacífico Norte un 10% (Fig. 6).

En cuanto al movimiento vertical de nutrientes en el océano, según este estudio, las ballenas y otros mamíferos marinos fueron capaces de transportar alrededor de 340 millones de kg de fósforo al año de las aguas profundas a la superficie, con lo que podría llegar a incrementar un 1% anual el contenido de fósforo de la superficie de los océanos del sur, siendo incluso posiblemente mayor el incremento de otros elementos traza. Sin embargo, tras la intensa caza sufrida por estos animales ahora sólo son capaces de mover unos 75 millones de kg de fósforo, lo que representa un 23% de su capacidad original, siendo un 16% en el Océanos Antártico, un 28% en el Atlántico Norte y un 34% en el Pacífico Norte (Fig. 6). Este transporte vertical es sumamente importante para la productividad biológica de los océanos, ya que una vez que los nutrientes descienden por debajo de la zona fótica (donde llega la luz) y se acumulan como

sedimentos en el fondo, son inalcanzables por la biota, y solo pueden liberarse mediante movimientos tectónicos o por corrientes ascendentes en zonas limitadas del océano.

En cuanto a la transferencia de nutrientes del mar a los continentes, las aves marinas fueron capaces en el pasado de devolver a la tierra 6 millones de kg anuales de fósforo a través del guano, principalmente en Eurasia (Fig. 7). Aunque tuvieron un peso considerablemente mayor los peces anádromos, transfiriendo a tierra 140 millones de kg de fósforo al año. Este tipo de peces, como el salmón, que migran del océano a los ríos donde crían y mueren, transportan los nutrientes más lejos en el interior de los continentes que las aves marinas. En la actualidad el drástico descenso sufrido por sus poblaciones ha conducido a una reducción de su capacidad de transporte a menos del 4% del valor original, debido a la sobrepesca y a la modificación de sus hábitats. Estos 146 millones de kg de fósforo totales transferidos por estos dos tipos de animales en el pasado resultarían incluso ahora insuficientes para cubrir el consumo anual de fósforo por fertilizantes (48.500 millones), el cual aumenta cada año.

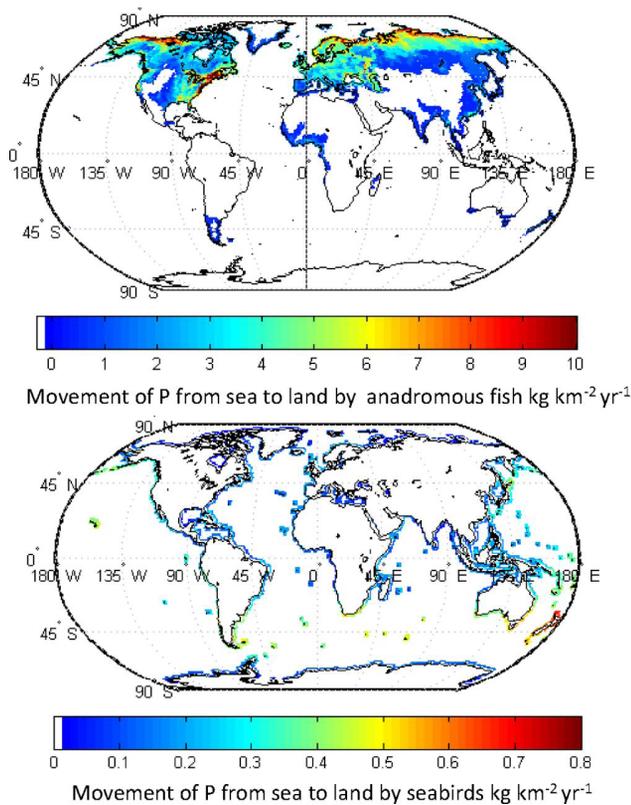


Figura 7. Transferencia de fósforo del océano a los continentes en el pasado por peces anádromos (arriba) y por aves marinas (abajo).

Así, el estudio demuestra que antes de las extinciones de la megafauna y la caza de ballenas, existió un sistema interconectado de reciclaje de nutrientes muy eficiente, en el que los mamíferos marinos transportaban nutrientes hacia la superficie, potenciando la productividad del océano que, a su vez, incrementaba la disponibilidad de alimento para aves marinas y peces anádromos y, por tanto, aumentando también el flujo de nutrientes hacia el interior de los continentes, los cuales eran después dispersados por la megafauna terrestre. De esta forma, el incremento de la productividad global sería mayor que la suma de las productividades de cada sistema por separado.

Este sistema de reciclaje tan eficiente ha sido obstaculizado en la actualidad con una gran reducción en la capacidad de transporte de nutrientes, especialmente de fósforo, por los animales grandes, extintos o muy limitados hoy día. Los animales domésticos podrían sustituir a los grandes animales del pasado en la distribución de nutrientes. Sin embargo, estos animales suelen tener movimientos restringidos debido al vallado o a su estabulación, reduciendo la difusión de nutrientes. Además, la mayoría de los sistemas ganaderos suelen ser de una

sola especie, con una pauta de comportamiento uniforme, comiendo en un determinado lugar y defecando en otro en vez de dispersar los nutrientes a través de un gradiente. Todo ello se solucionaría promoviendo sistemas ganaderos de mayor diversidad de especies y sin cerramientos. Además, la restauración de poblaciones salvajes de grandes herbívoros en zonas ya despobladas de ellos, así como la recuperación de poblaciones de ballenas, aves marinas y peces anádromos, podría mejorar enormemente la productividad de los ecosistemas al transferir nutrientes a zonas oligotróficas y potenciar el contenido en hierro y nitrógeno en la superficie del océano.

LOGROS CONSEGUIDOS POR EL PROTOCOLO DE MONTREAL EN LA PROTECCIÓN DE LA CAPA DE OZONO

Desde los años 70 ha habido una gran preocupación por la amenaza que suponen los clorofluorocarbonos (CFC) a la capa de ozono que nos protege de la radiación ultravioleta, al sugerirse que el cloro derivado de estos compuestos podría alcanzar la estratosfera y destruir dicha capa. A mitad de la década de los 80 la comunidad científica dio la voz de alarma tras el descubrimiento del llamado agujero de ozono en la Antártida, donde había habido una gran pérdida de ozono catalizada por el cloro y el bromo en las capas bajas de la estratosfera, la cual es potenciada por las temperaturas extremadamente bajas de esta región polar. También se observaron pérdidas importantes en la región Ártica, aunque mucho menores y más variables que en la región Antártica.

Ante esta situación alarmante, se firmó en 1987 el Protocolo de Montreal, en el que los países firmantes se comprometían a limitar la producción de CFCs y otros compuestos responsables del agotamiento de ozono (ODS, *ozone-depleting substances*). Tras las regulaciones impuestas por este tratado internacional, los niveles de cloro atmosférico alcanzaron un pico de 3,6 ppbv (partes por billón en volumen) en 1993 y a partir de entonces comenzaron a bajar, hasta situarse actualmente en valores un 10% más bajos que los de 1993. La mayoría de los principales ODS pueden permanecer en la atmósfera durante largos periodos de tiempo, incluso décadas, por lo que el ozono estratosférico tarda un tiempo en recuperarse tras la reducción en las emisiones de cloro y bromo. Se estima que el cloro no descenderá al nivel existente en 1980 hasta mediados de este siglo.

En las latitudes medias del Hemisferio Norte, los niveles de ozono estratosférico alcanzaron su mínimo valor a mitad de los 90, siendo 6%-8% menores que durante el periodo 1964-1980. Hoy en día estos niveles han ascendido, aunque siguen situándose en un 4% por debajo del periodo mencionado. Sin embargo, el agujero de ozono de la Antártida continúa apareciendo cada año en primavera, llegando a destruirse localmente casi el 100% del ozono de la baja estratosfera y disminuyendo el espesor de la capa de ozono por debajo del umbral establecido para definirlo como agujero, los 220 DU (unidades Dobson, que equivalen a un espesor de esta capa de 0,01 mm en condiciones normales de presión y temperatura). También se siguen observando pérdidas sustanciales de ozono en el Ártico en algunos años entre finales del invierno y principio de la primavera, cuando las temperaturas estratosféricas son extremadamente bajas, como ocurrió especialmente en 2011 (véase 100cias@uned, N° 4 nueva época, 78-83, 2011). Durante ese año se llegó a destruir en el Polo Norte el 80% del ozono de la baja estratosfera con espesores algo inferiores a 275 DU a 18-20 km de altitud, aunque estas pérdidas fueron inferiores y de menor extensión que en el Polo Sur y sin llegar a ser considerado un agujero.

Numerosos estudios científicos han investigado los logros alcanzados por el Protocolo de Montreal, analizando los impactos que se producirían en el llamado "mundo evitado", escenario mundial resultado de no haberse cumplido este tratado. Sin embargo, todos estos trabajos se han centrado en cómo sería este escenario a largo plazo, a mediados o finales del siglo XXI. Por ello, un estudio llevado a cabo por investigadores del Reino Unido, de los Países Bajos y de Nueva Zelanda (*Nature Communications*, 6, 7233, 2015) han simulado dicho "mundo evitado", pero esta vez analizando lo que hubiera ocurrido actualmente y durante las dos décadas siguientes a la firma del Protocolo de Montreal para analizar los logros conseguidos hasta ahora. En este estudio han aplicado un modelo químico-climático tridimensional durante el periodo 1979-2013 en un escenario alternativo en el que la producción de ODS habría seguido aumentando un 3% cada año tras 1987 (escenario sin Protocolo de Montreal), y lo han comparado con los resultados obtenidos aplicando dicho modelo pero utilizando los datos observados reales de ODS durante ese mismo periodo de tiempo (escenario con Protocolo de Montreal).

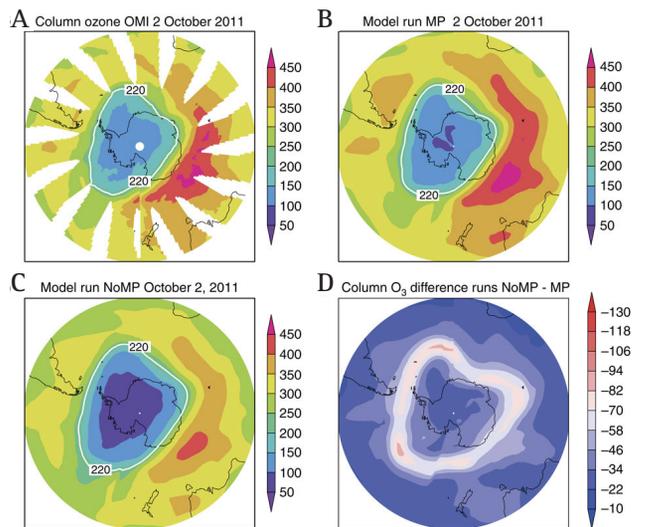


Figura 8. (A) Estado de la capa de ozono en la región antártica en octubre de 2011 (medido en DU) observado mediante satélite por el OMI (Ozone Monitoring Instrument), (B) estimado por el modelo con Protocolo de Montreal, (C) estimado por el modelo sin Protocolo de Montreal y (D) diferencias entre los modelo con y sin Protocolo de Montreal.

Mediante las comparaciones entre ambos escenarios simulados se han observado diferencias menos acusadas en los trópicos, con 10 DU (5%) menos en el escenario sin Protocolo, mientras que en las densamente pobladas latitudes medias del Hemisferio Norte, el Protocolo de Montreal ha conseguido evitar que el espesor de la capa de ozono disminuya entre un 5%-10%.

La situación hubiera sido mucho más dramática en las regiones polares, con una pérdidas de ozono muchísimo mayores sin el Protocolo de Montreal, especialmente en el Antártico (Fig. 8). En esta región polar don-

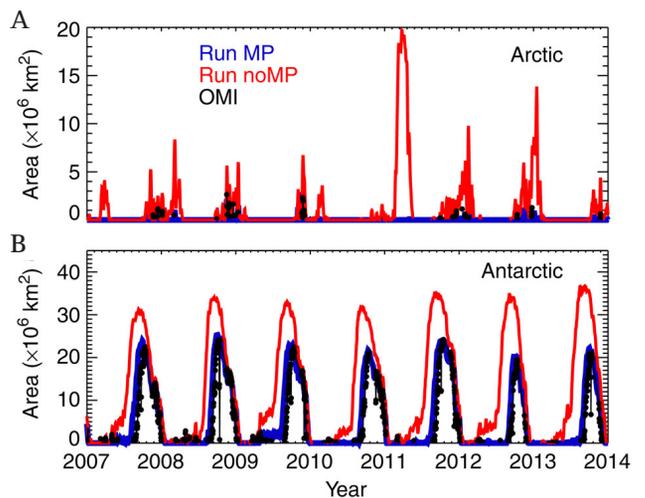


Figura 9. Extensión del agujero de la capa de ozono en el Ártico (A) y en el Antártico (B) de 2007 a 2014, observada por el OMI (negro), estimada por el modelo con Protocolo de Montreal (azul) y estimada por el modelo sin Protocolo de Montreal (rojo).

de incluso con Protocolo ya se registran pérdidas del 100% en las capas bajas de la estratosfera cada año en octubre, el modelo mostró pérdidas adicionales de hasta 100 DU sin este tratado, que se podrían haber reflejado en una mayor extensión del agujero, en un agotamiento de ozono en un rango más amplio de altitud o en una mayor duración durante el año. Así, según estas simulaciones, el Protocolo de Montreal ha evitado que el agujero de ozono antártico aumente en un 40% y que comience con mayor antelación cada año (Fig. 9).

También es de especial importancia la crítica situación evitada por el Protocolo de Montreal en la región ártica (Fig. 10). Las observaciones reales realizadas mediante satélites registraron en el invierno 2010/11 un mínimo histórico de 230 DU durante varias semanas. Sin embargo, en el escenario sin protocolo el modelo indicó en estas mismas fechas valores sin precedentes en el espesor de la capa de ozono, inferiores a los 120 DU, y que llegaron a durar meses. Las limitaciones en la producción de ODS por el Protocolo de Montreal han evitado hasta ahora que se produzca en la región ártica un agujero en la capa de ozono (tomando como umbral espesores de 220 DU), a pesar de la gran destrucción ocurrida en 2011 por las bajas temperaturas. Pero sin dicho tratado se hubiera producido un agujero considerable, incluso de extensión similar al observado en el Antártico, y no solo durante ese invierno, sino también durante otros inviernos más recientes (Fig. 9).

Proteger la capa de ozono es de vital importancia. Por una parte, la destrucción de esta capa puede tener serias consecuencias sobre la circulación atmosférica y al clima global. Por otra parte, la pérdida de ozono conlleva a un grave incremento de la radiación ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra, lo cual resulta muy perjudicial para la flora y fauna y también para el ser humano, dando lugar a un significativo aumento en la frecuencia de cánceres de piel, enfermedades oculares, entre otros. Este estudio muestra también que en un escenario sin Protocolo, el índice ultravioleta (UVI) aumentaría en todas las latitudes del planeta, alcanzando un incremento medio anual del 20% en la región antár-

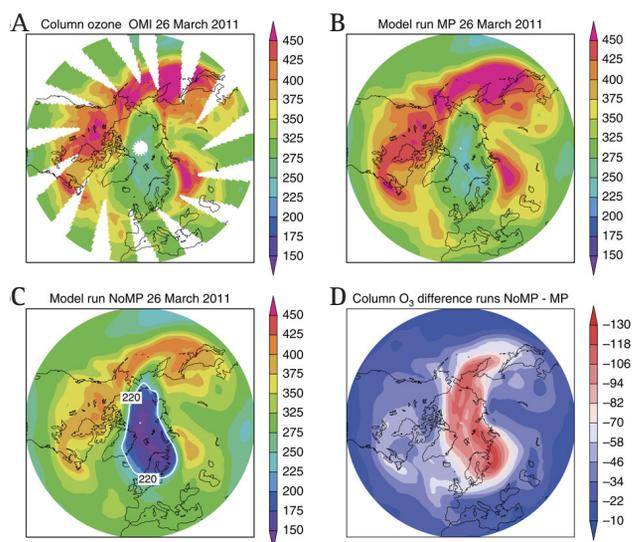


Figura 10. (A) Estado de la capa de ozono en la región ártica en el invierno 2010/2011 (medido en DU) observado mediante satélite por el OMI (Ozone Monitoring Instrument), (B) estimado por el modelo con Protocolo de Montreal, (C) estimado por el modelo sin Protocolo de Montreal y (D) diferencias entre los modelos con y sin Protocolo de Montreal.

tica al 5% en los trópicos. En las regiones de latitudes medias, donde la población es más sensible a la radiación UV, ésta se habría incrementado en un 14% en el Norte de Europa y entre un 8% y un 12% en Australia y Nueva Zelanda, países con el mayor índice de mortalidad por cáncer de piel.

Los resultados de este estudio muestran así que el Protocolo de Montreal ha logrado en unas pocas décadas reducir la destrucción de la capa de ozono, evitando un escenario mundial con agujeros frecuentes en la región ártica, con un agujero más grande en la Antártida y con una considerable destrucción de ozono en las zonas de latitudes medias. Estudios como este podrían facilitar nuevos acuerdos con países aún no firmantes del tratado y ayudar a reforzar los compromisos adquiridos en la protección del medio ambiente.

Consuelo Escolástico León
Javier Pérez Esteban

Dpto. de Química Orgánica y Bio-Orgánica