EL ANTROPOCENO: ¿ÉPOCA GEOLÓGICA O/Y DECLARACIÓN POLÍTICA?

Alejandro Cearreta
Universidad del País Vasco

1. INTRODUCCIÓN

En menos de dos décadas, el concepto Antropoceno, que fue acuñado inicialmente por Crutzen / Stoermer (2000), ha crecido asombrosamente entre las diferentes comunidades académicas (fig. 1). Este término fue establecido para expresar cómo las actividades humanas han modificado el funcionamiento de los procesos geológicos que operan en la superficie de nuestro planeta. En consecuencia, los patrones de comportamiento de los océanos, la atmósfera, la superficie de la geosfera, la criosfera, la biosfera y el clima ya no son los que caracterizaron la Tierra durante la mayor parte de los últimos 11 000 años (la denominada época Holoceno). Esta propuesta respondía a las señales que la comunidad científica había identificado previamente sobre la naturaleza, la escala y la velocidad del cambio global, y el término pronto comenzó a ser muy utilizado como si ya formara parte de la nomenclatura oficial del tiempo geológico. Sin embargo, aún no se trata de un término formal ya que todavía no ha pasado por ninguno de los extensos análisis, debates, acuerdos y ratificaciones que son necesarios por parte de las distintas instituciones geológicas.

Pocos años después de la primera aparición del concepto, la Sociedad Geológica de Londres sugirió que el Antropoceno podría tener interés y que debería analizarse de cara a su posible formalización. Esta sugerencia contrastaba con la respuesta general que tradicionalmente había tenido la comunidad geológica a las propuestas esporádicas de una «era humana» que habían sido realizadas desde finales del siglo XIX (por ejemplo, Stoppani 1873). Estas propuestas habían sido rechazadas porque se creía que las grandes fuerzas naturales que impulsan la geología de la Tierra operan a una escala mucho más extensa y a más largo plazo

Figura 1. Crecimiento exponencial en el número de publicaciones y citas bibliográficas que han utilizado el término «Anthropocene» (en inglés) durante los últimos 20 años según el buscador Web of Science (consultado el 21 de noviembre 2017).

que cualquier tipo de impacto humano que, en comparación, podía considerarse prácticamente insignificante. Sin embargo, la reciente comprensión de que los humanos quizás estaban afectando significativamente no solo los parámetros del Sistema Tierra sino también el curso de la evolución geológica del planeta, condujo a la Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS) a establecer en 2009 un grupo de trabajo sobre el Antropoceno (AWG-Anthropocene Working Group) con el fin de examinar la cuestión de su posible formalización como nuevo tiempo geológico.

2. EL ANTROPOCENO GEOLÓGICO

En un sentido geológico, el Antropoceno sería una unidad de la historia de la Tierra que podría entrar a formar parte de la escala del tiempo geológico. Como la historia de nuestro planeta anterior a la documentación humana solo puede inferirse a partir del registro de las rocas, este enfoque basado en las evidencias geológicas materiales es fundamental para poder comparar la historia más moderna y más antigua de este planeta y, por lo tanto, para medir la perturbación provocada por los humanos. El Antropoceno geológico, por consiguiente, debe situarse dentro de las reglas y pautas establecidas que se aplican a todas las demás unidades de la escala del tiempo geológico. Por ejemplo, en este contexto es fundamental que su inicio sea sincrónico en todo el planeta.

El Antropoceno geológico no puede ser una unidad diacrónica de la historia cultural humana como lo son el Paleolítico o el Neolítico, que se desarrollaron repetidas veces de modo independiente y aislado por el planeta a lo largo del tiempo. De hecho, las descripciones del Antropoceno como una «época humana» pueden conducir, en algunos aspectos, a una cierta confusión. El Antropoceno se considera como una época geológica de la historia de la Tierra, al igual que el resto de las épocas geológicas previas. Es cierto que sus características distintivas hasta ahora han sido provocadas por una variedad de acciones humanas. Pero, si esas mismas características (como los niveles elevados de dióxido de carbono en la atmósfera, las anomalías de isótopos globales de carbono y nitrógeno, una biosfera modificada por eliminaciones e invasiones de especies etc., que mencionaremos más adelante) hubieran sido provocadas por cualquier otro fenómeno, como por ejemplo un impacto de meteorito, unas erupciones volcánicas o la actividad de cualquier otra especie, tendrían exactamente la misma importancia geológica.

El Antropoceno representa un episodio extraordinario en la historia de la Tierra, una narración que está inconclusa pero que ha comenzado con mucha fuerza y que tiene una gran importancia para las comunidades humanas actuales

y futuras. Su análisis en términos geológicos clásicos es un ejercicio útil tanto para la comunidad geológica como para las personas ajenas a esta ciencia.

El inicio del Antropoceno no necesita basarse en las primeras huellas significativas de la actividad humana (por ejemplo, el comienzo de la agricultura hace unos 10 000 años). Sin embargo, ya que debe estar fundamentado en las características de los sedimentos y las rocas, debería proporcionar la división geológica más clara, más reconocible y más sincrónica posible.

A pesar de la gran cantidad de trabajo que se ha realizado durante los últimos dos siglos, los límites del tiempo geológico aún siguen siendo difíciles de definir. Básicamente, todos los límites establecidos en la escala del tiempo geológico representan un compromiso ya que el Sistema Tierra es tan complejo que pocas o ninguna de sus muchas variables responden simultáneamente y al mismo ritmo en todo el planeta. La identificación de un límite es una cuestión de consenso y de conveniencia ya que todos los límites definidos para dividir la historia del planeta deben ser prácticos para el desarrollo del trabajo geológico y un reflejo de los acontecimientos reales que ocurrieron en la Tierra. El punto crucial es que ningún límite es perfecto, aunque si se define de la forma más cuidadosa y precisa posible según las evidencias disponibles en cada momento, constituye una herramienta esencial para comprender y comunicar la evolución de nuestro cambiante planeta.

Una característica peculiar del Antropoceno y del propio mandato del AWG es la de tener presente además el gran interés de la comunidad científica en la formalización de este intervalo de tiempo geológico, ya que un Antropoceno formal puede influir sobre las diferentes ramas de la ciencia y sus comunidades científicas. Pero, curiosamente, se ha cuestionado por parte de la propia comunidad geológica si esta formalización del Antropoceno aportaría alguna utilidad a la Geología misma (por ejemplo, Finney / Edwards 2016). Estas críticas ignoran varias cuestiones relevantes. A nivel general, los conceptos y sus nombres en la ciencia se asignan para poder definir distintos fenómenos que son claramente separables de otros y así facilitar la discusión científica. Por lo tanto, la pregunta

inicial debe ser si el Antropoceno posee una realidad demostrable como unidad geológica de tiempo y como unidad material de estratos. La respuesta es que el Antropoceno se caracteriza por una variedad de evidencias generalizadas de naturaleza litológica, paleobiológica y geoquímica que pueden rastrearse en la mayor parte de la superficie terrestre. Algunas de estas evidencias están presentes también en otras unidades geológicas más antiguas (por ejemplo, las anomalías de isótopos de carbono), pero otras señales antropocénicas son completamente novedosas y no aparecen en los sedimentos pretéritos (como, por ejemplo, los radionúclidos artificiales o los plásticos).

Si bien los cambios asociados con el Antropoceno han sido hasta ahora geológicamente breves, sus consecuencias han provocado una modificación muy clara de la Tierra hacia una nueva trayectoria, con efectos que persistirán durante siglos, milenios e incluso millones de años (y que, en muchos casos, probablemente se intensificarán a corto y medio plazo). Algunos de estos cambios son irreversibles, incluso si la humanidad y sus consecuencias ambientales pudieran desaparecer mañana mismo, como por ejemplo los efectos físicos de los estratos urbanos, los efectos químicos en la atmósfera y los océanos por la liberación masiva de carbono, o los efectos biológicos de las eliminaciones, invasiones y redistribuciones de especies que aparecerán en el registro de las rocas futuras como una ruptura paleontológica muy evidente. Puede afirmarse, por lo tanto, que el Antropoceno ya tiene importancia a largo plazo para el registro geológico y que es claramente una realidad geológica diferenciada de tiempo, de procesos y de estratos.

3. LAS EVIDENCIAS DEL ANTROPOCENO

Existe una amplia gama de indicadores que aparecen en los estratos geológicos recientes y que reflejan los principales impactos humanos identificados sobre el Sistema Tierra. Estos indicadores potencialmente pueden ser utilizados en la

definición geológica del Antropoceno y correlacionarse ampliamente por todo el mundo y en la mayoría de los entornos ambientales.

Varias de estas señales reflejan el enorme gasto energético antropogénico que ha tenido lugar desde mediados del siglo XX, principalmente a partir de los hidrocarburos (por ejemplo, el marcado cambio en los isótopos de carbono de la atmósfera). Este gasto de energía ha sido crucial para impulsar el desarrollo industrial que ha dado lugar a indicadores geológicos adicionales (contaminantes orgánicos e inorgánicos, plásticos, cemento etc.) que, a su vez, han provocado severos impactos sobre la biosfera. Estas señales se extienden de una manera u otra en muchos o en todos los ambientes geológicos de nuestro planeta.

Las rocas antropogénicas

El hormigón es el material de construcción más utilizado por los humanos y, por lo tanto, la roca sedimentaria antropogénica más abundante del planeta. Su proceso de fabricación necesita la extracción y el transporte de enormes cantidades de rocas. Dependiendo de las condiciones ambientales, es probable que el hormigón se preserve a una escala de miles de años y que una vez hayan transcurrido millones de años los procesos geológicos lo recrystalizarán en otros minerales, aunque se puedan preservar algunos aspectos de su textura y de su forma que fueron generados por los humanos. Su enorme producción (unos 500 mil millones de toneladas desde mediados del siglo XX; Waters *et al.* 2016) y su especificidad mineralógica y geoquímica convierten al hormigón en un buen marcador del Antropoceno terrestre.

Aunque la tecnología para fabricar ladrillos es muy antigua, fue durante la Revolución Industrial cuando la producción de estos materiales de construcción se expandió para satisfacer la necesidad de crecimiento urbano y de nuevas infraestructuras, aunque a lo largo del siglo XX fue perdiendo cuota a favor del hormigón. La materia prima para la fabricación de ladrillos es la arcilla, que se metamorfiza artificialmente a elevadas temperaturas para producir un material

Figura 2. Playa cementada (*beachrock*) de Tunelboca (Bizkaia), constituida por escorias de fundición procedentes de la industria local de hierro y que contiene abundantes tecnofósiles, sobre todo ladrillos de producción local (marca Suarri) junto con otros de origen escocés (marca Glenboig) (Foto: Roberto Martínez).

más duro mediante transformaciones minerales. La composición de los ladrillos no ha variado prácticamente en los últimos 200 años pero, con el desarrollo del transporte global de materiales de construcción durante la segunda mitad del siglo XX, las variedades de ladrillos que antes estaban restringidas a un mercado regional se han ido distribuyendo a nivel planetario (fig. 2). Aunque se puedan preservar durante milenios, es poco probable que los ladrillos se conserven en su estado actual durante millones de años, aunque sin duda dejarán marcas fósiles.

Los humanos, a través de su actividad erosiva en la superficie terrestre, han incrementado la carga de sedimentos fluviales que se transportan hacia el océano, aunque paradójicamente al mismo tiempo han disminuido los aportes fluviales hacia el mar debido a la construcción generalizada de embalses y presas

que retienen esos mismos sedimentos. Syvitski / Kettner (2011) observaron que este aumento y reducción de las cargas de sedimentos globales se han ido compensando mutuamente desde mediados del siglo XX, con un aporte global de sedimentos a las zonas costeras que se ha reducido en un 15 % con respecto a los niveles previos. El sedimento acumulado artificialmente en las presas a nivel mundial es hoy equivalente a la descarga de todos los ríos del planeta durante un intervalo de 200 años. Dicho de otra manera, el depósito de sedimentos almacenado en los embalses a escala planetaria equivale a una acumulación de fango y arena de unos 5 m de espesor que cubra toda la superficie de España.

La neobiota

Los fósiles que aparecen en las rocas han sido tradicionalmente los marcadores más importantes para llevar a cabo la división del tiempo geológico correspondiente a los últimos 541 millones de años de la Tierra (el denominado Eón Fanerozoico). Por lo tanto, es importante considerar los cambios recientes en la biota del planeta, sus eliminaciones, sus reemplazamientos y sus patrones cambiantes de distribución biogeográfica, porque estos pueden ser marcadores importantes para definir el límite basal del Antropoceno.

Los fósiles se usan en Geología por dos razones principales. En primer lugar, para conocer el cambio ecológico y evolutivo de la biosfera a lo largo del tiempo, de modo que esos restos de organismos actúan como indicadores de los cambios climáticos, oceanográficos y de otro tipo que hayan podido ocurrir en el pasado. En segundo lugar, los fósiles se utilizan rutinariamente para asignar una edad a las rocas que los contienen, ya que la evolución biológica actúa como una flecha del tiempo y las distintas especies que se van sucediendo a lo largo de los miles y millones de años no se repiten con el tiempo. De este modo, las rocas del Cretácico o del Cuaternario contienen organismos fósiles muy diferentes entre sí y estos fósiles permiten correlacionar las rocas que tienen un mismo contenido fósil al ubicarse en el mismo segmento cronológico de la escala del tiempo geológico.

La globalización acelerada durante el siglo XX incluyó la propagación planetaria de diferentes especies vegetales de utilidad agrícola, y esto aparece bien reflejado en el registro sedimentario. Por ejemplo, la producción actual de maíz, presente ahora en todos los continentes excepto en Groenlandia y la Antártida, supera los 1000 millones de toneladas por año, más que el arroz (500 millones de toneladas en 2016) y el trigo (750 millones de toneladas en 2016). El maíz deja un registro fósil de polen y fitolitos muy característico, pero su registro de translocación por todo el planeta es altamente diacrónico, reflejando el desarrollo cultural humano a lo largo del tiempo en diferentes regiones incluso antes de su reciente globalización. Por ello, este cultivo domesticado no proporciona una señal isócrona que pueda usarse para ubicar el límite inferior del Antropoceno en todo el mundo.

Una tendencia reciente de la biosfera en su conjunto es la creciente pérdida de biodiversidad y la homogeneización global de la flora y la fauna. Aunque la extinción real de especies en los últimos siglos ha sido pequeña, se considera que un porcentaje muy elevado de organismos (por ejemplo, el 25 % de los mamíferos o el 41 % de las especies de anfibios) están en peligro de extinción. En la actualidad, la presión creciente que existe sobre la biodiversidad es similar a la que tuvo lugar durante los cinco eventos de extinción masiva identificados a lo largo de la historia de la Tierra. Aunque todavía no estamos en la sexta extinción masiva, la presión directa y continuada de las actividades humanas y la presión indirecta de la aceleración del cambio climático podrían conducir a un nuevo evento de extinción.

La tecnosfera y los tecnofósiles

La tecnosfera es el sistema global autónomo y omnipresente que incluye a los seres humanos y sus diferentes redes tecnológicas. Se trata de un sistema geológicamente muy joven, siendo la «esfera» más reciente de la Tierra que se une a las cuatro esferas clásicas de aire (atmósfera), agua (hidrosfera), rocas (litosfera)

y vida (biosfera). Cada una de estas esferas depende a su vez de los recursos y servicios proporcionados por las otras esferas hermanas para mantener su propia operatividad. Sin embargo, la tecnosfera actualmente está afectando a la capacidad de las demás esferas para satisfacer su demanda creciente de materias primas y de otros servicios esenciales, como el reciclaje de sus residuos. La tecnosfera comparte con las otras esferas más antiguas una característica crítica de gran importancia para los humanos: sin los recursos que la tecnosfera pone a nuestra disposición, una gran parte de la población humana del Antropoceno no podría sobrevivir. Por ejemplo, Erisman *et al.* (2008) consideran que la mitad de la población mundial actual depende para su supervivencia de la fijación artificial de nitrógeno para fabricar fertilizantes a escala industrial. Por lo tanto, la tecnología, como el aire, el agua, el suelo y los alimentos, se ha convertido en una necesidad para la vida humana (Haff 2014).

La señal estratigráfica de los seres humanos también se ha hecho evidente a partir de sus propios artefactos, es decir, de los tecnofósiles del futuro en el sentido de Zalasiewicz *et al.* (2014, 2016). Estos tecnofósiles representan un registro físico de la evolución de la tecnosfera y tienen unas características distintivas que los diferencian de otros fósiles. Por ejemplo, generalmente se fabrican a partir de materiales que son raros en la naturaleza o que no se encuentran de forma natural, como el plástico. Además, se producen en una gran variedad de formas que no tienen paralelismo en la naturaleza, desde una herramienta lítica trabajada a mano que es fácilmente distinguible (por su modo de fractura) de un guijarro erosionado naturalmente, hasta un teléfono móvil fabricado con plástico, vidrio y diferentes metales. Los tecnofósiles a menudo se elaboran con materiales que poseen una gran durabilidad geológica a largo plazo. Por ello, es posible considerar el desarrollo de una tecnoestratigrafía que incluya la sucesión de tecnofósiles en intervalos sucesivamente más jóvenes de estratos sedimentarios, por ejemplo con herramientas líticas en la parte inferior y teléfonos móviles en la zona superior.

Aunque los diferentes tipos de tecnofósiles desarrollados inicialmente (herramientas líticas, huesos tallados, cerámicas, ladrillos, vidrios etc.) suelen mostrar

patrones estratigráficos diacrónicos en el tiempo y, por tanto, no aportan un grado de resolución adecuado para la correlación a nivel global, los tecnofósiles que se desarrollaron durante el siglo XX pueden ofrecer una mayor utilidad para la tecnoestratigrafía, ya que incluyen tipos de tecnofósiles con los que es posible realizar una clasificación taxonómica comparable a la taxonomía biológica. Por ejemplo, un «taxón genérico» podría ser el bolígrafo, patentado por primera vez en el año 1888, pero desarrollado para su fabricación en 1943 por los hermanos Biro. Su producción comercial masiva fue posterior a la Segunda Guerra Mundial e incluyó diferentes modelos («especies») de bolígrafo. Una «especie» de bolígrafo indicadora del Antropoceno podría ser el conocido Bic Cristal, producido por primera vez en 1950 y que actualmente cuenta con más de cien mil millones de unidades vendidas (y desechadas posteriormente). Dentro de esta «especie» Bic Cristal, las variantes subespecíficas podrían reflejar la sustitución en 1961 de la punta de acero inoxidable por la punta de carburo de tungsteno que se utiliza actualmente y que es más duradera. Otros tecnofósiles indicadores del Antropoceno podrían ser las tarjetas de crédito y las bolsas de polietileno que aparecieron comercialmente alrededor de 1950. Los estratos del Antropoceno ligeramente más jóvenes podrían estar marcados por los discos compactos que aparecieron en 1982. Todos estos tecnofósiles comerciales de producción masiva alcanzaron una distribución global casi instantánea.

Debido a la capacidad moderna de fabricación industrial masiva, la cantidad y variedad de diferentes «familias», «géneros» y «especies» de tecnofósiles, aunque nunca se han contabilizado adecuadamente, superan con creces la diversidad biológica actual y podría ser ahora comparable con la diversidad biológica total que ha existido en la Tierra a lo largo de toda su historia (Zalasiewicz *et al.* 2016). Por lo tanto, su potencial estratigráfico práctico es muy grande, incluso de una pequeña selección de algunos «taxones» más comunes.

Los plásticos son una invención sorprendente que floreció a finales del siglo XX y principios del XXI. Son ligeros y robustos, fáciles de producir y pueden diseñarse con las propiedades que sean necesarias (grandes, pequeños, lisos,

rugosos, flexibles, elásticos, rígidos, transparentes, coloreados y así sucesivamente). Los usamos en casi todas partes, sea en el hogar, el trabajo, los viajes o en las herramientas y máquinas. La mayoría de los plásticos que ahora utilizamos, al final de su ciclo de vida (que es a menudo muy breve) se acumulan en el ambiente, donde continuarán siendo preservables a largo plazo. A medida que los plásticos comenzaron a producirse y acumularse a una escala global significativa después de la Segunda Guerra Mundial, se convirtieron en un importante marcador estratigráfico para caracterizar el Antropoceno.

La mayoría de los plásticos son totalmente sintéticos, principalmente hechos a partir de productos petroquímicos. Hoy en día, alrededor del 8 % de la producción anual total de petróleo y gas se utiliza para producir plásticos, lo que demuestra su magnitud y omnipresencia en nuestra vida cotidiana. La producción anual de plástico ha aumentado más de 100 veces, desde alrededor de 2 millones de toneladas en la década de 1950 a más de 300 millones de toneladas en 2015. Geyer *et al.* (2017) estiman que en 2015 la cantidad de residuos plásticos generados ascendió a 5800 millones de toneladas métricas y que el 60 % de todos los plásticos jamás producidos han sido ya desechados, depositados en vertederos o liberados en el medio ambiente. De ser una «basura» local hace solo unas décadas, los plásticos se han convertido actualmente en un problema ambiental global muy importante ya que se encuentran acumulados tanto en los sedimentos terrestres como en los marinos. De hecho, se están formando cuerpos de sedimentos en las zonas costeras que, si se observan en una sección transversal, contienen suficiente material macroplástico como para ser reconocidos por las/os geólogas/os como un depósito posterior a la mitad del siglo XX (fig. 3). Los plásticos son claramente duraderos a escala del tiempo humano, pero a escalas de tiempo más largas su potencial de diagénesis y fosilización una vez enterrados en los sedimentos es un tema desconocido.

Figura 3. Playa cementada (*beachrock*) en la costa cantábrica, constituida por escorias de fundición procedentes de la industria local de hierro y que contiene abundantes tecnofósiles, sobre todo materiales plásticos.

Los metales

La contaminación ambiental provocada por el ser humano con distintos metales tiene una larga y bien documentada historia. La extracción de menas metálicas y la fundición de esas rocas comenzaron en tiempos prehistóricos y se incrementaron sensiblemente durante la expansión romana. La extracción de metales a partir de yacimientos minerales y la producción industrial de metales y aleaciones así como la eliminación de los residuos que contienen metales son fuentes antropogénicas importantes de estos elementos en el medio ambiente. Los vertidos de metales son una consecuencia de su uso humano en un gran número de aplicaciones. El enriquecimiento global de diferentes sistemas ambientales en

Figura 4. Distribución vertical de la arena, las asociaciones de foraminíferos, la concentración de distintos metales (EF: factor de enriquecimiento con respecto a sus valores naturales en los sedimentos) y la edad de los materiales en el sondeo Gobelas (ría de Bilbao) (modificado de Cearreta *et al.* 2002).

plomo, cobre y zinc, cuya tasa de emisión a la atmósfera ha aumentado dramáticamente durante el siglo XX, los convierte en uno de los marcadores estratigráficos más importantes del Antropoceno (fig. 4).

Los radionúclidos artificiales

Tras el descubrimiento de la radiactividad en 1896, sus características físico-químicas se utilizaron para provocar reacciones de fisión y fusión atómicas más o menos controladas tanto en bombas como en reactores nucleares. Este desarrollo

condujo a la producción y diseminación a gran escala en el medio ambiente de elementos radiactivos, muchos de los cuales son raros en la naturaleza, como, por ejemplo, el Cesio-137 o el Plutonio-239. La producción de otros isótopos más comunes en la naturaleza, como el Carbono-14, tiene lugar continuamente de modo natural por el efecto de los rayos cósmicos sobre el nitrógeno de la atmósfera. Estas mezclas de isótopos han producido una señal que presenta una distribución global y casi sincrónica en los sedimentos y en otros materiales (como el hielo, la madera, los corales y los huesos de animales). Es posible distinguir algunas señales radiactivas específicas como las generadas en los accidentes de las centrales nucleares de Chernobyl y Fukushima en 1986 y 2011 respectivamente, pero estas descargas accidentales fueron pequeñas en comparación con las consecuencias de las detonaciones atmosféricas de bombas nucleares que produjeron la mayoría de los radionúclidos de origen antropogénico presentes hoy en el medio ambiente.

Estas pruebas comenzaron con la detonación Trinity el 16 de julio de 1945 en Alamogordo, Nuevo México (USA). La prueba Trinity y las bombas posteriores de Hiroshima y Nagasaki también en 1945, aunque fueron devastadoras, tuvieron un impacto pequeño en la abundancia global de radionúclidos en comparación con las detonaciones de bombas termonucleares que las siguieron. Entre los años 1945 y 1951, la diseminación de radionúclidos artificiales como lluvia radiactiva fue limitada y de alcance solo local. Durante este tiempo, las detonaciones realizadas fueron de bombas de fisión (comúnmente llamadas bombas atómicas), que eran relativamente pequeñas. Las señales globales importantes para la precipitación de isótopos radiactivos fueron producidas por las pruebas atmosféricas de armas termonucleares de fusión (también llamadas bombas de hidrógeno), que eran más potentes y que comenzaron en 1952. Estas detonaciones produjeron una lluvia radiactiva desde una gran altitud en la atmósfera, que se dispersó por toda la superficie terrestre, con un pico marcado de sus concentraciones en los años 1961-1962. El Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos Nucleares de 1963, después del cual las pruebas pasaron a ser

Figura 5. Estimación de la edad de los sedimentos en la marisma de Lastra (río de Santoña, Cantabria), utilizando el perfil de disminución exponencial del isótopo radiactivo natural Plomo-210 y el pico de concentración del radionúclido artificial Cesio-137 (tomado de García-Artola *et al.* 2017).

principalmente subterráneas, condujo a un rápido declive en la caída de radionúclidos desde la atmósfera a la superficie terrestre durante la década de 1960 y cesó en el año 1980.

Los productos radiactivos de esas detonaciones nucleares se extendieron por todo el planeta, pero su concentración está influida tanto por los sistemas de

vientos y precipitaciones (y en el mar, por la profundidad del agua y las corrientes oceánicas) como por la ubicación geográfica de las pruebas. Aproximadamente tres cuartas partes de todos los radionúclidos se produjeron en el hemisferio norte, principalmente en latitudes medias, donde tuvo lugar el mayor número y magnitud de las detonaciones. Los mejores archivos geológicos de alta resolución que almacenan estos radionúclidos artificiales se encuentran en el hielo polar, los sedimentos lacustres, estuarinos y costeros, y los corales (fig. 5). Estos archivos proporcionan indicadores claros e inequívocos de la deposición radiactiva posterior al año 1952. Esta señal de mediados del siglo XX constituye un importante marcador antropogénico dentro del registro estratigráfico del Antropoceno y se ha sugerido al Plutonio-239 como el radionúclido que proporciona la señal más fiable a largo plazo (Waters *et al.* 2015, 2016).

El cambio climático

Desde el año 1900, la atmósfera inferior del planeta se ha calentado 1,2 °C, y el océano ha ido incrementando su temperatura a profundidades cada vez mayores, el nivel del mar está ascendiendo, el hielo marino se está fundiendo, la mayoría de los glaciares de montaña se están retirando, tanto las capas de hielo de la Antártida como las de Groenlandia están perdiendo masa y el océano se está volviendo más ácido. El único factor que puede explicar todos estos cambios es el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero provocado por las actividades humanas, cuyo efecto se incrementa por la evaporación progresiva de vapor de agua desde el océano conforme este se va calentando con el paso del tiempo. Como consecuencia de la inyección a la atmósfera de 10 mil millones de toneladas de carbono por año, el aumento global de CO₂ actualmente es de unos 20 ppm/década, es decir, 100 veces más rápido que la mayor parte de los incrementos de CO₂ que han tenido lugar en la atmósfera terrestre durante los últimos 800 000 años. La composición variable de los isótopos de carbono de ese CO₂ atmosférico muestra que la fuente de su aumento es rica en Carbono-12, una

clara indicación de que ese carbono proviene de la quema de combustibles fósiles. Además del aumento observado en el CO_2 desde la Revolución Industrial, también se ha producido un incremento significativo (162 %) en la concentración de gas metano (CH_4), que es el gas de efecto invernadero más potente, y cuya composición isotópica sugiere un aumento sustancial en el aporte de metano biogénico desde las plantaciones agrícolas y los humedales tropicales. Todos estos datos muestran que el clima de la Tierra se ha ido desplazando desde su trayectoria natural de los últimos miles de años hacia un régimen climático diferente.

El ascenso en el nivel del mar es una de las consecuencias más importantes de esta variabilidad climática. Gran parte de la población mundial vive hoy en las áreas costeras con densidades tres veces superiores a la media mundial y la mayoría de las megaciudades del planeta se encuentran situadas en la costa (600 millones de personas viven a menos de 10 m por encima del nivel del mar actual y entre 100 y 150 millones de personas viven a menos de 1 m). Los registros instrumentales y geológicos muestran que el nivel del mar global está aumentando desde principios del siglo XX por encima de sus tasas habituales de los últimos miles de años, hasta alcanzar los valores actuales de 3,2 mm/año. Existe una gran incertidumbre sobre el comportamiento de las capas de hielo de Groenlandia y Antártida por el continuo aumento de la temperatura atmosférica y oceánica. Si la capa de hielo de Groenlandia se derritiera podría elevar el nivel del mar unos 7 m, y si fuera a fundirse la capa de hielo de la Antártida occidental el nivel del mar se podría elevar unos 3-5 m adicionales.

4. EL INICIO DEL ANTROPOCENO

A pesar de que el proceso que condujo al incremento de CO_2 y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera se inició con la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII, su impacto identificable en la química atmosférica y en los

ciclos biogeoquímicos del planeta comenzó de una manera pronunciada y global solo a mediados del siglo XX. Este fuerte aumento en la magnitud y la velocidad de las actividades humanas y de sus impactos a mediados del siglo XX se conoce como la «Gran Aceleración» y se manifiesta claramente mediante distintos indicadores socioeconómicos, como el aumento de la población humana, la actividad económica, el consumo de energía, el uso de recursos, el transporte y las comunicaciones, que, en conjunto, muestran una explosión de la actividad humana y su conectividad desde mediados del siglo XX. De modo paralelo, esta Gran Aceleración también ha alterado significativamente la estructura y el funcionamiento del Sistema Tierra.

La duración de las diferentes etapas que componen la escala del tiempo geológico no es fija sino muy variable. Curiosamente, a partir del Mioceno (últimos 23 millones de años), las épocas geológicas se van haciendo sucesivamente más cortas, y esta tendencia refleja bien la resolución y calidad crecientes del registro geológico a medida que nos acercamos al presente. Zalasiewicz *et al.* (2017) ya sugirieron que la cuestión clave en el debate sobre el Antropoceno no es precisamente su corta duración, sino más bien si el registro geológico que permite la caracterización y la correlación del Antropoceno es ya diferente de la época anterior (el Holoceno), si además será persistente durante muchos milenios y si los cambios que lo caracterizan seguirán actuando con el tiempo. Todas estas condiciones inevitablemente afectarán al curso futuro de la historia de la Tierra y, por lo tanto, al registro geológico del futuro.

Dentro del Eón Fanerozoico, el método aceptado internacionalmente para definir los límites cronoestratigráficos que separan las distintas etapas de la historia de nuestro planeta es la selección de un GSSP (Global Boundary Stratigraphic Sections and Points = Estratotipo global de límite o clavo dorado). Es decir, un punto de referencia físico dentro de los estratos geológicos que pueda correlacionarse ampliamente entre las distintas secciones geológicas de la misma edad que existen por todo el planeta. La mayoría de los GSSP ya definidos y ratificados utilizan especies de fósiles marinos como marcadores primarios. Sin embar-

go, el GSSP más reciente (la base del Holoceno) se fundamenta en las señales isotópicas del exceso de deuterio registradas en un sondeo de hielo glaciar (en lugar de utilizar los estratos de roca, como es más habitual).

En los depósitos recientes donde es posible definir el GSSP del Antropoceno, sería necesaria una datación de alta precisión con resolución anual, que podría lograrse mediante el conteo de sus capas apoyado por técnicas de datación radiométrica (por ejemplo, con el isótopo natural Plomo-210) o por eventos que puedan ser fechados de modo inequívoco, como algunas grandes erupciones volcánicas que sean conocidas. Estas láminas anuales potencialmente podrían estar presentes en muchos entornos geológicos diferentes. Por ejemplo, en las cuencas marinas anóxicas, algunas de las cuales están asociadas con zonas eutróficas que presentan poca o ninguna perturbación bentónica, o en los depósitos fangosos de la plataforma continental (*mud-patches*) que se desarrollan frente a los deltas y estuarios, y que tal vez puedan proporcionar los ambientes más adecuados para el GSSP Antropoceno, porque su falta de oxígeno evita la bioturbación y facilita la preservación adecuada de las capas depositadas anualmente. Este tipo de ambientes geológicos se ha utilizado antes para definir otros GSSP, como el del límite Ordovícico-Silúrico (hace 444 millones de años) y el del Paleoceno-Eoceno (hace 56 millones de años).

Ninguna de las señales indicadoras del Antropoceno mencionadas en el apartado anterior es tan instantánea como lo fue el impacto del meteorito contra la superficie terrestre que tuvo lugar hace 65 millones de años y que marcó el límite Cretácico/Paleógeno. Lo más parecido a tal evento isócrono en relación con una posible fecha de inicio para el Antropoceno es el comienzo de las grandes pruebas term nucleares atmosféricas en la década de 1950, que dejaron una señal que aún es detectable en gran parte del planeta. Esta señal, expresada como un pico en la concentración de plutonio, parece ser el candidato más práctico y eficaz como marcador primario Antropoceno. Además, ya que el momento temporal de la señal de este radionúclido artificial coincide estrechamente con el mayor punto de inflexión en las señales que caracterizan la Gran Aceleración, su gran

trazabilidad geológica ayuda considerablemente a justificar un límite inferior del Antropoceno en todo el mundo que se localice aproximadamente en 1950.

El Antropoceno es diferente al resto de la columna geológica porque se trata de la primera unidad cronoestratigráfica que estaría completamente contenida dentro de la historia humana escrita y bien documentada, además de cubrir un período temporal para el que tenemos una comprensión aceptable del modo en el que opera el Sistema Tierra. Para algunos científicos, este sería un argumento en contra de la definición del Antropoceno como unidad geológica ya que, según ellos, se basaría más en la observación humana directa que en un registro estratigráfico (Finney / Edwards 2016). Sin embargo, más bien al contrario, el análisis del Antropoceno para buscar un GSSP utilizando los protocolos geológicos ya establecidos se vería en este caso favorecido y reforzado de manera única por el acceso a registros instrumentales detallados que complementasen la información geológica, ya que en el Antropoceno se superponen el tiempo geológico y el tiempo histórico.

5. EL ANTROPOCENO MÁS ALLÁ DE LA GEOLOGÍA

El Antropoceno geológico se diferencia en cierta medida de otras interpretaciones del Antropoceno que han ido apareciendo en los últimos años, ya que las ciencias sociales, las humanidades y las artes se han interesado por este concepto y lo han analizado a través de las herramientas conceptuales de sus propias disciplinas. Parece claro que aceptar las distintas evidencias materiales del Antropoceno geológico y su narrativa puede conducir, como corolario, al análisis de sus causas originales y de sus consecuencias sociales, culturales y políticas. En general, el Antropoceno se ha convertido en un concepto que no solo proporciona una perspectiva particular sobre la historia de la Tierra, sino que también constituye un catalizador notable y positivo para las discusiones interdisciplinarias. Sin embargo, tal nivel de análisis más amplio que es potencialmente importante

y novedoso para la Geología representa una cuestión que va más allá del mandato del AWG.

Los encendidos debates sobre las fuerzas responsables del Antropoceno y sobre el papel que han jugado los diferentes modos de organización y comportamiento social, tecnológico y político de los seres humanos son cuestiones científicas de gran importancia, al igual que los estudios sobre los efectos de los impactos de meteoritos extraterrestres o las erupciones volcánicas. Sin embargo, el reconocimiento del Antropoceno como una unidad geológica debe estar basado únicamente en el modelo que aparezca registrado en los estratos geológicos y en sus características definitorias, que deben ser reconocidas y correlacionadas entre distintos lugares geográficos del planeta. Adicionalmente, esta base geológica también puede contribuir a desarrollar una investigación científica sobre el origen, las causas, los procesos y las dinámicas del Antropoceno.

Desde una perspectiva geológica global tiene sentido tratar a toda la humanidad como una sola entidad en términos de sus actividades y sus consecuencias para el planeta. Sin embargo, este tratamiento enmascara grandes desigualdades entre los distintos países, sociedades y grupos dentro de estos países. Este es un punto importante que ya señalaron Malm / Hornborg (2014), entre otros, argumentando que la humanidad en su conjunto no era la responsable del Antropoceno.

Las dos tendencias socioeconómicas más relevantes durante el Antropoceno son, por una parte, el crecimiento de la población humana y, por la otra, el crecimiento económico medido a través de la evolución del PIB global. Este último es un buen indicador del consumo, que, a su vez, es el impulsor más inmediato de muchos de los impactos humanos sobre el Sistema Tierra. Las diferencias que existen entre los distintos países con relación a estas dos tendencias son sorprendentes. Casi todo el crecimiento de la población humana desde 1950 hasta 2010 tuvo lugar en los BRICS (Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica) y en los países económicamente más pobres. Sin embargo, incluso con el rápido crecimiento de la economía china durante la primera década del siglo XXI, la mayor parte de la actividad económica mundial y, por lo tanto, del consumo planetario aún residía

en los países ricos de la OCDE (que en el año 2010 representaban el 18 % de la población y el 74 % de la actividad económica global). Por lo tanto, la idea de Malm y Hornborg de que los países ricos, y no la humanidad en su conjunto, son los responsables de la Gran Aceleración se ve confirmada por los datos. No obstante, el AWG no investiga sobre quién es el «responsable» de estas tendencias socioeconómicas, sino del resultado neto de esas tendencias en términos geológicos.

Por otra parte, se ha debatido mucho sobre la idoneidad del nombre Antropoceno, que corresponde al antiguo término griego para humano (*anthropos*) y cene (*kainos*) del griego antiguo para tiempo «nuevo» o «reciente». Sin embargo, como para el resto de los nombres de las distintas etapas del tiempo geológico, este no debe tener necesariamente ningún significado particular o un determinado carácter simbólico, sino que es la denominación que en términos prácticos ha ganado su reconocimiento científico mundial entre todos los posibles términos sugeridos para esta etapa geológica de un planeta que ahora se encuentra profundamente afectado por los humanos. Así, por ejemplo, otros nombres que han sido propuestos como «Plasticoceno» o «Capitaloceno» respectivamente reflejan una parte elegida del conjunto de sus caracteres diagnósticos o proporcionan una posible explicación para las causas de su existencia. El nombre Antropoceno no es más que una etiqueta práctica, como lo son las denominaciones de otras unidades del tiempo geológico ya formalizadas como el «Silúrico», en honor a los Silures, que eran una antigua tribu galesa, o el «Cuaternario», que es una reliquia de las etapas iniciales de la Geología como ciencia cuando las grandes unidades de tiempo se nombraban como Era Primaria, Secundaria, Terciaria y Cuaternaria, términos que hoy están en desuso. Como unidad geológica, por lo tanto, los intentos para diseñar un nombre que pueda simbolizar mejor su esencia (por ejemplo, Capitaloceno) tienen poca importancia. Existe una considerable congruencia entre el significado del Antropoceno tal y como se concibió originalmente y su utilización entre la comunidad geológica. Este hecho, junto con el modo en que el nombre se ha establecido rápidamente en la

literatura científica, sugiere que el término Antropoceno debe conservarse con este significado.

Aumentar la conciencia sobre las causas y los procesos responsables del Antropoceno es un empeño socialmente muy importante, pero se encuentra bastante separado de los criterios sobre los que debe basarse la Geología para la formalización de este concepto. Confundir el posible uso más amplio de un Antropoceno formalizado con las evidencias estratigráficas utilizadas para respaldar su formalización geológica podría generar el peligro de una politización de este análisis, como señalan Finney / Edwards (2016). El concepto Antropoceno ha sido criticado como una especie de agenda política o ideológica disfrazada de época geológica. La «utilidad científica y social» de formalizar el Antropoceno se refiere de hecho a dos cuestiones profundamente diferentes: una es su utilidad potencial para la ciencia, que implica un cambio de paradigma geológico, y este es el asunto al que está limitado el mandato del AWG. La segunda cuestión es su relevancia social, más amplia debido a una mayor concienciación sobre los procesos que están actuando en nuestro planeta (y, por lo tanto, se extiende a la esfera de la percepción política del Antropoceno). Esta es una consideración diferente que se encuentra más allá del mandato del AWG.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que cualquier decisión que se adopte durante el proceso de su formalización como un nuevo intervalo del tiempo geológico tendrá ciertas implicaciones políticas. Así, una decisión explícita que niegue la formalización del Antropoceno y que tenga como resultado la continuación formal del Holoceno sería una afirmación políticamente tan relevante como lo será asimismo la posible inclusión del Antropoceno como un nuevo intervalo dentro de la escala del tiempo geológico. La consideración más importante en este caso debe estar relacionada con la responsabilidad de la comunidad geológica en particular, y de la comunidad científica en general, cuando se enfrenta ante las evidencias de un cambio geológico. Por lo tanto, la comunidad geológica cometería un grave error si estuviera frente a un cambio científicamente demostrable, significativo y sustancial en la Geología del planeta y no le diera un reconocimiento acorde a su magnitud.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CEARRETA, Alejandro / María Jesús IRABIEN / Eduardo LEORRI / Iñaki YUSTA / Andrea QUINTANILLA / Ane ZABALETA (2002): «Environmental transformation of the Bilbao estuary, N. Spain: microfaunal and geochemical proxies in the recent sedimentary record», *Marine Pollution Bulletin*, 44, 487-503.
- CRUTZEN, Paul J. / Eugene F. STOERMER (2000): «The “Anthropocene”», *Global Change. IGBP Newsletter*, 41, 17-18.
- ERISMAN, Jan W. / Mark A. SUTTON / James GALLOWAY / Zbigniew KLIMONT / Wilfried WINIWARTER (2008): «How a century of ammonia synthesis changed the world», *Nature Geoscience*, 1, 636-639.
- FINNEY, Stanley C. / Lucy E. EDWARDS (2016): «The “Anthropocene” epoch: Scientific decision or political statement?», *GSA Today*, 26, 4-10.
- GARCÍA-ARTOLA, Ane / Alejandro CEARRETA / María Jesús IRABIEN (2017): «Recent Agricultural Occupation and Environmental Regeneration of Salt Marshes in Northern Spain», en Charles W. Finkl / Christopher Makowski (eds.), *Coastal Wetlands: Alteration and Remediation*, Nova York, Springer, 47-79.
- GEYER, Roland / Jenna R. JAMBECK / Kara LAVENDER LAW (2017): «Production, use, and fate of all plastics ever made», *Science Advances*, 3, e1700782.
- HAFF, Peter (2014): «Humans and technology in the Anthropocene: Six rules», *The Anthropocene Review*, 1, 126-136.
- MALM, Andreas / Alf HORNBORG (2014): «The geology of mankind? A critique of the Anthropocene narrative», *The Anthropocene Review*, 1, 62-69.
- STOPPANI, Antonio (1873): *Corso di Geologia, vol. II, Geologia stratigrafica*. Milan, G. Bernardoni e G. Brigola.
- SYVITSKI, James P. M. / Albert KETTNER (2011): «Sediment flux and the Anthropocene», *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369, 957-975.
- WATERS, Colin N. / James P. M. SYVITSKI / Agnieszka GALUSZKA / Gary J. HANCOCK / Jan ZALASIEWICZ / Alejandro CEARRETA / Jacques GRINEVALD / Catherine JEANDEL / John R. MCNEILL / Colin SUMMERHAYES / Anthony D. BARNOSKY (2015): «Can nuclear weapons fallout mark the beginning of the Anthropocene Epoch?», *Bulletin of the Atomic Scientists*, 71, 46-57.
- WATERS, Colin N. / Jan ZALASIEWICZ / Colin SUMMERHAYES / Anthony D. BARNOSKY / Clément POIRIER / Agnieszka GALUSZKA / Alejandro CEARRETA / Matt EDGEWORTH / Erle C. ELLIS / Michael ELLIS / Catherine JEANDEL / Reinhold LEINFELDER / John R. MCNEILL / Daniel deB. RICHTER / Will STEFFEN / James SYVITSKI / Davor VIDAS / Michael WAGREICH / Mark WILLIAMS / An ZHISHENG / Jacques GRINEVALD / Eric ODADA / Naomi ORESKES / Alexander P. WOLFE (2016): «The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene», *Science*, 351, 137.
- ZALASIEWICZ, Jan / Mark WILLIAMS / Colin N. WATERS / Anthony D. BARNOSKY / Peter HAFF (2014): «The technofossil record of humans», *The Anthropocene Review*, 1, 34-43.
- ZALASIEWICZ, Jan / Mark WILLIAMS / Colin N. WATERS / Anthony D. BARNOSKY / John PALMESINO / Ann-Sofi RÖNNKOG / Matt EDGEWORTH / Cath NEAL / Alejandro CEARRETA / Erle C. ELLIS / Jacques GRINEVALD / Peter HAFF / Juliana A. IVAR DO SUL / Catherine JEANDEL / Reinhold LEINFELDER / John R. MCNEILL / Eric ODADA / Naomi ORESKES / Simon J. PRICE / Andrew REVKIN / Will STEFFEN / Colin SUMMERHAYES / Davor VIDAS / Scott WING / Alexander P. WOLFE (2016): «Scale and diversity of the physical technosphere: A geological perspective», *The Anthropocene Review*, 4, 9-22.

ZALASIEWICZ, Jan / Colin N. WATERS / Alexander P. WOLFE / Anthony D. BARNOSKY / Alejandro CEARRETA / Matt EDGEWORTH / Erle C. ELLIS / Ian J. FAIRCHILD / Felix M. GRADSTEIN / Jacques GRINEVALD / Peter HAFF / Martin J. HEAD / Juliana A. IVAR DO SUL / Catherine JEANDEL / Reinhold LEINFELDER / John R. MCNEILL / Naomi ORESKES / Clément POIRIER / Andrew REVKIN / Daniel deB. RICHTER / Will STEFFEN / Colin SUMMERHAYES / James P. M. SYVITSKI / Davor VIDAS / Michael WAGREICH / Scott WING / Mark WILLIAMS (2017): «Making the case for a formal Anthropocene Epoch: an analysis of ongoing critiques», *Newsletters on Stratigraphy*, 50, 205-226.