

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES**

DISCURSO INAUGURAL

DEL AÑO ACADÉMICO 2017-2018

**LEÍDO EN LA SESIÓN CELEBRADA EL DÍA 25 DE OCTUBRE DE 2017
POR EL ACADÉMICO NUMERARIO**

EXCMO. SR. D. ANTONIO CENDRERO UCEDA

SOBRE EL TEMA

**EL DEBATE SOBRE EL ANTROPOCENO.
REFLEJO SOCIAL, DATOS CIENTÍFICOS
Y ASPECTOS FORMALES**



**MADRID
DOMICILIO DE LA ACADEMIA
VALVERDE, 22 - TELÉFONO 917 014 230**

www.rac.es

2017

ISSN: 1138-4093

ISBN: 978-84-87125-63-8

Depósito Legal: M-28226-2017

La publicación impresa de este discurso inaugural ha sido posible gracias a:

Fundación **BBVA**

ÍNDICE

	<u>Páginas</u>
Resumen/Abstract	9
1. Introducción	11
2. La escala cronoestratigráfica internacional	13
3. Antecedentes; preocupación por la acción humana sobre el medio y Antropoceno.....	16
4. El Antropoceno en el debate reciente.....	20
5. El ‘contenido’ del Antropoceno ¿las cosas son o no son diferentes?	24
6. Los procesos geológicos y el Antropoceno	29
<i>6.1. La huella geomorfológica humana</i>	<i>30</i>
<i>6.2. Procesos de erosión/sedimentación.....</i>	<i>31</i>
<i>6.3. Desastres naturales.....</i>	<i>40</i>
<i>6.4 Cambio geomorfológico global y Antropoceno.....</i>	<i>45</i>
7. ¿Por qué y para qué el Antropoceno?.....	47
Referencias	53

RESUMEN

Se pasa revista brevemente a la evolución histórica del concepto de “Antropoceno” (con este o con otros nombres) como época geológica dominada por la acción humana, y se comentan los puntos a favor y en contra de su inclusión formal como una unidad de la escala cronoestratigráfica internacional. Se presenta también una breve panorámica de los datos sobre los componentes y procesos del planeta que han cambiado en tiempos recientes, y que constituyen lo que se conoce como cambio global, del cual el cambio climático forma parte. Se analizan las posibilidades de que dichos cambios den lugar a marcadores en el registro geológico que sirvan en la actualidad y en el futuro para identificar el tránsito entre el Holoceno y el Antropoceno, y se discuten las posibles fechas para definir el límite entre ambos. Se toma, como ejemplo para ilustrar la discusión, el caso de las modificaciones experimentadas por los procesos geológicos superficiales, aportando datos que señalan la importancia del cambio cualitativo y cuantitativo experimentado por estos procesos desde mitad del siglo XX. Estos cambios apoyan la idea de que el final de la Segunda Guerra Mundial podría ser la fecha más adecuada para definir el inicio del Antropoceno. Finalmente, se hacen unas reflexiones personales sobre lo que este debate implica para la relación entre comunidad científica y sociedad.

ABSTRACT

A brief review of the historical evolution of the “Anthropocene” concept (be it with this or other terms), as a new geologic epoch dominated by human activity, is presented. The pros and cons of its incorporation as a new unit of the international chronostratigraphic scale are discussed. Some data on the changes experienced in recent times by different earth components and processes, the global change of which climate change is a part, are explained. Their potential utility as markers in the geological record that could allow to identify the Holocene-Anthropocene limit, and possible dates of the latter, are discussed. The case of geomorphic processes is taken to illustrate the discussion. Data are presented showing that geomorphic processes have undergone a considerable qualitative and quantitative change since mid-20th century. These data indicate that the end of World War II could be an appropriate date for defining the beginning of the Anthropocene. Finally, a few personal comments and reflections are made, to illustrate some lessons to be learned, from the present “Anthropocene debate”, about the relationships between society and the scientific community.

It is customary fate of new truths to begin as heresies and end as superstitions.
T.H. Huxley, 1860

1. INTRODUCCIÓN

Excmo Sr. Presidente, Excmas. Señoras Académicas, Excmos. Señores Académicos, Señoras y Señores.

Ruego me disculpen por iniciar esta presentación con algunas anécdotas de tipo personal (si bien todas ellas relacionadas de manera directa o indirecta con esta Academia), pero creo que ilustran bastante bien la razón por la cual he escogido el Antropoceno como tema para este discurso.

Hace unos meses, el Prof. Pedro García Barreno, que además de Académico Numerario de esta casa lo es también de la Real Academia Española, me pidió que le propusiera una definición del término “antropoceno”, cuya inclusión en el diccionario de la RAE se había planteado y se estaba considerando.

El texto que le envié fue el siguiente: *“antropoceno: dicho de la época geológica más reciente del periodo cuaternario, propuesta, pero oficialmente aún no aceptada, caracterizada por la modificación generalizada de los sistemas naturales por acción humana, y que se inicia a mitad del siglo XX”*.

No sé en qué estado se encuentra el proceso para la eventual inclusión de ese término en el DRAE, ni si la definición propuesta se ha considerado adecuada, pero me parece que esta anécdota sirve para ilustrar el dilema que se ha planteado en relación con el tema dentro de la comunidad científica interesada en las Ciencias de la Tierra, muy especialmente entre la comunidad geológica. Parece evidente que, si la RAE considera, *motu proprio*, la posible inclusión de un nuevo término en su diccionario, dicho término ha debido empezar a utilizarse de manera bastante generalizada, y seguramente no principalmente dentro de un ámbito exclusivamente científico.

Por otro lado, otras dos anécdotas personales muestran el interés que el tema ha suscitado entre miembros de la RAC. El pasado mes de abril, se organizó en esta casa una sesión científica, coordinada por la Académica Caridad Zazo y desarrollada por el Académico Juan Antonio Vera y el Prof. Alejandro Cearreta, titulada *“El Antropoceno a debate”*, que congregó un número de asistentes superior a los que normalmente acuden a este tipo de sesiones. En el debate subsiguiente a las presentaciones, que tuve la satisfacción de moderar, las intervenciones fueron muy numerosas y dieron lugar a una discusión bastante más animada de

lo que es habitual en ocasiones similares, siendo necesario en un momento dado cortar la misma, para evitar que se prolongara en exceso. En agosto, se impartió en la Universidad Internacional Menéndez Pelayo, contando con un número de asistentes superior al de la mayoría de los cursos que se estaban realizando en esa institución, un curso magistral sobre *“El cambio climático ¿una realidad evitable?”*. El curso estuvo dirigido por el Prof. Miguel Ángel Alario, quien tuvo la amabilidad de pedirme que desarrollara una sesión sobre el Antropoceno. También aquí se produjo un animado debate.

Pero esas anécdotas de tipo personal se complementan con datos más objetivos y de validez general. Tecleando en Google el término ‘Antropoceno’, en cualquier idioma, aparecen un número elevadísimo de referencias, tanto de publicaciones o eventos de carácter científico como de la prensa diaria o de los medios en general, algo que resulta muy poco habitual en relación con temas de tipo científico en general y geológico en particular. Seguramente esto no es sorprendente, porque el tema tiene repercusiones sociales que van mucho más allá del interés científico, y se inserta dentro de la creciente preocupación social sobre el cambio global (al cual los medios habitualmente se refieren, de manera reduccionista, como cambio climático).

Si nos centramos en el ámbito científico, se aprecia un rapidísimo incremento del número de artículos en los que se aborda el tema o de las citas del término. Tal como mostró el pasado mes de abril en esta casa el Prof. Cearreta y es fácilmente comprobable en la ‘Web of Science’, desde un único artículo publicado en 2001, se pasó a 426 el pasado año. En el mismo lapso temporal el número de citas aumentó desde 1 a 4583. A principios del mes de septiembre, las cifras para el año en curso eran 345 artículos y 4134 citas. A finales de ese mismo mes, las citas de artículos eran 5431, y las totales 21.407. No es, por tanto, arriesgado, suponer que los números totales superarán muy ampliamente los del año pasado.

Por razones que yo no sería capaz de explicar, si bien las propuestas de definir una unidad de los tiempos geológicos caracterizada por la influencia de nuestra especie sobre el planeta se remontan, que yo sepa, a mediados del siglo XIX, dichas propuestas prácticamente no salieron del ámbito académico; pero desde el inicio del presente siglo se ha producido una verdadera explosión de la presencia del Antropoceno en todo tipo de medios. Eso, a pesar de que el editor de textos de Microsoft (en castellano, que no en inglés) todavía lo subraya como incorrecto, algo que no ocurre, por ejemplo, con Holoceno, Cuaternario, Mioceno, Paleoceno, Triásico o Pérmico, y que probablemente dejará de ocurrir en breve. Al mismo tiempo, hay una resistencia considerable por parte de amplios sectores de la comunidad geológica, sobre todo de los más directamente relacionados con la caracterización y definición de las unidades de la escala cronoestratigráfica internacional, al reconocimiento formal del Antropoceno como una de dichas unidades.

La propuesta del Antropoceno ha surgido sobre todo desde ámbitos ajenos a las Ciencias de la Tierra, lo que probablemente ha contribuido a que se cuestione la pertinencia o no de aceptar esta nueva época. Se discute, por un lado, si los cambios que directa o indirectamente han causado nuestras actividades son suficientes para justificar el reconocimiento de una nueva unidad cronoestratigráfica. Por otro lado, si dichos cambios, al igual que los

que sirvieron para definir otras unidades de la escala cronoestratigráfica internacional, están dejando en el registro geológico huellas que permitan su identificación en el futuro. También se debate sobre cuál podría ser el límite cronológico del inicio del Antropoceno (¿el inicio de la agricultura? ¿la Revolución Industrial? ¿la Segunda Guerra Mundial?) y el criterio que permitiría identificarlo en diferentes lugares del mundo. Muy especialmente, se cuestiona por parte de numerosos y destacados representantes de la comunidad geológica que sea posible u oportuno definir esa hipotética nueva época geológica sobre bases y en términos comparables a los utilizados para definir las unidades cronoestratigráficas hasta ahora reconocidas.

El tema y el debate que ha suscitado son, a mi modo de ver, apropiados para reflexionar sobre las relaciones entre ciencia y sociedad en general, y sobre las actitudes de la comunidad científica ante los cambios o ante las implicaciones sociopolíticas de ciertos desarrollos científicos. Está, en primer lugar, el interés relativo a la posible introducción de cambios en la escala cronoestratigráfica internacional, y en los criterios y procedimientos para definir las unidades de la misma. En segundo lugar, el interés de profundizar en el conocimiento y la comprensión de la naturaleza y magnitud de los cambios que el planeta ha experimentado en tiempos recientes, está experimentando en la actualidad y probablemente experimentará en el futuro, así como los factores que los determinan y las posibles consecuencias que de ellos se derivan. A partir de esto, la posibilidad de determinar las acciones más adecuadas para mitigar los posibles efectos no deseados o aprovechar las nuevas oportunidades que pudieran surgir. En tercer lugar, creo que la polémica planteada es un ilustrativo ‘caso de estudio’ sobre las actitudes que surgen dentro de la comunidad científica cuando se hacen planteamientos que se consideran heterodoxos o representan un cambio con respecto a los esquemas y paradigmas establecidos y generalmente aceptados. Y también sobre la aceptación, por parte de amplios sectores de la sociedad, de lo que se pueden considerar como ‘dogmas laicos’.

2. LA ESCALA CRONOESTRATIGRÁFICA INTERNACIONAL

La definición de una nueva unidad de la escala cronoestratigráfica internacional (Fig. 1; ICS, 2017), y la aceptación de su inclusión en la escala de los tiempos geológicos, corresponde a la International Commission on Stratigraphy (ICS), una de las comisiones de la International Union of Geological Sciences (IUGS), el máximo organismo de la comunidad geológica a nivel mundial. Las divisiones entre unidades de los tiempos geológicos se han establecido teniendo en cuenta cambios significativos en la historia de la Tierra, (clima, fauna, flora, distribución de continentes y océanos, funcionamiento de los procesos geológicos, etc.), ocurridos sincrónicamente (si bien conviene tener presente el significado de ‘sincrónico’ en este contexto, como se comenta más abajo) en todo el planeta, que han dejado una huella identificable en el registro geológico a escala global, y que permiten diferenciar las unidades por encima y por debajo del límite propuesto. Esto es, lógicamente, en función de criterios geológicos.

Las unidades de esta escala tienen un doble significado. Están, por un lado, las unidades estratigráficas, representadas por los conjuntos de rocas y sedimentos, y los restos fósiles que puedan contener, formados en diferentes etapas de la historia terrestre y que

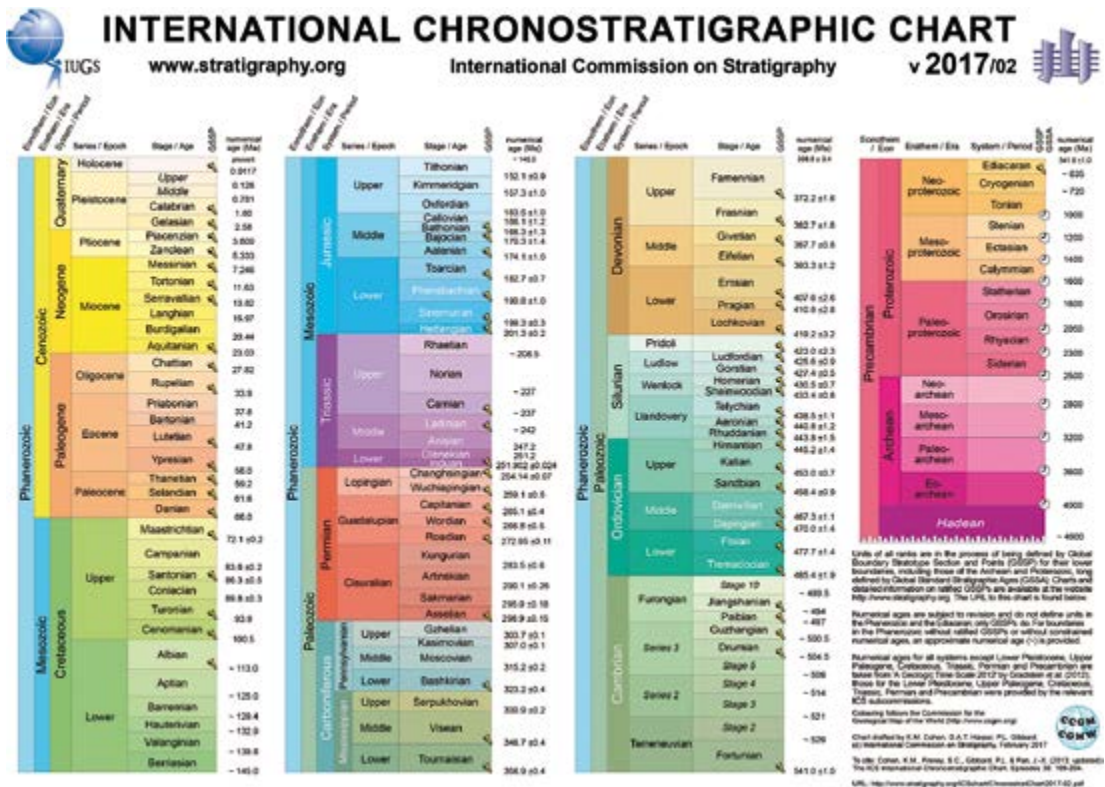


Fig. 1. Escala cronoestratigráfica internacional (ICS, 2017).

representan el elemento material sobre el que se pueden realizar distintos tipos de observaciones y de determinaciones analíticas (entre otras, la determinación de edades numéricas, por distintos métodos de datación). Esas observaciones o determinaciones son las que permiten interpretar los acontecimientos acaecidos a lo largo del tiempo y los cambios ambientales que se han ido sucediendo. Por otro lado, están las unidades cronológicas, los lapsos temporales dentro de los cuales se formaron las rocas, sedimentos y fósiles que constituyen el registro geológico, y tuvieron lugar los cambios y acontecimientos anteriores. Evidentemente, estas últimas no representan una realidad observable, sino una abstracción creada por nuestra mente colectiva. La sucesión de las etapas temporales así definidas es, por supuesto, otra abstracción, basada sin duda en elementos materiales (los conjuntos de rocas, sedimentos y fósiles), que refleja los acuerdos a los que se ha llegado dentro de la comunidad científica, para organizar de manera cronológica lo que hasta ahora sabemos sobre la evolución del planeta.

Cada unidad estratigráfica tiene su correspondiente unidad cronológica, existiendo dentro de cada una de ellas subdivisiones que representan lapsos temporales sucesivamente más cortos. Estas son, de mayor a menor: eonotema/eón, eratema/era, sistema/periodo, serie/época (tipo de unidad que se discute para el Antropoceno), piso/edad. A grandes rasgos y, por supuesto, con excepciones, la duración temporal de las unidades se va haciendo menor a medida que nos aproximamos a la actualidad, de manera similar a lo que ocurre con la

historia humana y por la misma razón. Cuanto más próximos en el tiempo han sido los acontecimientos, mayor es nuestra capacidad de obtener información sobre los mismos, por lo que mejora la calidad de nuestros análisis y la resolución temporal que permite establecer con mayor finura la distinción entre diferentes etapas. Por ejemplo, la duración de las épocas más recientes de la historia geológica hasta ahora oficialmente admitidas por la ICS es (millones de años): Mioceno, 17,7; Plioceno, 2,75; Pleistoceno, 2,56; Holoceno, 0,0117 (Fig. 1). Si se aceptara el Antropoceno con el inicio a mitad del siglo XX, que es la fecha que se considera en la actualidad como más adecuada por la mayoría de los autores, su duración sería de unos 70 años, aproximadamente la vida media de una persona.

Los acuerdos en los que se basa la actual escala cronoestratigráfica no son algo inmutable, sino que han cambiado a lo largo del tiempo, al ir aumentando nuestro grado de conocimiento sobre la historia geológica. Esto ha dado lugar a que el número y tipo de unidades reconocidas y la duración de las mismas hayan ido variando desde los primeros esbozos de cronología relativa de A. G. Werner (1749-1817) o la primera escala con edades numéricas (Holmes, 1913), hasta la actualidad. Es altamente probable que haya otros cambios en el futuro, a medida que vayan mejorando los métodos de datación y la cantidad y calidad de nuestros datos sobre las diferentes formaciones geológicas.

En el contexto que nos interesa, la historia reciente del planeta, es oportuno señalar que, en 2009, la ICS estableció el inicio del Pleistoceno (o límite Neógeno-Cuaternario) en $2,588 \pm 0,005$ millones de años antes de la actualidad. Ese límite corresponde a cambios que afectaron a los océanos, el clima y los organismos, y que coinciden con el límite magnetoestratigráfico Gauss-Matuyama, y su aceptación, no sorprendentemente, ha implicado discusiones y controversias (McGowran et al., 2009). Anteriormente, se consideraba que el Pleistoceno se inició 1,806 millones de años antes del presente. Tanto la naturaleza de los cambios indicados (que no fueron instantáneos), como los ± 5000 años de error que se consideran, indican que el límite temporal no se puede establecer de manera exacta, y que los acontecimientos que sirven para definirlo difícilmente pudieron ser sincrónicos, en sentido estricto, en todo el planeta. Se trata más bien de un periodo de transición gradual, aunque rápida en términos geológicos.

Por su parte, la fecha actualmente aceptada para el inicio del Holoceno es aproximadamente 11.700 años antes de la actualidad, coincidiendo con el inicio del actual (y, por el momento, último) periodo interglaciar. La edad precisa de ese acontecimiento, que tampoco fue instantáneo, varía, como es lógico, según se determine en unos u otros tipos de registros geológicos, ambientes sedimentarios, materiales o zonas del mundo, y también depende de los métodos de datación que se utilicen.

Una simple ojeada a la Figura 2, que muestra la tabla de correlación cronoestratigráfica a nivel global para los últimos 2,7 millones de años (ICS-INQUA y otros, 2016), pone claramente de manifiesto que los acontecimientos que han marcado los cambios ocurridos en la historia geológica durante ese lapso temporal no han debido ser eventos simultáneos en todo el planeta. Es evidente que no hemos de entender que dichos cambios fueron, en sentido estricto, sincrónicos en cualquier lugar. Ni siquiera que se produjeran en el mismo siglo, no

Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years

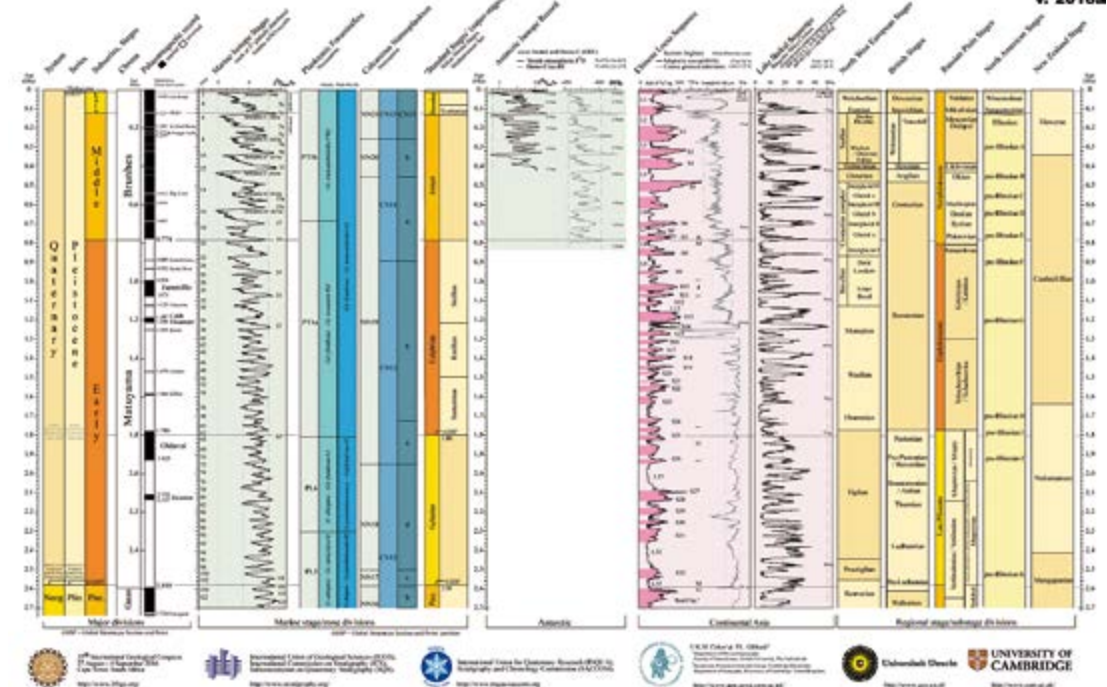


Fig. 2. Cuadro de correlación cronoestratigráfica a nivel global para los últimos 2,7 millones de años (ICS-INQUA, 2016).

digamos ya en el mismo año. Esto es algo que conviene tener presente a la hora de abordar el actual debate sobre el Antropoceno y la posible fecha de su inicio.

La no inmutabilidad de la escala cronoestratigráfica y las dificultades existentes para establecer límites exactos y precisos, válidos en cualquier punto del planeta, no invalida su muy considerable utilidad. Esta escala representa un medio que nos permite ordenar nuestros conocimientos sobre el pasado geológico y nos ayuda a comprender la sucesión de procesos y condiciones ambientales que lo han determinado.

3. ANTECEDENTES; PREOCUPACIÓN POR LA ACCIÓN HUMANA SOBRE EL MEDIO Y ANTROPOCENO

Se tiende a considerar, por parte de la opinión pública y de los medios (e incluso por no pocos científicos), que la modificación de las características del planeta por parte de los seres humanos es algo propio de tiempos muy recientes, y también que es igualmente reciente la preocupación por la alteración del medio ambiente y sus posibles consecuencias para las personas. Esto está bastante lejos de la realidad.

Ya en época romana, se establecieron normas de protección ambiental. El emperador Julio César dictó una norma prohibiendo la circulación de carruajes en algunos barrios de Roma

y Pompeya, por el ruido y la producción de excrementos que causaban. En 1273, Eduardo I de Inglaterra reglamentó la emisión de humos (Perea Velásquez, 2016). Las Leyes de Indias también tuvieron en cuenta las alteraciones del medio causadas por ciertas actividades humanas. Así, la Ley VII, establece normas para el debido tratamiento de los residuos de las minas (Aspillaga Plenge, 2006): “*Los defmontes, y escoriales que fe fecaren de los enfayes, y fundiciones, lamas, laves y relaves depues de haverlos aprovechado fus dueños, con los ingenios que vfan en la forma común, fe guarden y recojan, porque esten de manifesto para el beneficio publico, vtilidad de fus dueños y aumento de nueftra Real Hacienda (D. Felipe Tercero, en S. Lorenço, á 14 de Noviembre de 1603)*”.

Como señala Perea Velásquez (2016), en el Fuero Juzgo y la Ley de las Siete Partidas se consideraron los ríos y caminos como bienes comunes. Igualmente, las leyes 1, 2, 8 y 11 y las ordenanzas 7 y 12 de 1748, prescriben normas protectoras del medio ambiente. Este mismo autor señala que “*en la recopilación de las leyes de Indias y en la novísima recopilación que contienen las leyes de 1792 y 1796 sobre la protección de ríos y cañadas, caminos y terrenos destinados a la ganadería, también se contemplan medidas de protección a los montes públicos y privados*”. Este tipo de preocupación persistió en el N de Sudamérica después de la independencia. Simón Bolívar, como Presidente de la Gran Colombia, promulgó varios decretos encaminados a la protección ambiental. El 5 de julio de 1825 para la protección de la fauna de Chuquisaca, el 19 de diciembre de 1825 para proteger el agua en Bogotá, el 2 de diciembre de 1827 para reglamentar la salubridad del ambiente y la estética de las poblaciones, y el 31 de julio de 1829 para conservar los bosques.

Supongo que deben existir muchos otros ejemplos similares, correspondientes a otros países y entornos culturales, pero los expuestos ilustran claramente que desde hace mucho tiempo ha existido una conciencia social sobre los problemas de deterioro ambiental causado por las actividades humanas, que dio lugar a que se dictaran, por parte de los poderes públicos, normas encaminadas a atajar el mismo.

En lo que se refiere al concepto de ‘*antropoceno*’, en el sentido de etapa de la historia de la Tierra caracterizada por la influencia humana sobre la misma, tampoco estamos ante algo reciente.

A mediados del siglo XIX, George Perkins Marsh, diplomático, filólogo e historiador americano, publica *Man and Nature. Or, Physical Geography as Modified by Human Action* (Marsh, 1864). En esa obra se señala la importancia de las modificaciones que las actividades humanas están produciendo en diferentes características del planeta, si bien no se hace una propuesta formal de definición de una nueva etapa de la historia geológica. Esta obra fue probablemente, junto con el *Origen de las especies*, de Darwin (1859; versión española, 1921), el texto más influyente en la visión de la naturaleza, su evolución y alteración en la segunda mitad del siglo XIX, y bien entrado el XX.

Pocos años después, Antonio Stoppani (1871-73) hizo una propuesta formal en este sentido. En su *Corso di Geologia* se refiere a “una nueva fuerza telúrica..... que puede compararse a las mayores fuerzas de la Tierra”, y propone el término “Era Antropozoica”, para referirse a ese nuevo tiempo.

Vladimir Vernadsky (biogeoquímico) publica en 1926 *La Biosfera*, en ruso, cuya primera traducción a otro idioma se hace al francés (Vernadsky, 1929). En esta obra, también disponible en castellano (Vernadsky, 1997), se concibe la Tierra como resultado de la superposición de cuatro realidades integradas: litosfera, hidrosfera, atmósfera, biosfera –a las que habría que añadir la hidrosfera– y tecnosfera (resultado de la alteración producida por el hombre), así como también la noosfera (esfera del pensamiento). Esta última, evidentemente, es de naturaleza no material. La evolución del planeta se habría producido en tres etapas sucesivas y de duración decreciente, dominadas respectivamente por la evolución geológica, la evolución biológica y la evolución de la cultura. El concepto de “noosfera” tuvo una considerable influencia en el pensamiento del siglo XX, y fue tomado y ampliamente difundido, entre otros, por Bergson (1934) y por el paleontólogo y filósofo Theilard de Chardin (1955).

En 1946, en un contexto periodístico, no científico, se propuso por parte de W.L. Lawrence, periodista de *The New York Times*, el término “Era Atómica” para el periodo que se abrió a raíz de las explosiones de Hiroshima y Nagasaki. Ese límite coincide, tal como señalan Finney y Edwards (2016), con el propuesto para el inicio del Antropoceno, por lo que dichos autores consideran que el término anterior debería tener prioridad a la hora de designar esa posible nueva época.

A mediados del pasado siglo, se celebró en Princeton un simposio internacional (International Symposium on Man’s Role in Changing the Face of the Earth; Thomas, 1956) del cual se editó un volumen en el que se incluye un trabajo que aborda la estimación de la magnitud de la que el autor denomina “technological denudation” (Brown, 1956). Este trabajo muestra de forma clara la importancia de las personas como agentes de erosión/sedimentación.

En 1988 G. Ter-Stepanian (geólogo) publica un artículo en el que se pone de manifiesto hasta qué punto los seres humanos estamos reproduciendo, imitando o reemplazando a los agentes naturales en multitud de procesos, atmosféricos, hidrológicos, biológicos, geológicos internos y externos, e incluso solares. El Cuadro 1, reproducido de Bruschi et al. (2012), a su vez modificado de Ter-Stepanian (1988), muestra la relevancia de ese tipo de influencias humanas como posibles marcadores del Antropoceno. El citado autor propone que el Holoceno es en realidad el ‘Tecnógeno’ o ‘Quinario’.

La irrupción del término ‘Antropoceno’ (no del concepto detrás del mismo, que, como hemos visto, con otros nombres arranca de mucho más atrás) se produce a partir de comienzo del presente siglo. Crutzen y Stoermer (2000) publican un artículo con difusión limitada, en la ‘Newsletter’ de un programa internacional (el International Geosphere-Biosphere Program, IGBP). Pero es a partir de una breve nota de gran impacto que el primero de dichos autores publica en *Nature* (Crutzen, 2002), cuando se lanza a nivel mundial tanto el término como el concepto del Antropoceno. En esa nota se propone que se tome el final del siglo XVIII como inicio de esa nueva época geológica: *“To assign a more specific date to the onset of the “Anthropocene” seems somewhat arbitrary, but we propose the latter part of the 18th century, although we are aware that alternative proposals can be made (some may even want to include the entire Holocene). However, we choose this date because, during the past two centuries, the global effects of human activities have become clearly noticeable. This is the*

Cuadro 1. Influencia humana en, o réplica de procesos naturales que afectan a la Tierra (de Bruschi et al., 2012; a su vez modificado a partir de Ter-Stepanian, 1988).

Influencia humana en procesos naturales que afectan a la Tierra (modificado a partir de Ter-Stepanian, 1988)	
NATURAL	HUMANO
BIOSFERA	
Evolución biológica, nuevas especies Selección natural de los más aptos Extinción de especies	Ingeniería genética, nuevos organismos <i>Selección artificial de los más útiles</i> <i>Extinción de especies (deliberada, indirecta)</i>
ATMÓSFERA/HIDROSFERA	
Evolución geoquímica de atmósfera/hidrosfera Ciclos y cambios climáticos	<i>Contaminación, composición agua y aire**</i> <i>Cambio climático antropogénico**</i>
PROCESOS INTERNOS	
Transferencia de energía interna Generación de energía interna Concentración geoquímica de metales Terremotos Metamorfismo de contacto Formación de minerales en el manto	Uso de energía geotérmica <i>Producción de energía nuclear**</i> <i>Explotación de minerales y metalurgia</i> Terremotos (embalses, explosiones) Producción de materiales cerámicos Producción de diamantes, etc. artificiales
PROCESOS SOLARES	
Síntesis de helio	<i>Fusión nuclear**</i>
PROCESOS SUPERFICIALES	
Meteorización física Meteorización química Transgresiones/regresiones Evolución cursos fluviales Evolución litoral Subsidencia y colapso Movimientos de ladera Formación de relieves Denudación, transporte, sedimentación	Trituración de rocas Tratamientos químicos en rocas, contaminación Aumento del nivel del mar <i>Canalización, rectificación, embalses**</i> <i>Ingeniería costera**</i> Extracción de fluidos, colapsos mineros Acción humana directa e indirecta** Minería y construcción?? <i>Denudación, transporte, depósitos antropogénicos**</i>

Posibles marcadores estratigráficos

****Significativo tras la Revolución Industrial**

period when data retrieved from glacial ice cores show the beginning of a growth in the atmospheric concentrations of several ‘greenhouse gases’, in particular CO₂ and CH₄. Such a starting date also coincides with James Watt’s invention of the steam engine in 1784”.

Aunque es algo de interés marginal en relación con el tema que nos ocupa, resulta interesante señalar que en 1606 Jerónimo de Ayanz, ingeniero de minas español, patentó y usó con éxito la máquina de vapor para bombeo de agua en la mina de plata de Guadalcanal, Sevilla (García Tapia, 2010). También, que en 1776 Boulton y Watt construyeron su primera máquina de vapor comercial (Hulse, 1999).

4. EL ANTROPOCENO EN EL DEBATE RECIENTE

The distinction between the past, present and future is only a stubbornly persistent illusion.
A. Einstein, 1955

Un artículo publicado en una revista de la Geological Society of America (Zalasiewicz et al., 2008), pone de manifiesto la decidida implicación de al menos parte de la comunidad geológica en este debate. En él se toma postura a favor del reconocimiento del Antropoceno: “... *since the start of the Industrial Revolution, Earth has endured changes sufficient to leave a global stratigraphic signature distinct from that of the Holocene or of previous Pleistocene interglacial phases, encompassing novel biotic, sedimentary, and geochemical change. These changes, although likely only in their initial phases, are sufficiently distinct and robustly established for suggestions of a Holocene-Anthropocene boundary in the recent historical past to be geologically reasonable. The boundary may be defined either via Global Stratigraphic Section and Point (“golden spike”) locations or by adopting a numerical date. Formal adoption of this term in the near future will largely depend on its utility, particularly to earth scientists working on late Holocene successions. This datum, from the perspective of the far future, will most probably approximate a distinctive stratigraphic boundary*”.

Esta y otras contribuciones dieron lugar a que la International Commission on Stratigraphy estableciera, en junio de 2009, un grupo de trabajo sobre el Antropoceno, dentro de la Subcommission on Quaternary Stratigraphy. La tarea asignada a este grupo fue “...*to examine the possibility of recognising an Anthropocene division either within the Holocene or separated from it*”.

Dos años después, el tema fue objeto de un editorial de Nature (Nature, 2011), en el que se indica que la aceptación formal del concepto (y de la unidad cronoestratigráfica correspondiente), podría fomentar la investigación interdisciplinar, si bien introduce una nota de cautela, señalando la necesidad de asegurarse de que los cambios hasta ahora observados no son una disfunción temporal del sistema, sino el inicio de una perturbación más grave y duradera: “*Official recognition of the concept would invite cross-disciplinary science. And it would encourage a mindset that will be important not only to fully understand the transformation now occurring but to take action to control it.Humans may yet ensure that these early years of the Anthropocene are a geological glitch and not just a prelude to a far more severe disruption. But the first step is to recognize, as the term Anthropocene invites us to do, that we are in the driver’s seat*”.

En ese mismo año, aparece otro artículo de gran repercusión sobre el tema, de nuevo generado por autores ajenos mayoritariamente a la comunidad geológica (Steffen et al., 2011). En esta contribución se aboga por el establecimiento formal del Antropoceno, y se propone nuevamente el final del siglo XVIII como su inicio. Además, retomando contribuciones anteriores (Steffen et al., 2006, 2007) se describe la existencia de una “*Great Acceleration*” (Fig. 3) que se inicia a mediados del siglo XX, con posterioridad a la Segunda Guerra Mundial. No es hasta varios años después que, en una nueva contribución de este autor y otros colaboradores (Steffen et al., 2015), se propugna que se tome esa ‘Gran Aceleración’ como el inicio del Antropoceno.

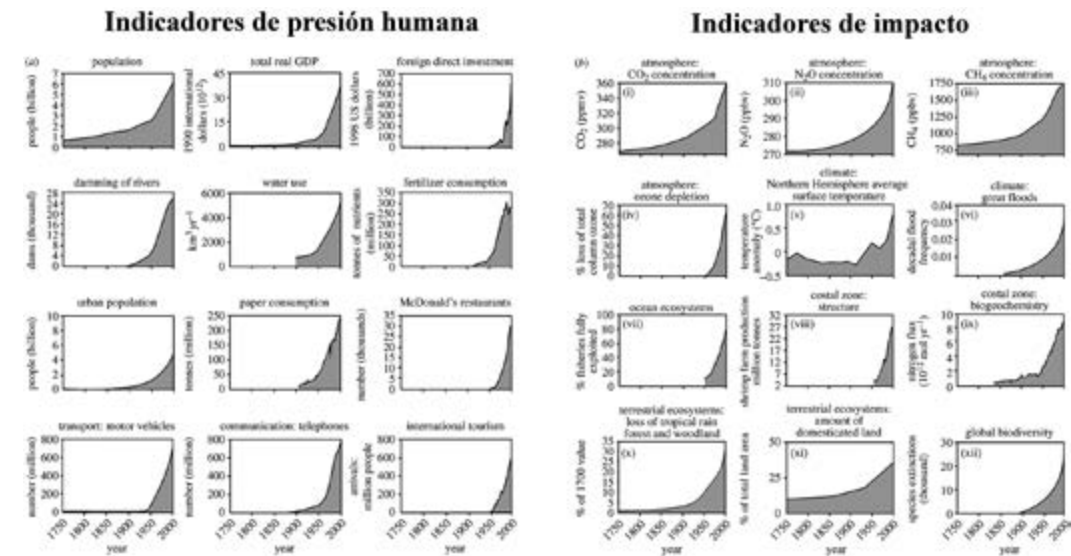


Fig. 3. La “Gran Aceleración” (Steffen et al., 2011).

Cuadro 2. Distintas fechas consideradas como posible inicio del Antropoceno (Lewis y Maslin, 2015).

Event	Date	Geographical extent	Primary stratigraphic marker	Potential GSSP date*	Potential auxiliary stratotypes
Megaflora extinction	50,000–10,000yr BP	Near-global	Fossil megaflora	None, diachronous over ~40,000yr	Charcoal in lacustrine deposits
Origin of farming	~11,000yr BP	Southwest Asia, becoming global	Fossil pollen or phytoliths	None, diachronous over ~5,000yr	Fossil crop pollen, phytoliths, charcoal
Extensive farming	~8,000yr BP to present	Eurasian event, global impact	CO ₂ inflection in glacier ice	None, inflection too diffuse	Fossil crop pollen, phytoliths, charcoal, ceramic minerals
Rice production	6,500yr BP to present	Southeast Asian event, global impact	CH ₄ inflection in glacier ice	5,020yr BP CH ₄ minima	Stone axes, fossil domesticated ruminant remains
Anthropogenic soils	~3,000–500yr BP	Local event, local impact, but widespread	Dark high organic matter soil	None, diachronous, not well preserved	Fossil crop pollen
New–Old World collision	1492–1800	Eurasian–Americas event, global impact	Low point of CO ₂ in glacier ice	1610 CO ₂ minima	Fossil pollen, phytoliths, charcoal, CH ₄ , speleothem δ ¹⁸ O, tephra†
Industrial Revolution	1760 to present	Northwest Europe event, local impact, becoming global	Fly ash from coal burning	~1900 (ref. 94); diachronous over ~200yr	¹⁴ N: ¹⁵ N ratio and diatom composition in lake sediments
Nuclear weapon detonation	1945 to present	Local events, global impact	Radionuclides (¹⁴ C) in tree-rings	1964 ¹⁴ C peak§	²⁴⁰ Pu: ²³⁹ Pu ratio, compounds from cement, plastic, lead and other metals
Persistent industrial chemicals	~1950 to present	Local events, global impact	For example, SF ₆ peak in glacier ice	Peaks often very recent so difficult to accurately date§	Compounds from cement, plastic, lead and other metals

For compliance with a Global Stratotype Section and Point (GSSP) definition, a clearly dated global marker is required, backed by correlated auxiliary markers that collectively indicate global and other widespread and long-term changes to the Earth system. BP, before present, where present is defined as calendar date 1950.

* Requires a specific date for a GSSP primary marker. †From Huaynaputina eruption in 1600 (refs 78, 79).

§ Peak, rather than earliest date of detection selected, because earliest dates reflect available detection technology, are more likely influenced by natural background geochemical levels¹⁰¹, and will be more affected by the future decay of the signal, than peak values.

Por su parte, Lewis y Maslin (2015), hacen una revisión bastante completa de las distintas fechas consideradas como posible inicio del Antropoceno (Cuadro 2), sopesando los pros y contras de cada una de ellas, sin pronunciarse claramente a favor de ninguna, pero señalando que alguna de las situadas entre 1610 y 1950 sería probablemente adecuada.

En el pasado año y el actual han aparecido numerosísimas contribuciones apoyando u oponiéndose al reconocimiento formal del Antropoceno, siendo ya patente la implicación de la comunidad geológica en este debate. Me limitaré a resumir aquí brevemente los argumentos en pro y en contra de dos de dichas contribuciones.

El antes citado grupo de trabajo sobre el Antropoceno publicó el pasado año (Waters et al., 2016) una interesante revisión sobre la naturaleza de esta posible unidad cronoestratigráfica, presentando una serie de argumentos a favor de reconocer la misma, algunos de los cuales reproduzco a continuación:

“Anthropocene markers reflect an additional key driver, This driver has produced a wide range of anthropogenic stratigraphic signals, including examples that are novel in Earth history, that are global in extent, and that offer fine temporal resolution”.

“The driving human forces responsible for many of the anthropogenic signatures are a product of the three linked force multipliers: accelerated technological development, rapid growth of the human population, and increased consumption of resources. These have combined to result in increased use of metals and minerals, fossil fuels, and agricultural fertilizers and increased transformation of land and nearshore marine ecosystems for human use”.

“Recent anthropogenic deposits, which are the products of mining, waste disposal (landfill), construction, and urbanization, contain the greatest expansion of new minerals since the Great Oxygenation Event at 2400 Ma and are accompanied by many new forms of “rock”, in the broad sense of geological materials with the potential for longterm persistence”.

“.....technofossils provide anual to decadal stratigraphic resolution...”.

“.....spherical carbonaceous particles (SCPs) show a near-synchronous global increase around 1950 CE.....permanent marker within both sediments and glacial ice”.

“Among the many distinct geochemical signatures that human activities have introduced into the sedimentary record are elevated concentrations of polyaromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls, and diverse pesticide residues, each beginning at ~1945 to 1950 CE”.

“Potentially the most widespread and globally synchronous anthropogenic signal is the fallout from nuclear weapons testing”.

Encarnando una visión muy diferente, Finney y Edwards (2016) se pronuncian vehementemente en contra. Reproduzco de nuevo parte de los argumentos presentados:

“A geochronologic unit (period, epoch, age) is the time interval during which the strata of a chronostratigraphic unit accumulated (Salvador, 1994). Geologic and biologic events and settings of the past, recorded in and interpreted from the rock record, are expressed in terms of geochronologic units”.

“Most of the stratigraphic records mentioned are potential records that might appear in the future; they are based on predictions. Human structures, excavations, boreholes, bioturbation of soils (agriculture) and the sea floor (drag net fishing) are not strata. Made ground, refuse piles, mine dumps, and leach pads are made by humans rather than by natural sedimentation. The strata with records of anthropogenic change are speleothems, ice cores, and non-lithified sediments of rivers, marshes, lakes, coasts, and the ocean floor”.

“The Anthropocene, as currently popularized, is fundamentally different from the chronostratigraphic units that are the charge of the ICS. It is the present and future versus the past”.

“Finally, it must be noted that with 1945 as the beginning, it would be a geologic time unit that presently has a duration of one average human life span”.

“Or, as the editorial in Nature (2011) argued, official recognition would encourage cross-disciplinary science and a “mindset” to understand and to take control of the current transformation. However, it is political action that is required to meet the ultimate goals of ameliorating human impact, which raises the question of the ICS making a political statement”.

En mi opinión, los argumentos que apoyan estas posturas contrapuestas son en ambos casos razonables. Por un lado, no hay duda de que los cambios en los procesos y la aparición de nuevos materiales en el registro geológico que describen Waters et al. (2016), son reales. Por otro lado, las objeciones de Finney y Edwards (2016) con respecto a la conveniencia de encajar esa nueva unidad en la escala cronoestratigráfica internacional, de acuerdo con los criterios hasta ahora utilizados para definir las demás, también están fundamentadas.

En una contribución surgida del grupo de trabajo sobre el Antropoceno (Steffen et al., 2016), se aboga por conciliar ambas visiones, estratigráfica y de sistema terrestre, que los dos artículos anteriores representan. Y otro artículo, fruto también de las reflexiones del mismo grupo (Zalasiewicz et al., 2017), hace una revisión de las opiniones en contra del reconocimiento formal del Antropoceno como una época geológica y su incorporación a la escala cronoestratigráfica internacional, presentando argumentos para rebatir las mismas.

Se podrían citar muchos otros ejemplos, pues las aportaciones sobre el tema no dejan de producirse, pero los presentados me parecen suficientes. No deja de ser interesante, tratándose de un tema que afecta al concepto de unidad cronoestratigráfica y al establecimiento de la correspondiente escala global, que el interés de la comunidad geológica por el mismo haya sido limitado hasta bien entrado el presente siglo. La gran mayoría de las contribuciones que he reseñado proceden de autores que se encuadran en otros campos científicos. Además, aportaciones importantes como las de Stoppani (1871-73) o Ter-Stepanian (1988), han sido en gran medida ignoradas, muy especialmente las de este último, al cual no se cita en ninguno de los artículos reseñados. Curiosamente, este tipo de olvido no parece darse en ciertos ámbitos de la comunidad científica, como, por ejemplo, en Brasil. En el XV Congresso da Associação Brasileira de Estudos sobre o Quaternario (ABEQUA), celebrado en 2015, se organizó un “Simpósio do Tecnógeno-Antropoceno”, título que representa un evidente reconocimiento a las ideas de ese último autor. Y también es de reseñar que la discusión se centra, en gran medida, en aspectos formales, especialmente por los que no son partidarios del reconocimiento del Antropoceno por parte de la ICS (o, con carácter más general, de la

IUGS). Se cuestiona la posibilidad de definir una nueva unidad de la historia geológica de acuerdo con criterios similares a los utilizados para definir las ya aceptadas, y también la pertinencia de aceptar dicha unidad.

5. EL ‘CONTENIDO’ DEL ANTROPOCENO ¿LAS COSAS SON O NO SON DIFERENTES?

Conviene en este punto considerar los elementos materiales que han experimentado cambios en los tiempos recientes, que podrían servir para definir el Antropoceno y permitirían diferenciarlo de periodos anteriores a través del registro geológico. Esto es, tratar de ver si los citados cambios son significativos y de una entidad comparable a los cambios que han marcado el tránsito entre otras épocas geológicas. Dichos elementos son básicamente de dos tipos. Por un lado, los depósitos y formas que se están originando como consecuencia de la actividad humana y que son diferenciables de los debidos a procesos naturales. Eso incluye diversos tipos de rocas, minerales, compuestos químicos y fósiles ‘tecnológicos’, así como ‘antropogeoformas’ no existentes en etapas anteriores de la historia geológica. Se pueden citar como ejemplos el hormigón, los materiales cerámicos, los minerales derivados de la metalurgia, metales como el aluminio o el acero, plásticos, multitud de compuestos sintéticos y, por supuesto, radionucleidos de origen artificial. También, unidades ‘antropogeomorfológicas’ de dimensiones muy considerables, como las ciudades o grandes obras civiles. Por otro lado, están los cambios que hayan podido experimentar ciertos procesos que, aunque no necesariamente generen nuevos materiales, sí pueden dar lugar a variaciones significativas en las tasas de los mismos. Baste citar como ejemplos el bien conocido cambio climático o, bastante menos conocidos por el público en general, la extinción de especies (o la aparición de nuevas especies o variedades producto de la acción humana) y los procesos de erosión y sedimentación. Muchos de esos cambios pueden dejar huellas identificables (marcadores estratigráficos) en el registro geológico (Price, 2011; Lewis y Maslin, 2015), que podrían ser identificados por los geólogos en el futuro (¿dentro de cientos, miles, centenares de miles o millones de años?). Otros, probablemente no persistirán más de unas décadas. La persistencia o no de esos elementos en el registro geológico dependerá de la naturaleza de los mismos y de las condiciones ambientales existentes en el medio de deposición. Exactamente lo mismo que ha ocurrido, a lo largo de toda la historia geológica, con los restos fósiles de origen puramente natural.

Sin ánimo de ser exhaustivo, ni mucho menos, creo conveniente relacionar aquí una serie de ejemplos de nuevos elementos materiales actualmente identificables en el registro geológico. Muchos de estos, y otros que vayan apareciendo, serán muy probablemente cada vez más abundantes en el futuro. Por el contrario, otros se han incorporado a ese registro durante un tiempo muy corto. Eso hace que puedan ser especialmente útiles para la datación como ‘fósiles guía’ (fósiles correspondientes a organismos que vivieron durante un periodo muy corto y tuvieron una amplia distribución geográfica) del Antropoceno.

Una recopilación muy completa sobre posibles marcadores estratigráficos del Antropoceno es la presentada por Waters et al. (2014). Posteriormente, Waters et al. (2016) ponen de manifiesto la importancia de los impulsores humanos en los cambios que se están re-

gistrando: *“The driving human forces responsible for many of the anthropogenic signatures are a product of three linked force multipliers: accelerated technological development, rapid growth of the human population and increased consumption of resources”*. Esto es, llaman la atención sobre un importante cambio cualitativo que se ha producido en el funcionamiento de los sistemas naturales, la aparición del ser humano como nuevo agente determinante de los procesos que ocurren en el planeta.

La figura 4 (Waters et al., 2016) muestra los marcados aumentos experimentados en tiempos recientes por distintos indicadores, que han dejado huellas en el registro geológico. Esos indicadores afectan a la temperatura, la composición de la atmósfera o la producción de materiales que se incorporan a los sedimentos. Muy interesante es también la presencia de nuevas ‘rocas’, ‘minerales’, compuestos o elementos químicos (Fig. 5; Waters et al., 2016). Como ya he indicado más arriba, estos autores señalan que el momento actual representa la mayor generación de nuevos minerales en el planeta, desde el “Great Oxygenation Event” hace 2400 millones de años. El hormigón, el aluminio, los plásticos, las fibras sintéticas y muchos otros materiales no existían sobre el planeta (o aparecían de manera muy marginal) hasta bien entrado el siglo XX. Esos materiales están actualmente presentes en todo el mundo, y se están incorporando a los sedimentos que se acumulan en todo tipo de ambientes de sedimentación. Lo mismo ocurre con el ‘black carbon’ (hollín) producto sobre todo de la combustión incompleta de combustibles fósiles. Este, además, presenta una distribución absolutamente global, depositándose tanto en los sedimentos (especialmente de ambientes subacuáticos) como en los hielos glaciares, con un aumento de la concentración en los mismos que es prácticamente sincrónico en todo el mundo (Fig. 5).

También son significativas, de carácter global y en gran medida sincrónicas, toda una serie de huellas geoquímicas, tales como la presencia de hidrocarburos poliaromáticos, bifenilos policlorados, y restos de diversos pesticidas, todos ellos a partir de la Segunda Guerra Mundial. La relación $^{207/206}\text{Pb}$, si bien experimentó cambios locales ya en época romana debido a la obtención de ese metal, muestra un cambio generalizado al inicio del siglo XX, como consecuencia de consumo de gasolinas con plomo. Esa señal se mitiga a final del pasado siglo, debido a las medidas anticontaminación que se han ido implantando en casi todos los países. Es igualmente importante la perturbación del ciclo del nitrógeno, con una variación muy patente de la relación $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ (‰) hacia 1950, o bien el aumento de la concentración de multitud de elementos, incluyendo las tierras raras, cuyo uso se produce sobre todo a raíz de la citada guerra. Mucho más conocida es la perturbación del ciclo del carbono, con el consiguiente incremento de las concentraciones de CO_2 y CH_4 en la atmósfera. Finalmente, el marcador de presencia más general y prácticamente sincrónico son los radionucleidos derivados de las explosiones nucleares (Waters et al., 2016).

Además, los seres humanos también hemos contribuido de manera importante a cambiar los organismos que se están incorporando y se incorporarán en el futuro a diferentes tipos de acumulaciones sedimentarias, constituyendo fósiles. Eso incluye la presencia de polen y otros restos de especies vegetales y variedades cultivadas, o bien los esqueletos, dientes, etc., de animales domésticos. El incremento en la tasa de extinción de especies ha sido también notable, dando lugar a que se hable de una sexta extinción masiva (Ceballos et al., 2015).

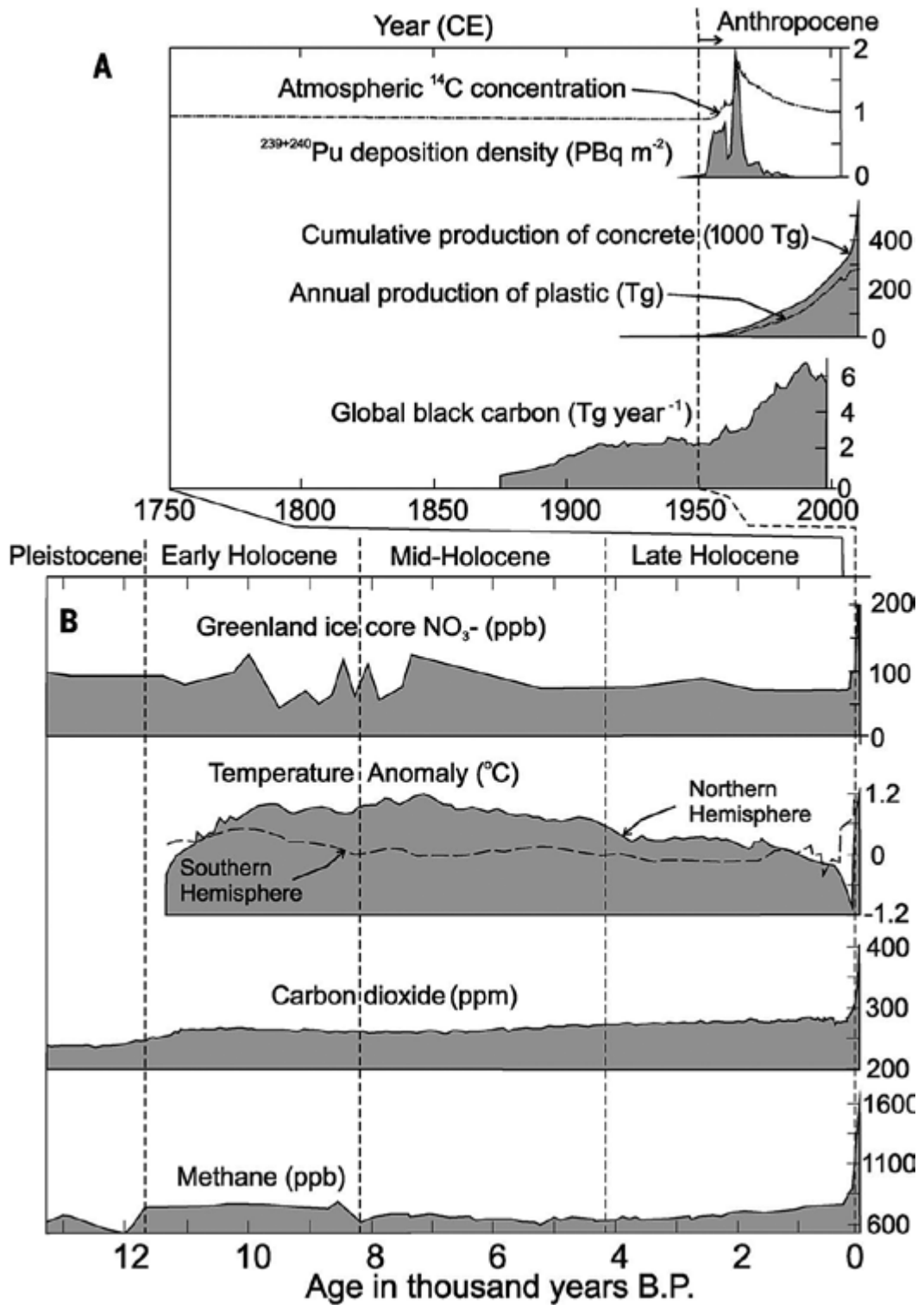


Fig. 4. Aumentos experimentados en tiempos recientes por distintos indicadores, que han dejado huellas en el registro geológico (Waters et al., 2016).

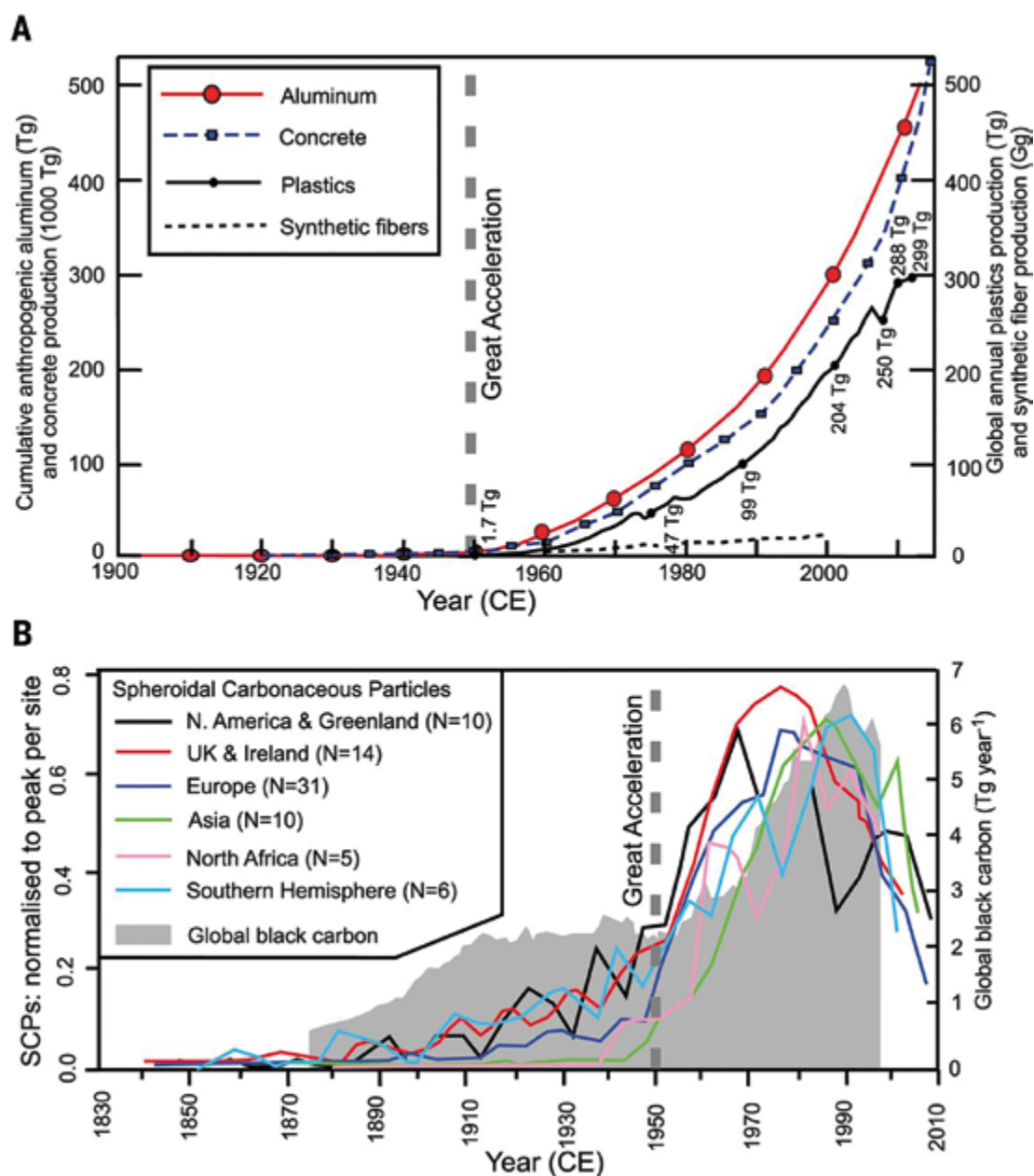


Fig. 5. Nuevos materiales (“rocas”, “minerales”, compuestos o elementos químicos) en el planeta (Waters et al., 2016).

Al mismo tiempo, la hibridación entre especies autóctonas e introducidas y otras causas humanas están dando lugar a la aparición de muchas especies nuevas en todas las regiones del mundo (Thomas, 2013; Thompson, 2016).

Pero no solo aportamos fósiles biológicos, sino también un conjunto de ‘tecnofósiles’ que permitirán realizar dataciones con una gran resolución temporal, puesto que se conoce

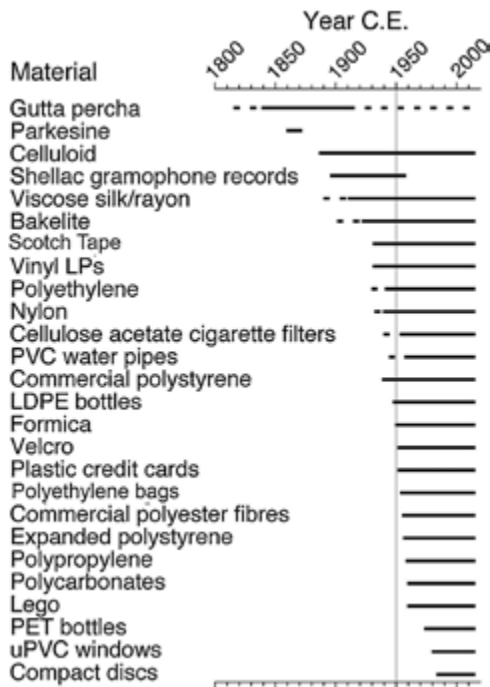


Fig. 6. "Tecnofósiles" correspondientes a distintos materiales plásticos (Zalasiewicz et al., 2016).

perfectamente el momento en el que empezaron a producirse (o dejaron de hacerlo). La figura 6 (Zalasiewicz et al., 2016) presenta una serie de ejemplos de 'tecnofósiles' correspondientes a distintos materiales plásticos. En la figura 7, se muestran otros ejemplos, de materiales cerámicos incluidos en sedimentos antropocenos en Vizcaya (Astibia, 2012; Zalasiewicz et al., 2017), y que también hacen posible la datación con una resolución temporal muy fina.

Otro tipo de elementos característicos del Antropoceno son las geoformas producidas por las actividades humanas. Si bien la construcción de unidades geomorfológicas producto de la acción humana es algo que se produjo ya hace miles de años (Bruschi et al., 2012), hasta bien entrado el siglo XX no se produce una presencia generalizada de las mismas en todas las regiones del mundo, y a una escala sin precedentes. Esas geoformas



Fig. 7. "Tecnofósiles" de materiales cerámicos en sedimentos antropocenos en Vizcaya (Astibia, 2012; Zalasiewicz et al., 2017).

artificiales o ‘antropogeoformas’ incluyen algunas de enormes dimensiones, como las grandes aglomeraciones urbano-industriales, comparables a, o mayores que grandes construcciones presentes en el registro fósil, como los arrecifes, y potencialmente tan duraderas como estas. Igualmente, las redes de autopistas y carreteras, canales, embalses, grandes excavaciones y acumulaciones mineras, acumulaciones de inertes de distintos tipos, etc. También estas ofrecen la posibilidad de datación precisa en el futuro.

6. LOS PROCESOS GEOLÓGICOS Y EL ANTROPOCENO

Como hemos visto hasta aquí y es bien conocido, la actividad humana ha dado lugar, en tiempos recientes (entendiendo por tales el último par de siglos), a modificaciones apreciables en los procesos atmosféricos que afectan al clima, así como en la biodiversidad. Si bien hay ejemplos de que la influencia de nuestra especie se remonta a hace varios milenios, estos han tenido carácter local y puntual hasta, al menos, la Revolución Industrial. También hemos visto, algo mucho menos conocido para el público en general, que se ha producido la aparición de un amplio conjunto de nuevos materiales que se están incorporando al registro geológico y que en el futuro (¿durante milenios o millones de años?) podrían permitir la caracterización de las sucesiones estratigráficas del Antropoceno. Igualmente hay en este caso ejemplos de hace milenios, como ocurrió a raíz del desarrollo de la metalurgia, pero, al igual que los anteriores, no representaron una modificación de ámbito global.

Todavía menos conocido es, incluso dentro de amplios sectores de la comunidad científica, que la influencia humana se ha dejado sentir desde tiempos muy antiguos (igualmente con carácter local), en ciertos procesos geológicos. Este es un tema que nos ha interesado y ocupado desde hace tiempo (Cendrero y Douglas, 1996; González et al., 1996, 1999; Rivas et al., 2002; Remondo et al., 2005) y que ya he abordado en esta Academia en ocasiones anteriores (Cendrero, 2003; Bruschi et al., 2012; Cendrero, 2015). Parece que la influencia humana sobre estos procesos, hasta hace poco de carácter local y con escaso alcance para el conjunto del planeta, ha pasado a ser generalizada y de magnitud muy notable en la actualidad (Rivas et al., 2006; Bonachea et al., 2010, Bruschi et al., 2013; Forte et al., 2016). Como se muestra más abajo, nuevos datos recientemente obtenidos confirman esto.

Se tiende a considerar que los rasgos geológicos son un elemento ‘permanente’ de nuestro entorno y que los procesos geológicos se desarrollan a escalas temporales cuya magnitud hace que no se vean influidos por la actividad humana. Eso es cierto, por ejemplo, para procesos tectónicos o magmáticos profundos, o para los que dan lugar a la formación de la mayoría de las rocas. Pero, como veremos, no es el caso para los procesos geológicos superficiales o procesos geomorfológicos. Estos procesos implican la denudación y modificación del relieve por parte de distintos agentes erosivos (atmósfera, lluvia, ríos, glaciares, oleaje, viento), el arrastre y acumulación de sedimentos (paso inicial de la formación de las rocas sedimentarias y de las sucesiones estratigráficas), y la construcción de geoformas, unidades geomorfológicas o formas del paisaje (‘landforms’). Los procesos geológicos superficiales muestran en tiempos recientes variaciones cualitativa y cuantitativamente muy significativas. Estas variaciones parecen estar dando lugar a un nuevo tipo de funcionamiento de los siste-

mas geomorfológicos, sin precedentes en la historia del planeta, que podría representar uno de los rasgos característicos del Antropoceno (Cendrero et al., 2006; Bruschi et al., 2013), cuyo modelo conceptual se muestra en la figura 8 (Cendrero et al., 2006).

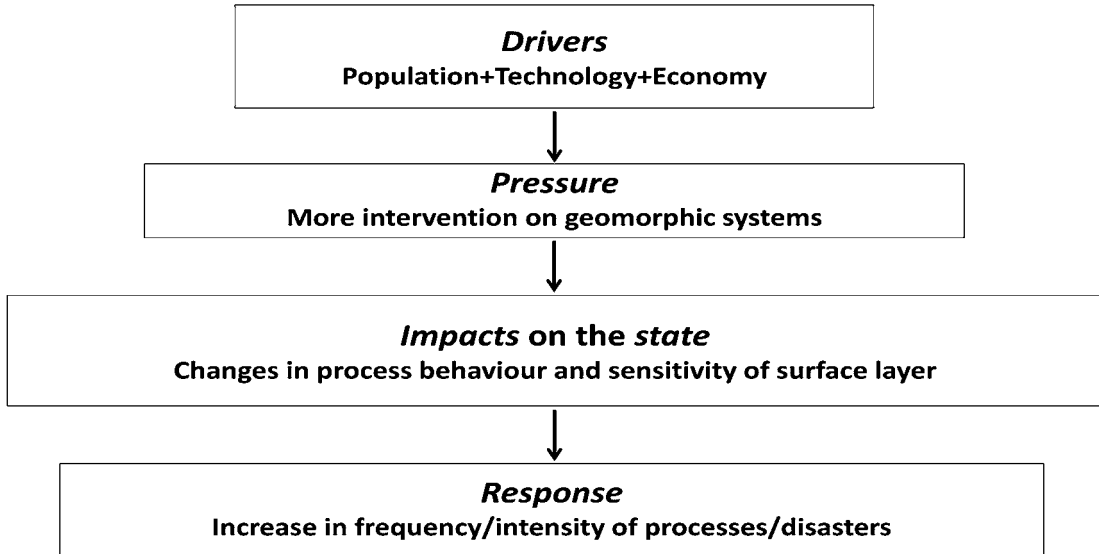


Fig. 8. Modelo conceptual de Cendrero et al. (2006).

6.1. La huella geomorfológica humana

Para tratar de expresar en términos cuantitativos la influencia humana sobre los procesos geomorfológicos, se desarrolló el concepto de ‘huella geomorfológica humana’ (“*human geomorphic footprint*”, HGF; Rivas et al., 2006). Dicha huella se expresa en términos de la superficie ocupada por geoformas debidas a la acción humana directa, tales como zonas urbanas e industriales, infraestructuras de comunicaciones y de otros tipos, excavaciones mineras, acumulaciones de distintos tipos de materiales, incluyendo los escombros de minas, etc., y del volumen de materiales geológicos movilizados por dicha acción (la “*technological denudation*” de Brown, 1956). No se incluyen en esas estimaciones las zonas modificadas por actividades agro-forestales, que ocupan extensiones muy considerables y tienen efectos muy importantes sobre los procesos de erosión/sedimentación. Las unidades para expresar la HGF son $\text{m}^2 \text{pers}^{-1} \text{año}^{-1}$ de nuevas geoformas y $\text{m}^3 \text{pers}^{-1} \text{año}^{-1}$ de materiales excavados y desplazados (o bien los valores totales anuales a nivel global).

Los resultados obtenidos por Rivas et al., (2006) que, por supuesto, son estimaciones que presentan incertidumbres, indican que los promedios de los citados valores, a finales del pasado siglo e inicio del actual, eran aproximadamente $7 \text{ m}^2 \text{pers}^{-1} \text{año}^{-1}$ de nuevas geoformas y $18 \text{ m}^3 \text{pers}^{-1} \text{año}^{-1}$ de materiales movilizados. La ‘denudación tecnológica’ que esto representa sería equivalente a la erosión, para el conjunto de las tierras emergidas, de algo menos de 1 mm a^{-1} . Las estimaciones correspondientes a la erosión debida a procesos

naturales se sitúan en $0.1 - 0.01 \text{ mm a}^{-1}$. De nuevo según esos autores, la movilización de materiales geológicos por las actividades humanas (fundamentalmente construcción y minería) sería a nivel global de aproximadamente 10^{17} t a^{-1} . Los sedimentos aportados a los océanos por parte de todos los ríos del mundo (el principal agente de transporte de sedimentos, con gran diferencia), equivaldrían a $10^{15} - 10^{16} \text{ t a}^{-1}$. Estos aportes se deben también en gran medida a acciones humanas relacionadas con actividades agrícolas y forestales. Como señalaba Sánchez de la Torre (1983), el principal sistema natural de transferencia de materiales geológicos en superficie que ha existido hasta tiempos recientes, *cordillera-río-cuenca de sedimentación*, está siendo sustituido por su equivalente humano, *mina/cantera-carretera/ferrocarril-ciudad*. Eso, a la vista de los datos anteriores, parece ahora mucho más claro que hace 34 años.

Suponiendo que las estimaciones presentadas sean válidas, tendríamos que el efecto de los seres humanos como agentes de erosión, transporte y sedimentación, sería un orden de magnitud superior (¿o más?) al de los agentes naturales. Esto representaría un importantísimo cambio en el funcionamiento de los procesos geomorfológicos, tanto desde el punto de vista cualitativo (las personas habríamos pasado a ser el principal agente de erosión/sedimentación) como cuantitativo (un aumento de al menos un orden de magnitud en las tasas). En lo que se refiere a la construcción de nuevas ‘antropogeoformas’, Rivas et al. (2006) indican que, si las estimaciones de la HGF que presentan son correctas, la superficie total ocupada por las mismas probablemente superará $10 \times 10^6 \text{ km}^2$ en la segunda mitad de este siglo. Esos cambios, de gran magnitud y ocurridos en menos de un siglo, son rapidísimos en términos geológicos.

Las ‘antropogeoformas’ tienen características equivalentes a las de las unidades geomorfológicas naturales. Una unidad geomorfológica se caracteriza por tener unas determinadas formas, estar constituida por ciertos materiales, experimentar procesos propios de las mismas y, con frecuencia, albergar comunidades biológicas características, adaptadas a lo anterior. Es el caso de unidades tales como arrecifes, morrenas glaciares, llanuras aluviales, playas, campos de dunas, etc. Todas esas condiciones las reúnen también, entre otras, las aglomeraciones urbano-industriales o las áreas sujetas a minería a cielo abierto (Cendrero et al., 1987; Cendrero, 2003). Hay buenas razones para pensar que muchas de estas ‘antropogeoformas’ pueden persistir en el paisaje durante tiempos similares (o superiores) a esas unidades naturales, y por lo tanto incorporarse al registro geológico en términos equivalentes.

6.2. *Procesos de erosión/sedimentación*

Pero las actividades que originan la ‘huella geomorfológica humana’, así como otras actividades transformadoras del territorio, como por ejemplo las relacionadas con la agricultura o la explotación forestal, dan lugar a que se intensifiquen los procesos de erosión, con el consiguiente aumento de la sedimentación (Fig. 8). Los datos obtenidos por Bonachea et al. (2010), Bruschi et al. (2012, 2013 a, 2013 b, Forte et al., 2016) muestran que, tanto en la cuenca del Río de la Plata y la Pampa húmeda como en el N de España, las tasas de sedimentación han aumentado de manera muy notable a lo largo del último siglo.

En una contribución reciente (Forte, 2017), se han presentado nuevos e interesantes datos sobre este tema. Analizando los resultados obtenidos para esas dos regiones, se señala que en la primera se han realizado determinaciones de tasas de sedimentación en 10 sondeos, en ninguno de los cuales se ha encontrado disminución de las mismas. En 3 de ellos las tasas de sedimentación mostraron estabilidad, pero se trata de lugares seleccionados, precisamente, para contraste con los anteriores, porque en ellos era esperable esa estabilidad. Se intentaba comprobar el modelo, a través de la comparación con otros puntos en los que se esperaba encontrar aumento. En el caso del N de España, se dispone de determinaciones en 14 sondeos. Nuevamente, ninguno presenta disminución de las tasas y tres presentan estabilidad. Estos no son lugares seleccionados *a priori*, como en el caso anterior, si bien hay explicaciones razonables (no certidumbre) para la estabilidad encontrada. Además, en la gran mayoría de los sondeos en los que se registra aumento de las tasas de sedimentación, en ambas regiones, dichas tasas se aceleran en las últimas décadas.

En las dos regiones, las tendencias de variación de las tasas de sedimentación y de los indicadores de actividades humanas son similares, especialmente a partir de 1960, periodo para el que las series de datos son mejores y más completas. Los factores de aumento de las tasas de sedimentación son 1,5-10 en el N de España y 8-20 en la cuenca del Plata y Pampa húmeda. Para los mismos lapsos temporales, los factores de aumento de los indicadores de la intensidad de las actividades humanas son, respectivamente, 2-10 en la primera región y 3-14 en la segunda. Entre estos indicadores, los que tienen una relación más clara con la transformación del territorio (PIB, consumo de energía, consumo de cemento), son los que muestran una relación más estrecha con las tasas de sedimentación. Por otro lado, tanto la precipitación anual como la frecuencia de episodios de lluvias intensas a lo largo del mismo periodo, aumentan muy ligeramente en la cuenca del Plata y disminuyen en el N de España (coincidiendo con el mayor aumento de las tasas). Concluye Forte (2017), que la interpretación más razonable es que la creciente acumulación (reflejo de una creciente generación) de sedimento *“no se debe a causas climáticas, sino a la transformación del territorio por las actividades humanas”*.

Resultados adicionales presentados por ese mismo autor, indican que el ‘cambio geomorfológico’ tiene, en efecto, carácter global, así como una magnitud que supera ampliamente a otros cambios que afectan a nuestro entorno. También, que ese cambio parece ser una de las características del Antropoceno. El trabajo abordado por Forte (2017) trata de comprobar si datos adicionales a los obtenidos en contribuciones anteriores (Remondo 2001; Cendrero 2003; Cendrero et al., 2006; Bonachea et al., 2010; Bruschi et al., 2012, 2013 a, b; Forte et al., 2016) apoyan o contradicen la hipótesis en ellas formulada, que considera la existencia de un cambio geomorfológico global, impulsado por las actividades humanas que afectan a la superficie terrestre, el cual estaría dando lugar a la intensificación de los procesos geomorfológicos, de acuerdo con el modelo conceptual que se muestra en la figura 8. Además, si existe una ‘gran aceleración geomorfológica’ (Bruschi et al., 2013; Forte et al., 2016) coincidente con la ‘Great Acceleration’ de Steffen et al. (2011), que pudiera ser una de las características del Antropoceno.

El análisis de Forte (2017) cubre el periodo desde la segunda mitad del siglo XIX hasta la actualidad, y se ha centrado en dos tipos de indicadores de la intensidad de los procesos

geomorfológicos: las tasas de sedimentación y la frecuencia de los desastres debidos a inundaciones, deslizamientos de tierras, coladas de fango, etc. Para las primeras ha recopilado datos, a partir de la literatura, sobre más de un millar de lugares en distintas regiones del mundo, muy diversas en cuanto a sus características geomorfológicas, climáticas y socio-económicas (China, India, Estados Unidos, Europa, Australia), cuya superficie total representa aproximadamente el 30% de los continentes, excluida la Antártida. Para los segundos, ha obtenido los datos de bases de datos internacionales, que se presentan por países y tienen cobertura global.

La mayoría de los datos sobre tasas de sedimentación obtenidos tienen una baja resolución temporal, y cubren periodos bastante variables. Por ello, para su análisis consideró tres grandes lapsos temporales (límites aproximados): pre 1900; 1900-1950; 1950-actualidad. En cada una de las regiones, los diferentes lugares con datos se agruparon por ambientes de sedimentación (lagos, llanuras aluviales, estuarios, etc.) y por zonas geográficas (grandes unidades fisiográficas, salvo en el caso de Europa, donde se tomaron países). Evidentemente, ambos tipos de conjuntos contienen, para cada región, los mismos datos, aunque agrupados de diferente manera. El total de las agrupaciones así establecidas fueron 35 ambientes de sedimentación y 31 áreas geográficas. El mismo tipo de agrupaciones se establecieron tomando solamente los lugares para los cuales existen datos sobre tasas de sedimentación para los tres lapsos temporales considerados, que son 27 ambientes de sedimentación y 27 áreas geográficas.

En las agrupaciones de todos los puntos con datos, se observa un aumento generalizado de las tasas de sedimentación con el tiempo, con solo tres excepciones en el caso de los ambientes de sedimentación y una para las áreas geográficas. Algo similar ocurre cuando el análisis se restringe a los puntos que tienen datos para los tres lapsos temporales. En este caso las excepciones son 3 en los ambientes y 2 en las áreas geográficas. Todas las excepciones corresponden a agrupaciones con un número escaso de puntos con datos. En las figuras 9-13 se presentan los promedios (no ponderados) de las tasas de sedimentación para los 5 grandes países/continentes analizados. Los factores de aumento de las tasas de sedimentación en las 5 grandes regiones indicadas, así como los obtenidos a través de la datación de testigos de sondeos en la cuenca del Río de la Plata (Bonachea et al., 2010) y el N de España (Bruschi et al., 2013 a) oscilan entre 2 y 22, con un promedio aproximado (media no ponderada) de 8. Esto es, la intensificación de los procesos geológicos de erosión/sedimentación parece tener carácter global, y afectar a todo tipo de medios de sedimentación y agentes erosivos.

Además, en las 7 áreas indicadas (China, India, USA, Europa, Australia, Cuenca del Plata, N de España) se observa una aceleración de las tasas de sedimentación en el tercer lapso temporal considerado, a partir de mitad del siglo XX, en general de tipo geométrico. Solo en USA esta aceleración es muy leve, y de tipo aritmético.

La intensificación de los procesos de erosión, con el consiguiente aumento de las tasas de sedimentación, puede obedecer a dos causas: aumento de las precipitaciones (cambio climático) o alteración de la superficie terrestre (cambio geomorfológico). Forte (2017) analiza las posibles relaciones entre ambas, tomando como indicadores en el primer caso las precipitaciones (datos de IPCC, 2007; GPCC, 2011) y en el segundo el PIB (datos de Madison,

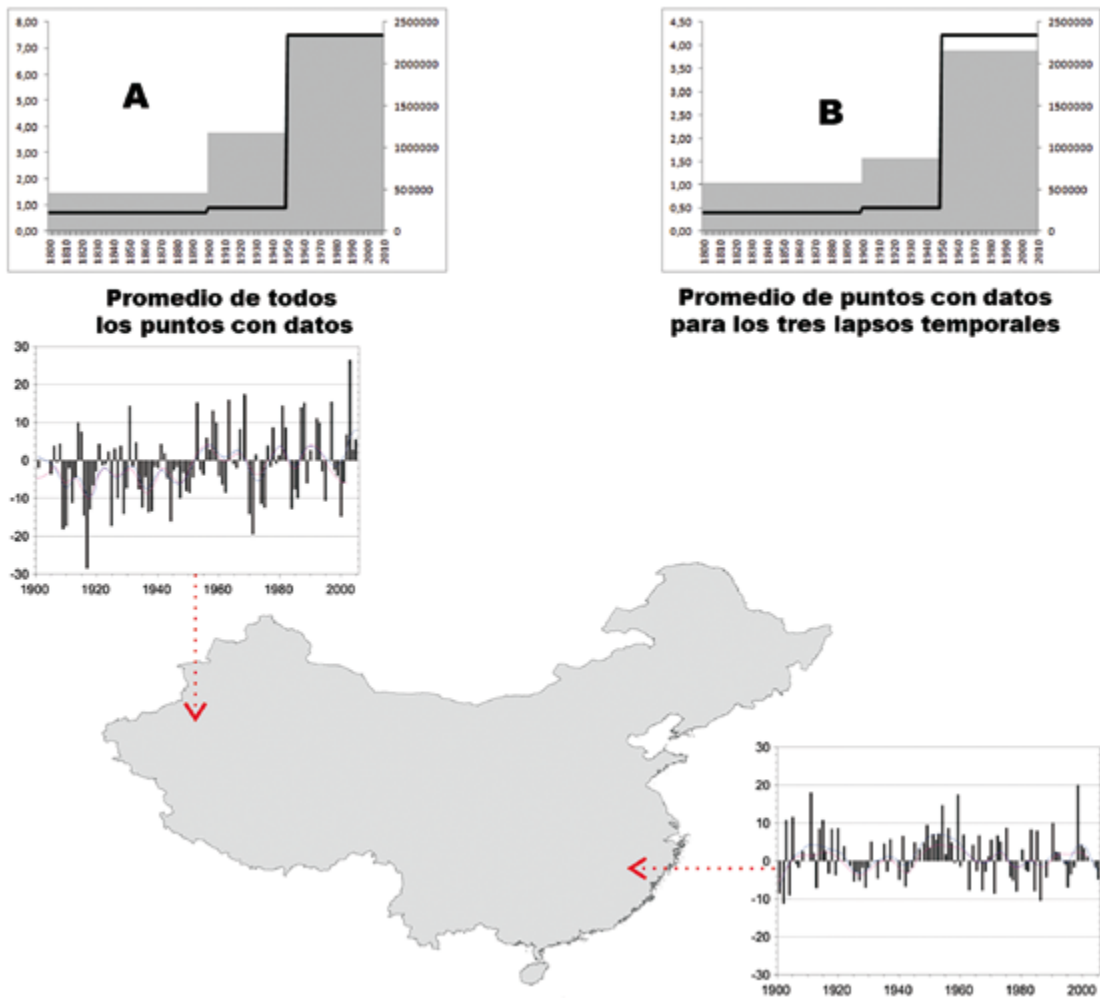


Fig. 9. China. Promedios del PIB y de las tasas de sedimentación (A: todos los puntos; B: solamente puntos con datos para los tres lapsos temporales considerados) para el conjunto del país, y precipitaciones anuales en dos regiones (Forte, 2017).

2007; Bolt y van Zanden, 2013). Considera, como ya se ha comentado, que cuanto mayor sea el PIB (total, no *per cápita*), mayor será el grado de intervención sobre la superficie terrestre. Las figuras 9-13 muestran la comparación de las tres variables indicadas (tasas de sedimentación, PIB, precipitaciones) en las 5 grandes regiones para las que obtuvo datos. Es patente que el paralelismo *tasas de sedimentación/PIB* es mucho mayor que el de *tasas de sedimentación/lluvias*. El factor de aumento del PIB es algo superior al de las tasas de sedimentación, lo cual es lógico, ya que no todas las actividades que contribuyen al PIB influyen directamente sobre la transformación del territorio (por ejemplo, la mayor parte del sector servicios y muchas manufacturas). Llama la atención Forte (2017) sobre el hecho de que las precipitaciones, al contrario de lo que ocurre con el PIB, no solo no muestran paralelismo con las tasas de sedimentación, sino que sus variaciones en el periodo considerado no superan en ningún caso el 10%, y que son de sentidos contrarios (aumento, disminución, estabilidad), incluso dentro de una misma región (Figs. 9-13).

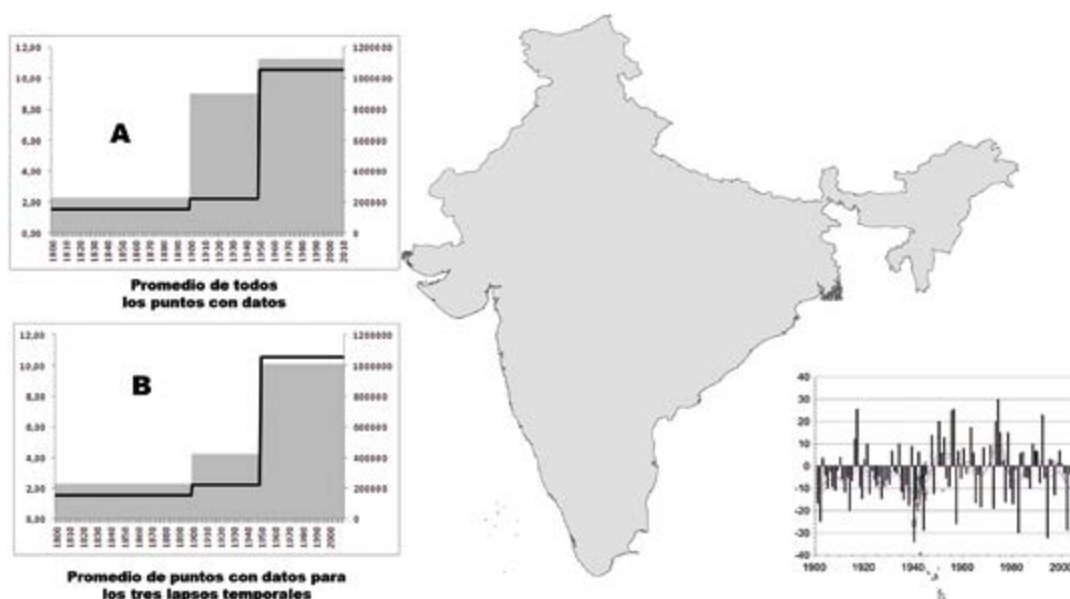


Fig. 10. India. Promedios del PIB y de las tasas de sedimentación (A: todos los puntos; B: solamente puntos con datos para los tres lapsos temporales considerados) para el conjunto del país, y precipitaciones anuales (Forte, 2017).

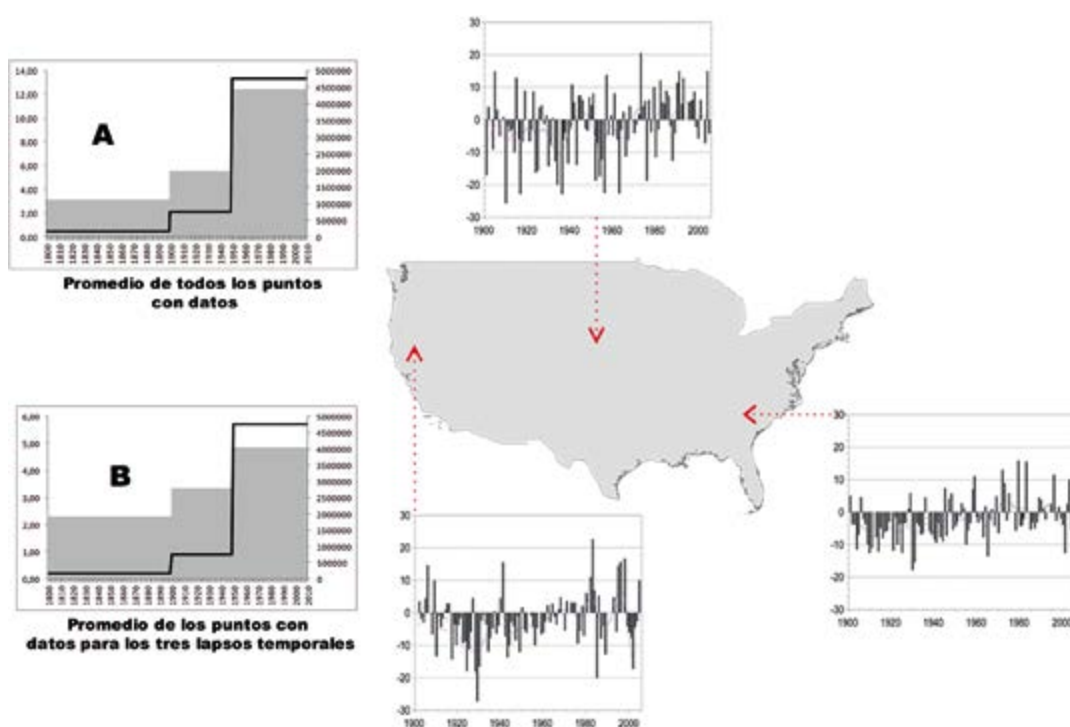


Fig. 11. Estados Unidos. Promedios del PIB y de las tasas de sedimentación (A: todos los puntos; B: solamente puntos con datos para los tres lapsos temporales considerados) para el conjunto del país, y precipitaciones anuales en tres regiones (Forte, 2017).

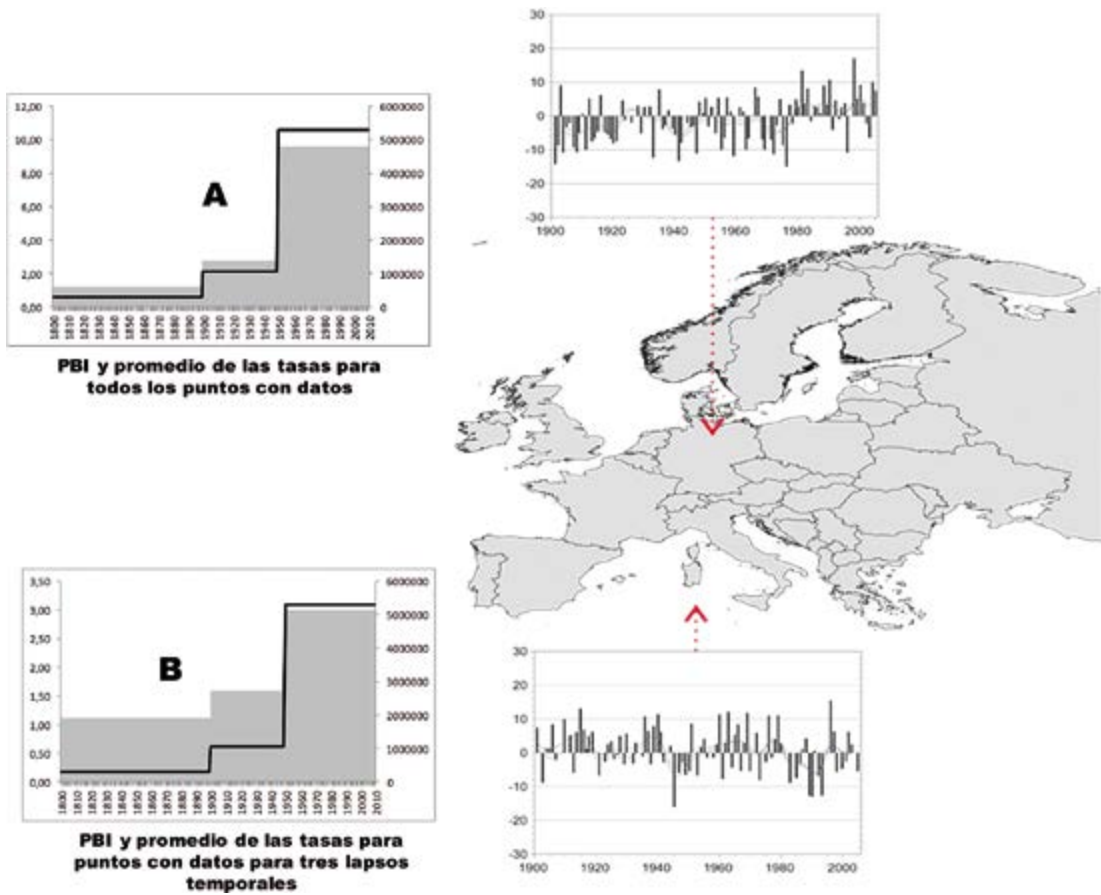


Fig. 12. Europa. Promedios del PIB y de las tasas de sedimentación (A: todos los puntos; B: solamente puntos con datos para los tres lapsos temporales considerados) para el conjunto del continente, y precipitaciones anuales en dos regiones (Forte, 2017).

Una de las consecuencias que se derivarían del modelo de la figura 8, caso de que fuera correcto, es que, a igualdad de otros factores, debería existir una relación entre la intensidad de la influencia humana sobre un territorio y la cantidad de sedimento generado (y, consecuentemente, acumulado) en el mismo. Para expresar la intensidad de la actividad humana se ha tomado como indicador la densidad de PIB (€ km^{-2} , o ‘presión geomorfológica humana’; Bonachea et al., 2010). La distribución de ese valor en el planeta se muestra en la figura 14 (Forte, 2017), en la que también se representa el mapa de intensidad de iluminación (evidentemente, considerando la noche en todo el mundo). La similitud entre ambos mapas es muy notable. No sería sorprendente que otros efectos físicos, además de la intensidad de iluminación, derivados de la densidad de riqueza, se dejaran sentir también sobre la superficie terrestre.

Para tratar de comprobar lo anterior, Forte (2017) aborda la correlación espacial entre ambos indicadores, para el conjunto de las áreas geográficas que analiza. Los resultados se resumen en la figura 15. Como señala ese autor, la comparación espacial tiene más limi-

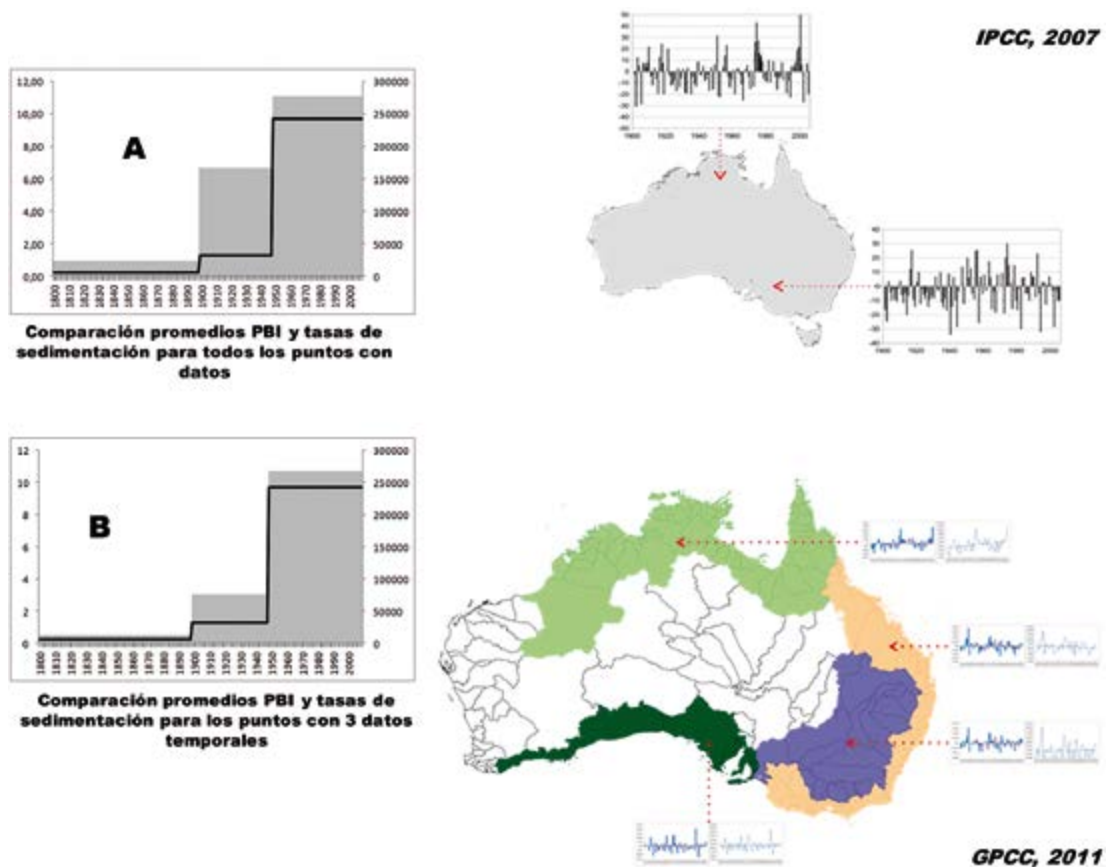


Fig. 13. Australia. Promedios del PIB y de las tasas de sedimentación (A: todos los puntos; B: solamente puntos con datos para los tres lapsos temporales considerados) para el conjunto del país, y precipitaciones anuales en varias regiones (Forte, 2017).

taciones que la temporal. En el análisis temporal antes presentado, se compara cada zona consigo misma, por lo que la condición: “a igualdad de otros factores”, se cumple en muy gran medida. En la comparación espacial hay que tener presente que las tasas de generación de sedimento se relacionan con las tasas de sedimentación de manera parcial e indirecta. En primer lugar, los lugares donde se acumulan los sedimentos están con frecuencia alejados de las áreas de origen de los mismos. En segundo lugar, además de la mayor o menor influencia humana, entre distintas regiones hay diferencias de constitución geológica, relieve, clima, tipo y densidad de cobertura vegetal, tipo de procesos geomorfológicos, etc. Por tanto, los valores absolutos de las tasas de sedimentación en un punto son un “proxy” que no tiene una relación clara con los valores absolutos de las tasas de generación de sedimento en ese punto, e incluso en el conjunto de la cuenca.

Conviene por ello ser prudente al interpretar los resultados de la figura 15, que presenta los datos para todas las zonas geográficas consideradas (A), y para todas ellas menos Estados Unidos (B). La eliminación de esta zona no es arbitraria, sino que responde a dos razones. La primera, evidentemente, que es la que más se aparta de la tendencia del conjunto. La

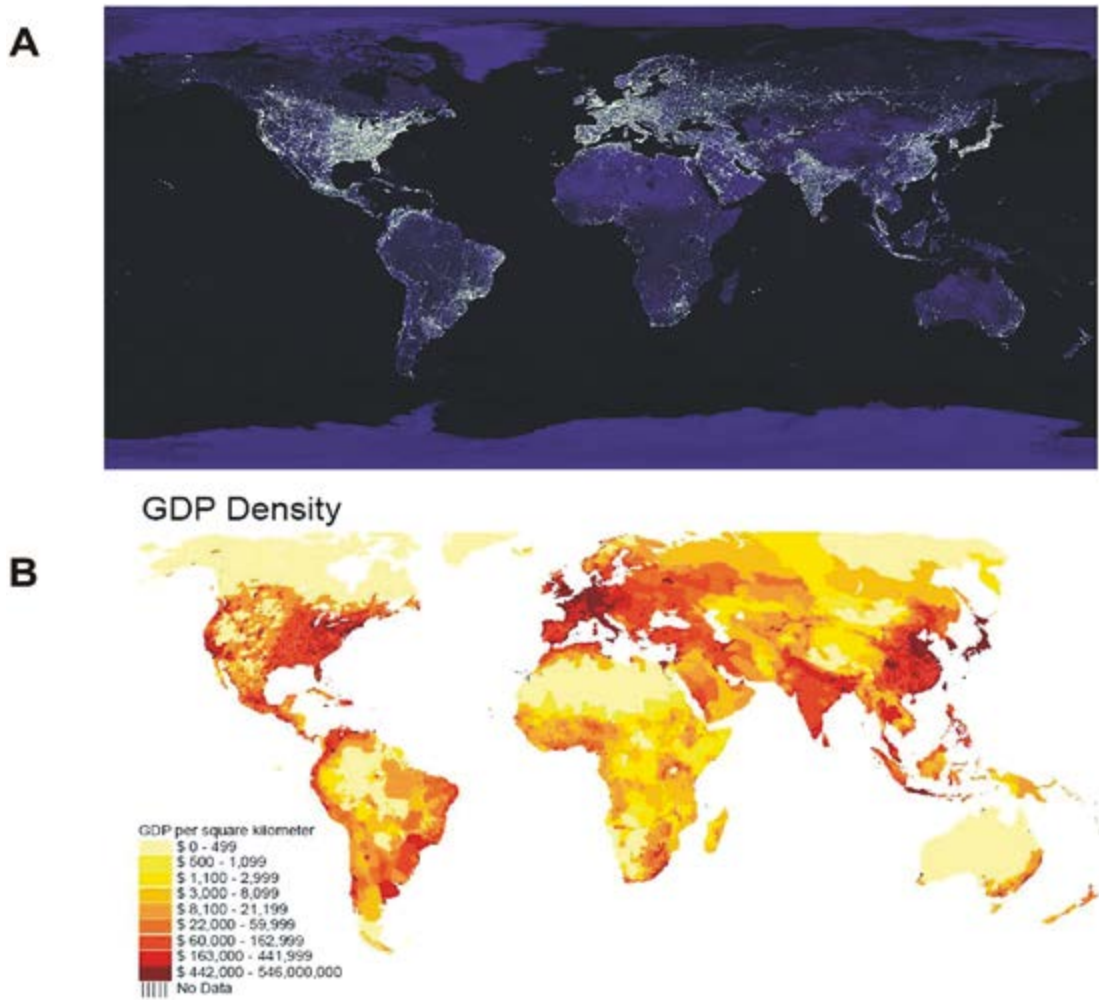


Fig. 14. Mapa de intensidad de iluminación (A; <http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/lightpollution>) y de densidad de PIB o 'presión geomorfológica humana' (B; <https://redd.it/3nv3e8>).
A partir de Forte, 2017.

segunda es que, en este país, a diferencia de los demás, se empezaron a tomar medidas sistemáticas para mitigar la erosión a raíz del conocido episodio del 'Dust Bowl', ocurrido en la década de los años 30 y que ocasionó una fortísima crisis agrícola, social y migratoria, reflejada en la literatura y el cine (Steinbeck, 1939). Esto probablemente ha dado lugar a un desacoplamiento entre PIB y tasas de erosión/sedimentación, que explicaría el aumento mucho menor de estas mencionado anteriormente. Como comenta Forte (2017), la elevada correlación que aparentemente presentan ambas variables podría ser una coincidencia. Pero también puede que sea demasiada coincidencia, teniendo en cuenta la diferencia de escala de las unidades estudiadas y las muy diferentes fuentes de los datos utilizados.

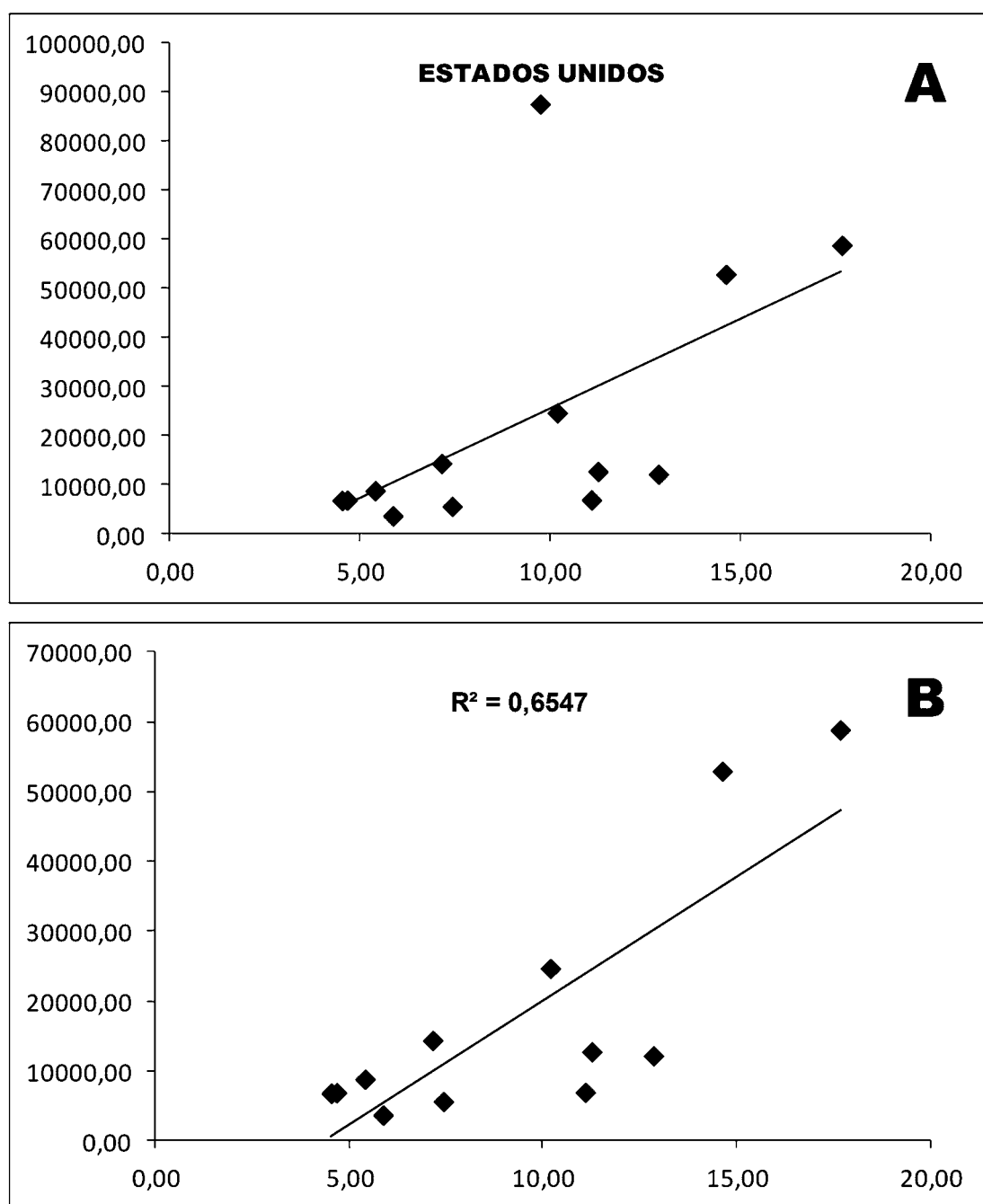


Fig. 15. Relación espacial PIB total/Cuadrado de su factor de aumento entre 1900-1950 y 1950-2010 vs. tasas medias de sedimentación (mm/año). A) Todas las zonas estudiadas: China; India; Australia; Estados Unidos; Rumania; Alemania (Alemania, Polonia, República Checa, Eslovaquia); Francia (Francia, Bélgica, Holanda, Luxemburgo); Islas Británicas (Irlanda, Reino Unido), Península Escandinava (Suecia, Noruega, Finlandia); Península Ibérica (España, Portugal); Región de los Alpes (Suiza, Austria), Italia; Norte de España; Cuenca del río de La Plata. B) Todas las zonas estudiadas, excluyendo a Estados Unidos.

6.3. *Desastres naturales*

Para analizar la posible relación entre desastres naturales debidos a procesos geomorfológicos o, más específicamente, ‘hidrogeomorfológicos’, puesto que incluyen aquellos que implican la interacción entre el agua y la superficie terrestre, tales como inundaciones y deslizamientos de tierras o rocas, coladas de fango, etc., Forte (2011, 2017) ha obtenido datos a partir de bases internacionales, que se presentan por países y tienen cobertura global (Desinventar, CRID, CRED, EM-DAT/CREC, Darmouth Flood Observatory, SCHEDULS). En estas bases de datos los diferentes tipos de desastres se agrupan generalmente en tres categorías: geológicos (debidos a procesos de la dinámica interna del planeta, como terremotos y erupciones volcánicas), climáticos (sequías, olas de frío y de calor, tormentas, huracanes, lluvias torrenciales) y geomorfológicos o hidrogeomorfológicos (“floods and related”, que incluye inundaciones y distintos tipos de deslizamientos).

Como se ha comentado en contribuciones anteriores (Cendrero et al., 2006; 2011; Bruschi et al., 2012; 2013 b), es de esperar que la frecuencia de todos los desastres naturales (tal como aparece recogida en las bases de datos internacionales) aumente con el tiempo y, además, que ese aumento presente una cierta correlación con el crecimiento del PIB.

Los desastres naturales son función de tres factores:

$$R=f(H, E, V).$$

Siendo:

R=riesgo (daños humanos y materiales)

H=peligrosidad o amenaza (proceso natural potencialmente peligroso)

E=exposición (personas, elementos materiales y actividades productivas susceptibles de experimentar daños)

V=vulnerabilidad (grado de daño de cada elemento expuesto, o porcentaje de su valor que se vería destruido en caso de evento peligroso).

El aumento del PIB total es consecuencia del aumento del PIB *per cápita* y del crecimiento de la población. Eso implica un aumento de la *exposición*, lo que hace que aumente la probabilidad de que un evento natural potencialmente peligroso produzca daños y, por tanto, se incorpore como *desastre* a las bases de datos. Esto es, aunque no variase la frecuencia de los episodios peligrosos (*amenaza* o *peligrosidad*), sería de esperar un aumento de la frecuencia de los desastres en las bases de datos, al haber más eventos que causarían daños. Pero el aumento del PIB también trae consigo una mejora en los sistemas de recogida de datos, por lo que las recopilaciones serán más completas a medida que pase el tiempo. Incluso si los desastres no aumentaran, sería de esperar un aumento aparente, debido al efecto de mejora de las estadísticas. Ambos factores afectan a todo tipo de desastres naturales. Además, el crecimiento del PIB va unido a la emisión de gases de efecto invernadero, que dan lugar al cambio climático, el cual trae consigo una mayor frecuencia de los episodios extremos, entre otros las lluvias intensas. Esto debería afectar a la frecuencia de los desastres de tipo

climático e ‘hidrogeomorfológico’ o geomorfológico. Finalmente, si el modelo de la figura 8 fuera correcto, mayor PIB debería suponer una mayor intervención y modificación la superficie de terrestre, lo cual afectaría solamente a los desastres de tipo ‘hidrogeomorfológico’.

De acuerdo con lo anterior, los desastres geomorfológicos deberían ser los que más aumenten con el tiempo y los geológicos los que menos. Además, la mejor correlación entre PIB y frecuencia de desastres se debería producir para los de tipo geomorfológico, y la peor para los de tipo geológico interno. Las figuras 16 y 17 muestran los resultados obtenidos por Forte (2011, 2017) para los cuatro grandes continentes. En el cuadro 3 se presentan, para los cuatro grandes continentes y regiones dentro de los mismos, los factores de aumento (frecuencia en la última década/frecuencia en el conjunto del periodo analizado) de la frecuencia de los distintos tipos de desastres, así como los coeficientes de correlación entre dicha frecuencia y el PIB. Las figuras y los datos del cuadro ponen de manifiesto que las predicciones correspondientes, basadas en el modelo, se cumplen con muy pocas excepciones.

También en este caso se ha examinado la posible relación espacial. Al igual que ocurre con la generación y acumulación de sedimentos, si el modelo fuera correcto, debería existir una correlación entre el nivel de degradación de la superficie terrestre en una zona y la frecuencia de los desastres de tipo geomorfológico en la misma. Para comprobar esto, Forte (2011, 2017) analiza la posible correlación entre una medida de la degradación del territorio (el Land Degradation Index, LDI, de FAO; Nachtergaele y Petri 2008; Liniger et al., 2009; FAOSTAT) que se obtiene para países, y la frecuencia de desastres de tipo hidrogeomorfo-

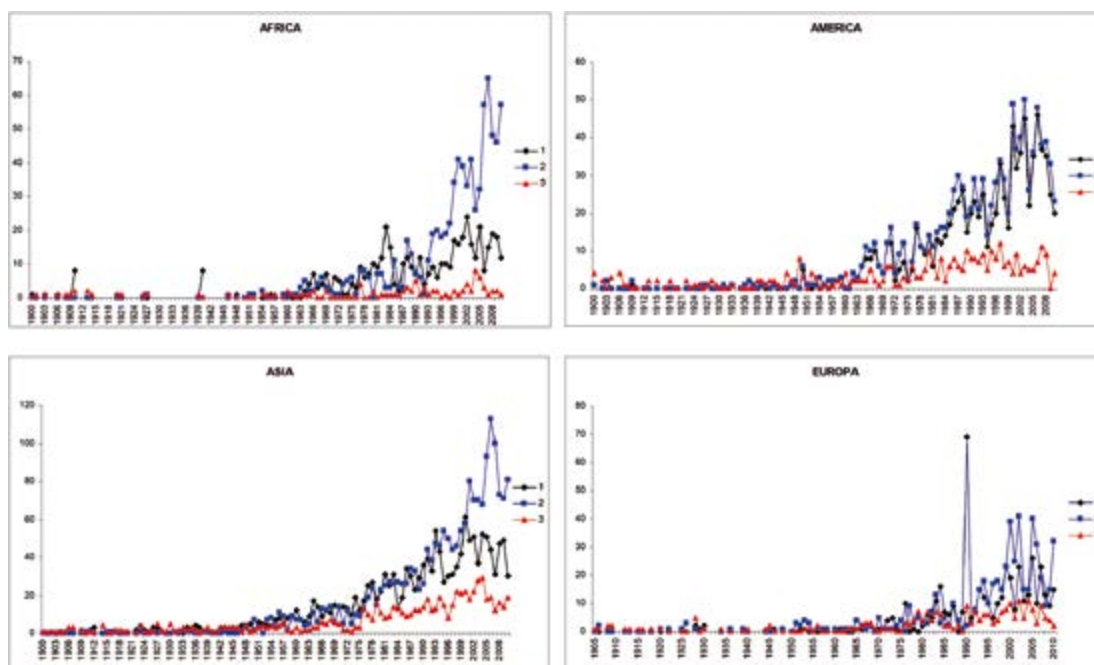


Fig. 16. Variación temporal de la frecuencia de distintos tipos de desastres naturales. 1: Geológicos internos. 2: Climáticos. 3: Hidrogeomorfológicos (Forte, 2011, 2017).

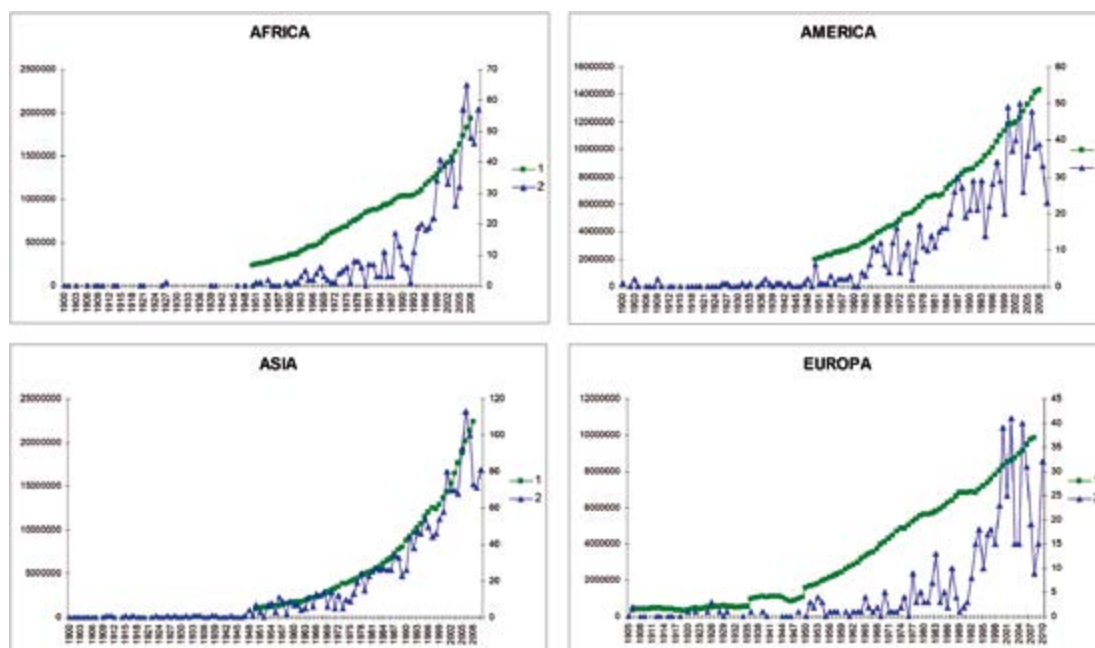


Fig. 17. Comparación entre la frecuencia de los desastres hidromorfológicos (línea continua) y el PIB (línea de trazos). (Forte, 2011, 2017).

lógico por unidad de superficie en los mismos países. Los resultados que se presentan en el Cuadro 4 A, muestran una buena correlación entre LDI y frecuencia de desastres naturales por unidad de superficie, que es especialmente notable cuando se toman los países en los cuales dichos desastres son más frecuentes. Se exceptúa Asia, que muestra una correlación negativa (para la cual, por el momento, no se puede proporcionar una explicación razonable). Si la comparación se hace entre LDI y factor de aumento de los desastres en la última década (Cuadro 4 B), se observa que la correlación es pobre cuando se hace para todos los países. Ahora bien, los datos sobre desastres naturales presentan series incompletas o muy cortas en un número elevado de países. Si se eliminan estos, la correlación aumenta de manera muy notable. La selección de países realizada por Forte (2011, 2017), aunque basada en datos objetivos, implica un cierto sesgo, cosa que no ocurre con la selección anterior, pero la muestra obtenida es en todos los casos superior al 50%. En resumen, aunque haya que considerar estos resultados con la debida cautela, apuntan claramente a una relación entre nivel de degradación del territorio de los países y frecuencia de los desastres debidos a procesos geológicos superficiales, como se esperaba a partir del modelo (Fig. 8).

Especialmente significativos son los datos que se muestran en la figura 18 (Forte, 2017). En ella se muestra, por un lado, la variación de las precipitaciones en el periodo 1975-2010 con respecto a la media de 1950-1975. Se aprecia claramente que la tendencia ha variado mucho de unas zonas a otras, pero con un cierto predominio de las zonas en las que ha habido disminución. Igualmente se muestra, para distintas regiones, la variación de la frecuencia de los desastres debidos a procesos geológicos superficiales y su comparación

Cuadro 3. Factor de aumento de la frecuencia anual de las distintas categorías de desastres y coeficiente de correlación entre esta y PIB (Forte, 2017).

	FACTOR DE AUMENTO				COEFICIENTE DE CORRELACION		
	CATEGORIA DE DESASTRES			PIB	(1) - PIB	(2) - PIB	(3) - PIB
	Geológicos Internos (1)	Climáticos (2)	Geológicos Superficiales (3)				
ESTE DE AFRICA	2,7	2,7	4,6	2,3	0,5207	0,8016	0,8689
CENTRO DE AFRICA	1,3	1,2	2,6	1,6			
NORTE DE AFRICA	1,5	1,1	2,6	2,8			
SOUTHERN AFRICA	1,4	0,3	2,4	2,0			
OESTE DE AFRICA	0,9	0,0	3,4	2,3			
CARIBE	1,7	2,9	1,8	2,2	0,6959	0,9106	0,9177
AMERICA CENTRAL	1,1	2,7	3,3	2,4			
AMERICA DEL NORTE	1,7	2,6	2,2	2,3			
AMERICA DEL SUR	2,4	2,0	2,3	2,2			
ASIA CENTRAL	2,2	1,2	1,6	1,4	0,8234	0,8595	0,9597
ESTE DE ASIA	3,8	3,3	3,9	3,7			
SUDESTE DE ASIA	2,5	2,2	3,8	3,3			
SUR DE ASIA	2,4	2,2	3,4	3,5			
OESTE DE ASIA	0,0	1,5	3,3	2,8			
ESTE DE EUROPA	0,9	1,9	2,8	1,8	0,7461	0,6678	0,7429
NORTE DE EUROPA	1,5	1,0	1,3	2,0			
SUR DE EUROPA	1,0	1,4	3,5	2,1			
OESTE DE EUROPA	0,5	5,5	1,9	1,9			

Cuadro 4. A. Coeficiente de correlación entre el Land Degradation Index (LDI) y número de desastres hidrogeomorfológicos por unidad de superficie, en la última década (Forte, 2017).

A	CONTINENTES	TODOS LOS PAÍSES DE LA MUESTRA	>=5 DESASTRES EN LA DÉCADA	>=10 DESASTRES EN LA DÉCADA
	<i>ÁFRICA</i>	0,63	0,67	0,77
	<i>AMÉRICA</i>	0,83	0,87	0,89
	<i>ASIA</i>	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO
	<i>EUROPA</i>	0,42	0,68	0,94

Cuadro 4. B. Coeficiente de correlación entre el Land Degradation Index y factor de aumento de los desastres hidromorfológicos (Forte, 2017).

B	CONTINENTES	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (muestra 100%)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (% muestra)
	<i>ÁFRICA</i>	0,2400	0,7785 (68)
	<i>AMÉRICA</i>	-0,0530	0,7625 (50)
	<i>ASIA</i>	0,3650	0,8385 (70)
	<i>EUROPA</i>	0,4878	0,8313 (80)

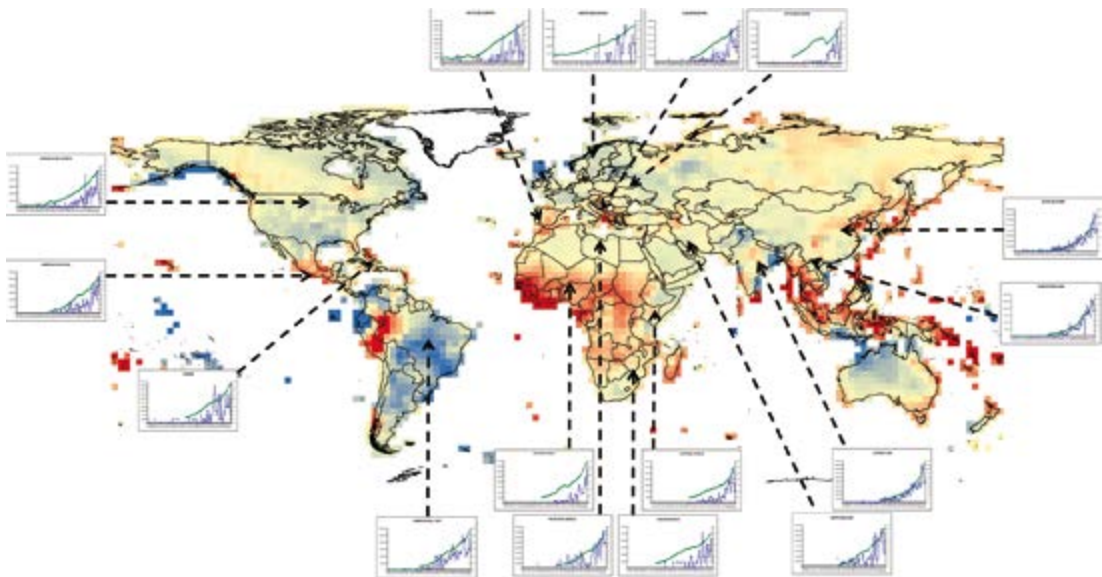


Fig. 18. Desviación de las precipitaciones durante el periodo 1975-2010, respecto a la media de 1950-1975 (tonos rojos, disminución; tonos azules, aumento), comparada con las variaciones de la frecuencia de los desastres hidromorfológicos (línea azul) y el PIB (línea verde) (Forte, 2017).

con la variación del PIB en las mismas. En todos los casos se observa que hay un notable aumento de la frecuencia de inundaciones y deslizamientos, independientemente de que en la región hayan aumentado o disminuido las precipitaciones. También se observa un aumento generalizado del PBI, con una magnitud muy similar al aumento de la frecuencia de los desastres. En la mayoría de las regiones, las tendencias de ambas variables muestran un apreciable paralelismo.

Como resumen de lo anteriormente presentado sobre los desastres naturales, se pueden extraer algunas conclusiones. En primer lugar, que las actividades humanas que afectan al territorio parecen ser el factor que en mayor medida está determinando el aumento de la

frecuencia de los desastres debidos a procesos geomorfológicos, tal como se pone de manifiesto al analizar las variaciones temporales de ambas variables. Además, aunque de manera menos concluyente, las correlaciones espaciales entre frecuencia o factor de aumento de los desastres y LDI también sugieren una relación causa-efecto entre ambos. Por su parte, las precipitaciones muestran cambios bastante limitados durante el periodo analizado, y de sentido contrario según las zonas, y no proporcionan una explicación satisfactoria de la magnitud o de las tendencias de las variaciones experimentadas por los citados desastres.

Evidentemente, eso no quiere decir que las lluvias no influyen en el desencadenamiento del proceso. Es trivial, y conocido por la población en general, que se producen inundaciones y deslizamientos cuando hay lluvias intensas. Pero el aumento de la frecuencia de estos procesos no parece responder a un aumento de las precipitaciones. Lo que parece ocurrir es que lluvias de una intensidad que no daban lugar a desastres en el pasado, sí lo hacen ahora, como consecuencia de la disminución de la resiliencia de la superficie del terreno y del aumento de la respuesta del mismo a la acción del agua, así como del aumento de la exposición.

Parece por tanto que el cambio climático no sería responsable del gran incremento de estos desastres desde mediados del pasado siglo, sino que serían consecuencia del cambio geomorfológico, cuya magnitud, como hemos visto, es mucho mayor.

6.4. Cambio geomorfológico global y Antropoceno

Los resultados presentados hasta aquí muestran que las tasas de sedimentación y la frecuencia de los desastres debidos a procesos de tipo geomorfológico han experimentado un aumento de alrededor de un orden de magnitud en un siglo. Dichos resultados son coherentes con la existencia de un cambio geomorfológico global, la modificación de la superficie terrestre causada por las actividades humanas. Esto representa una variación cualitativa y cuantitativa muy significativa en el funcionamiento de los procesos geológicos superficiales.

La modificación de la superficie terrestre, así como otros cambios producidos en los sistemas naturales y que se manifiestan en la ‘Gran Aceleración’ (Steffen et al., 2006, 2007, 2011), están causados por un impulsor fundamental, el crecimiento del PIB total. Este es consecuencia de tres factores combinados: población, capacidad económica y capacidad tecnológica (Cendrero et al., 2006; Bruschi et al., 2012). La capacidad tecnológica aumenta la capacidad productiva de la sociedad, y por lo tanto su capacidad económica *per cápita*. Esto, unido al crecimiento de la población, da lugar al aumento del PIB total. No se trata, por tanto, de variables independientes, sino que están estrechamente relacionadas entre sí. El consumo creciente de recursos se deriva de lo anterior. Nos parece por ello que conviene matizar la afirmación de Waters et al. (2016): “*The driving human forces responsible for many of the anthropogenic signatures are a product of three linked force multipliers: accelerated technological development, rapid growth of the human population and increased consumption of resources*”. La expresión más adecuada de las “*driving human forces*” responsables de los cambios observados sería más bien el PIB, como se deduce de las comparaciones y

correlaciones presentadas para el caso de los procesos geomorfológicos, y esa sería también la causa del aumento del consumo de recursos.

La importancia de los tres factores descritos (población, tecnología, economía) como impulsores de los cambios que caracterizan al Antropoceno, se ha señalado también por parte de Kolbert (2011), que utiliza el concepto de ‘impacto humano’ (producto de los tres factores) como indicador de la presión que ejercemos sobre el planeta. Ahora bien, como ya hemos señalado con anterioridad (Bruschi et al., 2012) el valor que así se obtiene es muy superior al real, debido a la redundancia entre las variables. El producto entre las tres da como resultado que, entre 1900 y 2011, el impacto humano habría pasado aproximadamente de 5×10^{26} a $7,3 \times 10^{29}$, un incremento de tres órdenes de magnitud. Esto es, a nuestro juicio, excesivo. Los datos aquí presentados indican que un orden de magnitud en el aumento de nuestro impacto sobre el planeta en ese periodo, es más realista. En cualquier caso, creemos que sería de interés analizar si existen, como en el caso de los procesos geomorfológicos, relaciones similares de estos impulsores con otras de las variables que caracterizan la ‘Gran Aceleración’.

Los datos aportados refuerzan la idea de que estamos ante un nuevo modelo de evolución geomorfológica, resultado de la actividad humana, que sería uno de los rasgos que caracterizan al Antropoceno. Si bien hay ejemplos de influencia humana sobre los procesos geológicos superficiales que se remontan a algunos milenios, los resultados que aquí se presentan muestran que el punto de inflexión en la intensificación generalizada de los procesos geomorfológicos se produjo después de la Segunda Guerra Mundial, coincidiendo con la ‘Gran Aceleración’, tal como hemos señalado en distintas contribuciones desde 2011. A nuestro juicio, se debería abandonar definitivamente la idea de considerar el inicio de la Revolución Industrial como el comienzo del Antropoceno. Creemos más adecuado tomar el fin de la 2ª Guerra Mundial.

Llegados a este punto, creo que es procedente hacer algunos comentarios sobre la fecha exacta del inicio del Antropoceno, que, como se ha mostrado más arriba, ha sido objeto de amplias discusiones. Se han propuesto varias fechas concretas (Cuadro 2), incluso concretando el año (p. ej.: 1784, 1945, 1950). También se ha señalado la dificultad que implica el hecho de que, en general, los cambios que se produjeron en los distintos momentos propuestos no fueron realmente sincrónicos en todo el planeta. Solamente dos ejemplos: la Revolución Industrial, iniciada en la segunda mitad del siglo XVIII en Gran Bretaña, tuvo lugar en muchas zonas de Asia, América del S y África en la segunda mitad del siglo XX, y en otras regiones todavía no se ha producido (Waters et al., 2014); la ‘Gran Aceleración Geomorfológica’ se manifiesta en Estados Unidos en la primera mitad del siglo XX, y en Sudamérica a partir de los años 70-80 de dicho siglo (Forte, 2017). Además, esos cambios no fueron instantáneos en ningún lugar, como es lógico, sino que ocurrieron de forma gradual. Ciertamente, una fecha como la de inicio de la presencia de radionucleidos artificiales en hielos glaciares y sedimentos, puede establecerse con precisión, basada en un evento de fecha bien conocida (1945, pudiéndose establecer incluso el mes y el día), pero su manifestación general tampoco es exactamente sincrónica a nivel global.

En todo caso, la definición de una fecha precisa para el inicio de esa hipotética nueva época geológica, que represente un evento instantáneo y con efectos globales, me parece menos

importante que la identificación del momento (necesariamente aproximado, correspondiente a una transición gradual, aunque rápida), en el que se manifiestan cambios significativos en el funcionamiento del planeta. Esos cambios, como hemos visto, afectan al clima, la presencia de nuevos materiales y sustancias, las comunidades biológicas, los procesos geológicos superficiales, etc., y coinciden con el aumento del factor que parece responsable de dichos cambios, el PIB total (o densidad de PIB a escala de áreas concretas). En ambos casos, el punto de inflexión se sitúa a mitad del siglo XX, después de la Segunda Guerra Mundial. Esto es, parece haber pocas dudas con respecto al agente causal y sus efectos. Esto no es diferente, salvo en lo que se refiere a nosotros como agente causal, a lo ocurrido en el tránsito entre otras épocas geológicas.

7. ¿POR QUÉ Y PARA QUÉ EL ANTROPOCENO?

Hasta aquí, he tratado de presentar una breve panorámica sobre el surgimiento del concepto de Antropoceno (con este u otros nombres), los rasgos que podrían caracterizar esa posible etapa de la historia de la Tierra, los argumentos a favor y en contra de su reconocimiento formal como una nueva unidad de la escala cronoestratigráfica internacional y las posibles fechas de inicio de la misma. Me gustaría hacer ahora algunas reflexiones personales sobre la importancia de reconocer o no reconocer la existencia de ese nuevo tiempo geológico, así como de la pertinencia o no pertinencia de su aceptación formal como una nueva unidad (serie/época) de la escala cronoestratigráfica internacional.

Como se ha mostrado más arriba, el Antropoceno tiene características que lo diferencian del conjunto del Holoceno y, por supuesto, de épocas geológicas anteriores. Los cambios observados, cualitativa y cuantitativamente muy significativos, se pueden considerar ‘instantáneos’ desde el punto de vista de la historia geológica. En respuesta a la primera parte de la pregunta que sirve de título a este epígrafe ¿por qué el Antropoceno?, porque parece claro que ha habido cambios importantes, producidos por nosotros y, además, que han ocurrido en un tiempo muy corto.

El único caso bien establecido en la historia geológica, en el que tuvo lugar una transición tan rápida entre épocas geológicas formalmente reconocidas, es el límite Cretácico superior-Paleoceno (y con algunas reservas, puesto que además del conocido impacto de un meteorito, habría que tener en cuenta también las grandes erupciones volcánicas de la meseta del Decán, en India, o la disminución de los mares epicontinentales). Por supuesto, no resulta posible establecer el año en el que el impacto ocurrió, ni siquiera el siglo o el milenio, y es evidente que los otros factores variaron a lo largo de un cierto lapso temporal. En el caso del Antropoceno, sí que resulta posible establecer el tránsito desde el Holoceno (suponiendo que se considere adecuado establecer una nueva época) con una precisión sin precedentes. Una precisión de siglos o décadas sería ya muy notable para el registro geológico, pero en este caso se puede llegar al año. Además, se daría la curiosa circunstancia de que la misma fecha representaría un hito importante en la historia de la Tierra y la historia de la humanidad (Bruschi et al., 2012), que aparecen cada vez más estrechamente entrelazadas e interdependientes.

Pero tal vez alcanzar esa precisión no sea especialmente importante. Los cambios que tienen lugar en la naturaleza son, en la inmensa mayoría de los casos graduales. El periodo de transición puede ser más o menos corto y, a efectos del calendario geológico, puede incluso considerarse ‘instantáneo’. Lo que es más relevante, a mi juicio, es conocer y comprender los cambios ocurridos, sus causas y consecuencias. Si eso, además, sirve (a las generaciones actuales y futuras) para organizar mejor nuestro conocimiento sobre la historia del planeta y para extraer conclusiones a partir de ella, todavía mejor.

Ahora bien ¿es aconsejable, conveniente, útil o pertinente el reconocimiento formal de dichos cambios, a través de la incorporación del Antropoceno a la escala cronoestratigráfica internacional? Miren ustedes, las cosas son como son, independientemente de cómo las llamemos. Los cambios que se han producido hasta ahora o los que se produzcan en el futuro han ocurrido u ocurrirán, tanto si el Antropoceno se incorpora formalmente a la escala cronoestratigráfica como si no.

Desde el punto de vista científico y sobre la base de los datos existentes, hay pocas dudas con respecto a la importancia que tiene el actual cambio global, y también con respecto al hecho de que nosotros somos el principal agente causal de dicho cambio. Eso no necesariamente implica, como con frecuencia se aduce, que los cambios que estamos produciendo representen un grave riesgo para el planeta. Como señalaba aquí hace dos años (Cendrero, 2015), el planeta ha experimentado en el pasado cambios de magnitud muy superior a los actuales, pero eso no quiere decir que sufriera un deterioro o una degradación. La Tierra anterior al impacto del meteorito de hace unos 66 millones de años no era mejor ni peor que con posterioridad al mismo. Tampoco es mejor ni peor el planeta en la época glacial actual, con casquetes de hielo permanentes en ambas zonas polares, que el existente durante la mayor parte de la historia geológica, cuando dichos casquetes no existían. Había en ambos casos una Tierra diferente. Ante este tipo de hechos es frecuente que se argumente: “sí, pero esos cambios eran naturales”, o “no tenemos derecho a degradar el planeta”. En mi opinión, los cambios, ya sean naturales o producidos por nuestra especie, no son necesariamente buenos o malos para el planeta. Son, simplemente, cambios. Tampoco creo que sea una cuestión de derechos (supongo que los juristas tendrán algo que decir sobre los derechos de las especies o del planeta). Tan natural es para los corales construir arrecifes, para las termitas termiteros, o para los castores diques, como para los seres humanos construir ciudades. Somos una especie como otras, si bien con una capacidad muchísimo mayor de modificar nuestro entorno, capacidad que sin duda irá aumentando con el tiempo. Además, somos la única especie que, tanto a nivel de individuos como de colectividades, es consciente de esa capacidad, y puede decidir aplicarla de una u otra forma.

Argumentos como los mencionados en el párrafo anterior se basan en la aceptación, implícita o explícita, de algunos ‘dogmas laicos’ que consideran al planeta como un ser vivo, sufriente y sujeto de derechos, lo cual es totalmente razonable desde la perspectiva de las creencias. En mi no corta experiencia de trabajo en la zona andina, he podido apreciar, así como respetar y comprender, la importancia que para las poblaciones locales tiene el culto a la ‘Pacha Mama’. Ese culto a la Madre Tierra que se traduce en una cultura de respeto por la naturaleza, que ayuda a mantener los medios y formas de vida de esas poblaciones.

Pero esos ‘dogmas’ no me parecen muy justificables desde el punto de vista científico ¿Fue un desastre el inicio de la glaciación del Carbonífero-Pérmico, que duró unos 90 millones de años, o su finalización? ¿Tenían derecho las cianobacterias y las plantas con clorofila a alterar drásticamente la composición de la atmósfera, enriqueciéndola en oxígeno, proceso que se inició hace unos 2,4 millones de años, y que dio lugar a la desaparición de la mayoría de las especies existentes y al surgimiento de otras nuevas? ¿ha sido perjudicial para el planeta el desarrollo de las especies cultivadas o domesticadas?

Otra cosa muy diferente es plantearse si los cambios que se están produciendo representan un problema o un riesgo para los seres humanos en particular. Aquí la perspectiva y las respuestas cambian bastante. En efecto, los cambios que se están produciendo entrañan riesgos significativos para nuestro bienestar colectivo, e incluso, si las cosas evolucionan en determinado sentido, para la supervivencia de nuestra especie. La protección y conservación de la naturaleza, o la mitigación de las distintas manifestaciones del cambio global, son importantes para las personas, pero poco relevantes para el planeta, que seguiría funcionando sin problemas (aunque de manera distinta) si desapareciéramos como especie, cosa que ocurrirá en algún momento. Algunos de los citados riesgos ya se están materializando, y está generalmente aceptado que deberemos abordar estrategias de mitigación y adaptación, las cuales implican importantes esfuerzos económicos y de otro tipo.

El abordaje de los problemas desde la perspectiva del Antropoceno puede ayudar a obtener una idea más cabal de algunas de estas cosas y a hacer que se cuestionen ciertas afirmaciones generalmente aceptadas. Voy a citar solamente dos ejemplos, extraídos de ámbitos bastante alejados de la ciencia. En el N° 237 (julio-septiembre de 2016) de la revista de Muface, apareció un artículo titulado ‘Calentando el futuro’, sobre el cambio climático. En ese artículo se señala, basándose en un informe de la compañía aseguradora internacional Munich Re, que en 2014 el 92% de los desastres naturales se debieron a factores climáticos de los cuales el 42% correspondió a inundaciones. Con motivo de la presentación en Madrid de una fundación con su nombre, el conocido arquitecto Norman Foster afirmaba “los efectos del cambio climático se han empezado a notar, con fenómenos como el Katrina” (El Diario Montañés, 2 de junio de 2017). Mientras escribo esto, han aparecido las noticias sobre las inundaciones en el sur de Estados Unidos y las inundaciones y avalanchas en Asia, con numerosas víctimas. De nuevo, se apunta al cambio climático como responsable de esos eventos.

Los datos que les acabo de presentar hacen pensar que el cambio climático no es el principal responsable de dichos desastres, sino que más bien parecen ser el resultado del cambio geomorfológico. Un abordaje interdisciplinar de este tema, con una perspectiva de lo que el Antropoceno y el cambio global que lo caracteriza representan, seguramente ayudará a despejar dudas y a colocar el problema en sus justos términos. Como consecuencia de lo anterior, es posible que se llegue a la conclusión de que, para mitigar los desastres debidos a inundaciones, deslizamientos, etc. lo más eficaz será abordar el cambio geomorfológico, no el cambio climático (cuya mitigación, sin duda, es muy importante, pero probablemente no para esto).

El cambio climático es un culpable muy cómodo. Es responsabilidad de todos y de nadie, y ningún gobierno puede darse por señalado con el dedo por el hecho de que llueva

mucho en su territorio y se produzcan inundaciones. Para combatir ese cambio es preciso que actúe ‘la comunidad internacional’, a la cual nadie puede llamar por teléfono. No hay país que, por sí solo, pueda evitarlo. Por el contrario, el cambio geomorfológico sí que se puede abordar y mitigar a escala nacional, e incluso autonómica, provincial o municipal. Y los efectos de las acciones que se realcen en esa línea se dejarían sentir, sobre todo, en el territorio correspondiente, en gran medida sin depender de lo que hagan otros. Es pues importante dilucidar si lo que los datos que aquí se presentan sugieren, se ve confirmado por nuevos análisis. Y una mirada desde la perspectiva del Antropoceno puede resultar muy útil para profundizar en esos análisis.

Pero para realizar esos esfuerzos es necesario que se tomen determinadas decisiones políticas. Y esto, a su vez, requiere que exista una conciencia social que las apoye. Tal como se señalaba en el editorial de Nature (2011) al que antes me he referido: *“Humans may yet ensure that these early years of the Anthropocene are a geological glitch and not just a prelude to a far more severe disruption. But the first step is to recognize, as the term Anthropocene invites us to do, that we are in the driver’s seat”*.

Los nuevos datos que se han ido obteniendo desde esa fecha, sugieren que, en efecto, no estamos ante una disfunción temporal. El Antropoceno, tal como se ha manifestado en el último siglo, parece representar un cambio real de los procesos del planeta. El mero reconocimiento formal de su existencia no afectará a la materialidad de ese cambio, pero puede tener sentido en relación con la segunda parte de la pregunta que se plantea en el título de este epígrafe: ¿para qué? Si reconocemos que estamos ante un tiempo radicalmente nuevo, que implica riesgos para nuestra especie, pero que empuñamos el timón, seguramente será más probable que tomemos las medidas adecuadas para variar el rumbo. La adopción formal del término Antropoceno probablemente facilitará que la comunidad científica aborde, desde una perspectiva interdisciplinar, los problemas a los que en este nuevo tiempo nos estamos enfrentando, a fin de profundizar en el conocimiento y comprensión de los cambios, sus causas y probables efectos. Además, es posible que sirva de apoyo y estímulo para que los responsables de la toma de decisiones, a nivel internacional, nacional o de entidades administrativas de distinto tipo, den los pasos necesarios para resolver los problemas y aprovechar las oportunidades que se deriven de los cambios en curso.

En relación con lo que el Antropoceno implica, creo pertinente reproducir aquí lo que, en su lección inaugural del curso 2009-10 en la Universidad de Cantabria, decía Sánchez Ron (2009), a su vez citando a Gell-Mann (1994), Premio Nobel al igual que Crutzen:

“La naturaleza, el objeto, queridos compañeros, de nuestros desvelos, es una, no conoce de fronteras, aunque nosotros nos hayamos esforzado en establecerlas, delimitando territorios que hemos bautizado con nombres diversos: matemáticas, física, química, biología, geología, medicina, antropología, psicología, ingeniería de esto o de aquello, además de, estoy seguro, otros nombres, otras disciplinas, que muchos de ustedes querrán distinguir. Me gusta, en este sentido, recordar unas frases que el físico y Premio Nobel, Murray Gell-Mann escribió en un libro –El quark y el jaguar (1994)– que se ajusta muy bien al espíritu que quiero transmitir hoy aquí:

“Todo lo que nos rodea son, a fin de cuentas, hechos relacionados entre sí. Naturalmente, pueden considerarse como entidades separadas y estudiarse de esta forma; no obstante, ¡qué diferentes resultan cuando los contemplamos como parte de un todo! Muchos elementos dejan de ser sólo detalles para memorizar: sus relaciones permiten elaborar una descripción comprimida, una forma de teoría, un esquema que los comprenda y resuma y en cuyo marco comiencen a tener sentido. El mundo se hace más comprensible”.

Ahora bien, es preciso reconocer que, aunque hayamos parcelado el inmenso territorio de la naturaleza y podamos argumentar, como acabo de decir, que se trata de una división en última instancia artificial (aunque, por supuesto, no carente de razones), no hay duda de esas separaciones que hemos impuesto en nuestros estudios del mundo nos han dado frutos extraordinarios.”

A mi modo de ver, la aceptación formal del término es de especial interés para la comunidad geológica. Como hemos visto, esta comunidad no solo se ha incorporado de manera bastante tardía al debate, sino que ha puesto de manifiesto su oposición al término sobre la base de objeciones (razonables, por otra parte) que atañen a la posibilidad o conveniencia de incorporarlo a la escala cronoestratigráfica internacional. Es posible que esas objeciones tengan que ver, al menos en parte, con el hecho de que el término y la propuesta han surgido en otros ámbitos disciplinares, pero creo que mantener una oposición al mismo es poco adecuado.

Naturalmente, no soy el más listo de la clase, ni tampoco el mejor informado o con mayor capacidad de intuir el futuro. Pero, en mi opinión, es improbable que ese tipo de posturas (repito, con unas bases razonables) produzcan frutos de interés. En el ámbito científico, como en otros, es importante tener clara la diferencia entre los medios y los fines, entre las herramientas y las funciones para las cuales se van a aplicar estas. La escala cronoestratigráfica internacional, como he indicado más arriba, no es una realidad material, sino una abstracción. Es *un medio* que nos ayuda a organizar nuestros conocimientos sobre la historia de la Tierra y a comprender mejor lo que ocurrió, cuando ocurrió y por qué razones; este es *el fin*. La herramienta ha sido y sigue siendo muy útil, pero eso no quiere decir que, en su forma actual, vaya a ser siempre la herramienta más útil para la función de profundizar en la comprensión de la evolución del planeta. Si la realidad a la que se aplica o los problemas que se trata de resolver cambian, tal vez sea aconsejable adaptar la herramienta. Por ejemplo, el Principio del Actualismo se concibió para ayudarnos a utilizar las observaciones actuales en la interpretación del pasado de la Tierra. Sin embargo, desde hace algunas décadas se está utilizando en sentido inverso, utilizando el conocimiento sobre el pasado y el presente para tratar de hacer previsiones sobre el futuro comportamiento de los sistemas naturales.

Como los hechos recientes nos han mostrado, no parece probable que la adopción o no adopción formal del término Antropoceno, influya en su difusión y asentamiento, en el ámbito social y en el ámbito científico (sobre todo en otras disciplinas). Además, y esto es algo que encuentro especialmente sorprendente, veo una gran contradicción entre lo que son deseos ampliamente manifestados por parte de los científicos en general, y de los que se dedican a la geología en particular, y la oposición al Antropoceno como unidad cronoestra-

tigráfica. No hace falta que les recuerde a ustedes las múltiples ocasiones en las que en esta casa nos hemos lamentado de la escasa atención que la sociedad en general y los medios de comunicación en particular, dedican a los temas científicos, así como los esfuerzos que hemos dedicado, hasta ahora con no demasiado éxito, a tratar de cambiar esa situación. Por supuesto, ese tipo de quejas y de esfuerzos se han dado también dentro de la comunidad geológica, posiblemente en mayor medida.

Pues bien, surge un tema científico que concita un amplio interés público y que podría ayudar a que la sociedad en general, y los poderes públicos en particular, dediquen mayor atención y medios materiales a los esfuerzos científicos encaminados a profundizar en él, y se encuentra, por razones formales, con una notable oposición por parte de un colectivo que podría ser uno de los principales beneficiarios de esta situación. Les ruego me disculpen, pero no logro entenderlo.

Repito algo que he dicho antes, las cosas son como son, independientemente de cómo las llamemos. Determinar si los datos muestran cambios en el planeta en tiempos recientes no es una cuestión de ortodoxia terminológica. Ni tampoco una declaración política, como aducen Finney y Edwards (2016). El Antropoceno, se incluya o no entre las unidades cronoestratigráficas, parece presentar diferencias importantes en el funcionamiento del planeta, algunas con graves consecuencias para las personas, y es bueno que tratemos de comprenderlo mejor. Si eso se confirma (y, como parece probable, se intensifica en el futuro), conviene que la comunidad geológica no dé la espalda, por formalismos, a algo que la sociedad percibe como importante, aplique sus capacidades a profundizar en el conocimiento de los cambios que la Tierra experimenta, colabore en la búsqueda de soluciones a los problemas y en el aprovechamiento de las oportunidades que aparezcan.

Muchas gracias por su atención.

REFERENCIAS

- Aspillaga Plenge IA. 2006. Ordenación del territorio y la industria extractiva minera en el Perú. CETEM/MCT/CNPq/CYTED/UIA. Rio de Janeiro.
- Astibia H. 2012. Tunelboka y Gorrondatxe (Getxo, Bizkaia), fósiles humanos para el Antropoceno. *Euskonews*, 640: 1-11.
- Bergson H. 1934. La pensée et le mouvant. Une édition électronique réalisée par Les Presses Universitaires de France. 79e édition. Paris. 1969.
- Bonachea J, Bruschi VM, Hurtado MA, Forte LM, da Silva M, Etcheverry R, Cavallotto JL, Dantas-Ferreira M, Pejon OJ, Zuquette LV, Bezerra MAO, Remondo J, Rivas V, Gómez-Arozamena J, Fernández G, Cendrero A. 2010. Natural and human forcing in recent geomorphic change; case studies in the Río de la Plata basin. *Science of the Total Environment*, 408: 2674-2695.
- Bolt J, van Zanden JL. 2013. The Maddison Project; the first update of the Maddison Project. Re-estimating growth before 1820. WP -4. Univ. Gronningen (<http://www.ggdc.net/maddison/maddison-project>).
- Brown H. 1956. Technological denudation. In: Thomas WL (ed.). *Man's Role in Changing the Face of the Earth*. Univ. of Chicago Press, Chicago, pp. 1023-1032.
- Bruschi VM, Bonachea J, Remondo J, Forte LM, Hurtado MA, Cendrero A. 2012. ¿Hemos entrado ya en una nueva época de la historia de la Tierra? *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat.* Vol 105 (1): 1-12.
- Bruschi VM, Bonachea J, Remondo J, Gómez-Arozamena J, Rivas V, Méndez Naredo JM, Cendrero A. 2013 a. Analysis of geomorphic system's response to change in natural and human drivers in northern Spain; implications for global geomorphic change. *Geomorphology*, 196: 67-279.
- Bruschi VM, Bonachea J, Remondo J, Gómez-Arozamena J, Rivas V, Barbieri M, Capochi S, Soldati M, Cendrero A. 2013 b. Human versus natural factors in land instability; case studies in N Spain. *Environmental Management*, 52: 398-416.
- Ceballos G, Ehrlich PR, Barnosky AD, García A, Pringle RM, Palmer TM. 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1(5). Doi: 10.1126/sciadv.1400253.
- Cendrero A. 2003. De la comprensión de la historia de la tierra al análisis y predicción de las interacciones entre seres humanos y medio natural. Discurso de ingreso. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid.
- Cendrero A. 2015. Cambios globales pasados, cambio actual, consecuencias y futuro. Contestación al discurso de ingreso de la Excma. Sra. Caridad Zazo Cardeña en la RACEFyN. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid, pp: 88-112.
- Cendrero A, Douglas I. 1996. Earth surface processes, materials use and urban development; project aims and methodological approach. Abstracts with programs, GSA Annual Meeting, Denver: A-79.

- Cendrero A, Elízaga E, Gallego E. 1987. Los problemas de la integración de las áreas metropolitanas en los análisis y cartografía geoambientales. Actas, III Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. GEGAOT, Valencia. T.1: 49-56.
- Cendrero A, Remondo J, Bonachea J, Rivas V, Soto J. 2006. Sensitivity of landscape evolution and geomorphic processes to direct and indirect human influence. *Geografía Física e Geodinámica Cuaternaria*, 29 (2): 125-137.
- Crutzen JP. 2002. Geology of mankind. *Nature*, 415-3: 23-23.
- Crutzen JP & Stoermer EF. 2000. The Anthropocene. *Global Change Newsletter*, 41, p. 1.
- Darwin C. 1859. On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life. Appleton & Co., N. York.
- Darwin C. 1921. El origen de las especies por medio de la selección natural (Tomos I-III). Traducción de la sexta edición inglesa (1872), por A. de Zulueta. Colección Universal, Calpe. Madrid.
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Statistical Databases. <http://apps.fao.org>.
- Finney SC, Edwards LE. 2016. The “Anthropocene” epoch: scientific decision or political statement? *GSA Today*, 26(3-4): 4-10.
- Forte LM. 2011. Análisis de las tendencias de variación en las tasas de actividad de los procesos geomorfológicos y de sus implicaciones para los riesgos naturales. Tesis de Master. Universidad de Cantabria, Santander.
- Forte LM. 2017. Análisis de las variaciones espacio-temporales de los procesos geomorfológicos y los riesgos naturales asociados. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria (defendida: 1, julio, 2017).
- Forte LM, Hurtado MA, Dangvas NV, Couyoupetrou L, Giménez J, da Silva M, Bruschi V, Cendrero A. 2016. Anthropogenic geomorphic change as a potential generator of renewable geologic resources in the humid Pampa, Argentina. *Catena*, 142: 177-189.
- García Tapia N. 2010. Un inventor navarro: Jerónimo de Ayaz y Beaumont (1553-1613). Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- Gell-Mann M. 1995. El quark y el jaguar. Tusquets, Barcelona.
- González A, Salas L, Díaz de Terán JR, Cendrero A. 1996. Late Quaternary climate changes and mass movement frequency and magnitude in the Cantabrian region, Spain. *Geomorphology*, 15 (3-4): 291-310.
- González A, Remondo J, Díaz de Terán JR, Cendrero A. 1999. A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides. *Geomorphology*, 30: 95-113
- Holmes A. 1913. The Age of the Earth. Harper, London.
- Hulse DK. 1999. The early development of the steam engine. TEE Publishing, Leamington Spa, U.K.

- ICS (International Commission on Stratigraphy). 2017. International Chronostratigraphic Chart, v 2017/02.
- ICS-INQUA (International Commission on Stratigraphy – International Union for Quaternary Research). 2016. Global chronostratigraphic correlation table for the last 2.7 million years.
- Kolbert E. 2011. Con ustedes el Antropoceno. La era del hombre. *National Geographic*, Marzo 2011: 24-47.
- Lewis SL, Maslin MA. 2015. Defining the Anthropocene. *Nature*, 519: 171-180. Doi:10.1038/nature14258.
- Liniger H, van Lynden G, Nachtergaele F, Schwilch G (eds). 2009. CDE-FAOISRIC-Mapping Land Degradation and Sustainable Land Management. LADA Technical Report n.º 9. Rome, FAO.
- López-Gamundí OR, Buatois LA (eds). 2010. Late Paleozoic Glacial Events and Postglacial Transgressions in Gondwana. Geological Society of America Special Paper, 468.
- Madison A. 2007. Contours of the world economy 1-2030 AD. Essays in Macro Economic History. Oxford Univ. Press.
- Marsh GP. 1864. Man and Nature. Or Physical geography as modified by human action. Charles Scribner, N. York.
- McGowran B, Berggren B, Hilgen F, Steininger F, Aubry MP, Lourens L, Couvering JV. 2009. Neogene and Quaternary coexisting in the geological time scale: The inclusive compromise. *Earth Science Reviews*, 96(4): 249-262.
- Nachtergaele FO, Petri M. 2008. Mapping Land Use Systems at global and regional scales for land degradation assessment. 2008. LADA Technical Report # 8, FAO, Rome.
- Nature. 2011. Vol. 473, Issue 7347, p. 254.
- Odada E, Oreskes N, Revkin A, Richter DB, Syvitski J, Vidas D, Wagreich M, Wing SL, Wolfe AP, Schellnhuber HJ. 2016. Stratigraphic and Earth System approaches to defining the Anthropocene. *Earth's Future*, 4, doi:10.1002/2016EF000379.
- Perea Velásquez FA. 2016. Derecho y medio ambiente. Librería Jurídica Sánchez R. Ltda. Bogotá.
- Price SJ, Ford JR, Cooper AH, Neal C. 2011. Humans as major geological and geomorphological agents in the Anthropocene: the significance of artificial ground in Great Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A369:1056-1084.
- Remondo J. 2001. Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad a deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo.
- Remondo J, González-Díez A, Soto J, Díaz de Terán JR, Cendrero A. 2005. Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas. *Geomorphology*, 66: 69-84.
- Rivas V, Remondo J, González A, Cendrero A. 2002. El papel de las actividades humanas en los procesos superficiales: el ejemplo de la cuenca del Besaya (Cantabria, España). In: Estudios recientes en Geomorfología. Patrimonio, montaña y dinámica territorial.

- E. Serrano, A. García de Celis, J.C. Guerra, C. Morales y T. Ortega (eds.). SEG-Univ. Valladolid: 131-140.
- Rivas V, Cendrero A, Hurtado MA, Cabral M, Giménez J, Forte LM, del Río L, Cantú M, Becker A. 2006. Geomorphic consequences of urban development and mining activities; an analysis of study areas in Spain and Argentina. *Geomorphology*, 73 (3-4): 185-206.
- Sánchez de la Torre L. 1983. Problemas ambientales derivados de los recursos del carbón. II Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Vol. Ponencias. Lérida. GEGAOT: 59-147.
- Sánchez Ron JM. 2009. Un mundo interdisciplinar. En la senda de Helmholtz y von Neumann. Universidad de Cantabria, Santander.
- Steffen W, Sanderson A, Tyson PD, Jäger J, Matson PA, Moore B, Oldfield F, Richardson K, Schellnhuber HJ, Turner BL, Wasson RJ. 2006. Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure. The IGBP Global Change Series. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Steffen W, Crutzen PJ, McNeill JR. 2007. The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 36(8): 614-621.
- Steffen W, Grinevald J, McNeill JR, Crutzen JP. 2011. "The Anthropocene: conceptual and historical perspectives". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A* 369: 842-867.
- Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, Gaffney O, Ludwig C. 2015. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1): 81-98.
- Steffen W, Leinfelder R, Zalasiewicz J, Waters CN, Williams M, Summerhayes, Barnosky AD, Cearreta A, Crutzen P, Edgeworth M, Ellis EC, Fairchild IJ, Galuszka A, Grinevald J, Haywood A, Ivar do Sul J, Jeandel C, McNeill JR, Odada E, Oreskes N, Revkin A, Richter DD, Syvitski J, Vidas V, Waple M, Wing SL, Wolfe AP, Schellnhuber HJ. 2016. Stratigraphic and Earth System approaches to defining the Anthropocene. *Earth's Future*, 4: 324-345. doi:10.1002/2016EF000379.
- Steinbeck J. 1939. The grapes of wrath. Viking, N. York.
- Stoppani A. 1871-73. Corso di geologia. Bernardoni e Brigola Editori. Milano.
- Teilhard de Chardin P. 1955. El fenómeno humano. Taurus Ediciones, S.A. Madrid. (Traducción 1986).
- Teilhard de Chardin P. 1923. Hominization. La vision du passé (The vision of the past, 1966. Collins, London).
- Ter-Stepanian G. 1988. Beginning of the Technogene. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 38: 133-142.
- Thomas WL. (ed.). 1956. Man's Role in Changing the Face of the Earth. Univ. of Chicago Press, Chicago.
- Thomas CD. 2013. The Anthropocene could rise biological diversity. *Nature*, 502 (7469), 7.

- Thompson K. 2016. ¿De dónde son los camellos? Alianza Editorial. Madrid.
- Vernadsky VI. 1929. La Biosphère. 2^e édition revue et augmentée, Paris, Librairie Félix Alcan, 1929. Rééd. avec une préface de Jean-Paul Deléage: Paris, Seuil, coll. «Points/Science», 2002.
- Vernadsky VI. La biosfera. A. Machado Libros, S.A. 1997.
- Waters CN, Zalasiewicz JA, Williams M, Ellis MA, Snelling AM (eds). 2014. A stratigraphical basis for the Anthropocene. Geological Society of London, Special Publ. 395.
- Waters CN, Zalasiewicz J, Summerhayes C, Barnosky AD, Poirier C, Galuzska A, Cearreta A, Edgeworth M, Ellis EC, Ellis M, Jeandel C, Leinfelder R, McNeill JR, Richter DB, Steffen W, Syvitski J, Vidas D, Waple M, Williams M, Zhisheng A, Grinevald J, Odada E, Oreskes N, Wolfe AP. 2016. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, Vol 351, Issue 629: 137-147.
- Zalasiewicz J, Williams M, Smith A, Barry TL, Coe AL, Brown PR, Brenchley P, Cantrill D, Gale A, Gibbard P, Gregory FJ, Hounslow MW, Kerr AC, Pearson P, Knox R, Powell J, Waters C, Marshall J, Oates M, Rawson P, Stone P. 2008. Are we now living in the Anthropocene? *GSA Today*, 18-2, doi: 10.1130/GSAT01802A.1
- Zalasiewicz J, Waters CN, Ivar do Sul JA, Corcoran PL, Barnosky AD, Cearreta A, Edgeworth M, Galuzska A, Jeandel C, Leinfelder R, McNeill JR, Steffen W, Summerhayes C, Waple M, Williams M, Wolfe AP, Yonan Y. 2016. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. *Anthropocene*, 13 (4-17).
- Zalasiewicz J, Waters CN, Wolfe AP, Barnosky AD, Cearreta A, Edgeworth M, Ellis EC, Fairchild IJ, Gradstein FM, Grinevald J, Haff P, Head MJ, Ivar do Sul JA, Jeandel C, Leinfelder R, McNeill JR, Oreskes N, Poirier C, Revkin A, Richter DB, Steffen W, Summerhayes C, Syvitsky JPM, Vidas D, Waple M, Wing S, Williams M. 2017. Making the case for a formal Anthropocene Epoch: an analysis of ongoing critiques. *Newsletters on Stratigraphy*, 50 (2): 205-226.