

## El Antropoceno:

### ¿Será la última época de la Historia Geológica de la Tierra?

### La crisis ambiental: ¿Problemática geológica o humana?

Salvador Ortuño Arzate

*"No! We're no longer in the Holocene but in the Anthropocene!"*

Paul J. Crutzen.

#### Crisis ambiental en la nueva época de la humanidad

Ya desde los pasados siglos, varios investigadores han señalado el impacto de la actividad humana sobre el planeta: v. gr. Buffon en 1780; el geólogo Antonio Stoppani en 1873 (que usó el término "era antropozoica" (sic), "el hombre es una nueva fuerza telúrica"); Vladimir Vernadsky en 1920 (creador de conceptos como "Biosfera" y "Noosfera"), entre otros; señalando la influencia humana sobre el clima, el suelo, y los equilibrios bio-geoquímicos.<sup>1</sup> Y estos impactos provocados por el ser humano sobre el ambiente parecen evidentes desde el Cuaternario y principalmente durante la fase final del Holoceno; término éste, propuesto por Charles Lyell en 1833.

El término Antropoceno fue propuesto originalmente por Eugene F. Stoermer; y posteriormente popularizado por el Premio Nobel de química en 1995, Paul J. Crutzen<sup>2</sup> (químico de la atmósfera, en la década de los años ochenta), para poner en evidencia las acciones del ser humano sobre el planeta y su ambiente total como Sistema Tierra.<sup>3</sup> Siendo que el Cuaternario comenzó hace 2.58 Ma y enseguida el Holoceno inicia hace 11,700 años, parecería lógico llamar Antropoceno a la época geológica actual dominada por las acciones humanas. Desde hace más de cien años, los estudiosos de los impactos

ambientales han llamado "psychozoic" o noosfera a la edad de la, sin precedente, potente intervención de la humanidad sobre el planeta.<sup>4</sup> Aducen los proponentes del nuevo término Antropoceno, que la huella humana sobre al ambiente del planeta ha devenido tan vasta e intensa que rivaliza con los grandes acontecimientos geológicos naturales en términos de impacto sobre todo el Sistema Tierra. "El término Antropoceno es la reiteración de un concepto, para señalar el impacto de la actividad humana en los procesos biológicos, físicos y químicos en y alrededor del planeta." (cf. Steffen et al., 2011<sup>5</sup>). A este término se asimila el impacto que la humanidad ha impuesto sobre el clima, la biodiversidad y la acumulación acelerada de los gases de efecto invernadero, la acumulación de desechos contaminantes en los mares, océanos y en los continentes, así como los daños irreversibles ocasionados por la explotación irracional de los recursos naturales. Esta concepción del impacto de la actividad humana sobre el planeta se ubica como una evidente hipótesis que, de verificarse por estudios científicos precisos, representa una gama de implicaciones peligrosas para la sostenibilidad y pervivencia del planeta y de la humanidad entera.

Etimológicamente, el término Antropoceno se deriva del griego *antropos*, hombre; y *kainos*, reciente. Entonces, *ἀνθρώπου*, es el genitivo de *ἄνθρωπος* hombre; y *ἀνθρώπου* α ον; es el adjetivo: humano, de hombres. Y de *καινός* ἢ ὄν, reciente, nuevo. Es decir, la "época reciente del ser humano". La terminología de Antropoceno implica a las Ciencias de la Tierra en la nueva visión de Sistema Tierra como entidad fenomenológica integral, pero surge desde las ciencias de la Química

ambiental. La instauración formal y científica en Geología de un nuevo concepto requiere varios años o décadas para su formalización. Ya que es necesario llevar a cabo una gran cantidad de investigaciones dirigidas a comprobar la existencia de causas, efectos de fenómenos medibles y susceptibles de seguimientos por las diferentes ciencias formales implicadas en las Ciencias de la Tierra, la ecología, las ciencias de la atmósfera, la climatología, paleoclimatología, estratigrafía, etcétera. Asimismo, el tema del Antropoceno implica situaciones sociales, económicas y políticas en el mundo actual y sus

<sup>1</sup>Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P. & McNeill, J., 2011.- *The Anthropocene: conceptual and historical perspectives*. Philosophical Transactions of the Royal Society, A 369 (1938): 842-867.

<sup>2</sup>Crutzen P. J. and Stoermer, E. F., 2000.- *The Anthropocene*. Global Change. IGBP Newsletter, Stockholm, Royal Swedish Academy of Sciences, 41, p. 17-18.

<sup>3</sup>Crutzen, P. J., 2002.- *Geology of mankind*. Nature, v. 415 (3 janv. 2002).

<sup>4</sup>Zalasiewicz, J., Williams, M., Steffen, W., & Crutzen, P., 2010.- *The New World of the Anthropocene*. Environ. Sci. Technol., 44, 2228-2231.

<sup>5</sup>Steffen, W., et al., 2011, op. cit., in Bonneuil, Ch., *Penser l'Anthropocene: un enjeu interdisciplinaire*. Centre Koyré d'Histoire des Sciences et des Techniques (UMR CNRS-Ehess-MNHN).

componentes sobre modelos alternativos de desarrollo y crecimiento global y económico. Además, también, el término Antropoceno se presenta como un fenómeno mediático en manos, y en pro, de los modelos desarrollistas neoliberales por el control del mundo y sus recursos; y por el impulso de “tomar el control sobre la máquina de la Tierra” y la imposición de controles tecnocientíficos sobre el planeta: malévolamente se ha expresado que “si la naturaleza es injusta, cambiémosla”, (cf. Steffen *et al.*, 2004, p. 9<sup>6</sup>; in Wallenhorst, *et al.*, 2019<sup>7</sup>). En resumen, en la perspectiva de los poderes de la globalización neoliberal, su actitud significará seguir tratando al Sistema Tierra como objeto, mas no como sujeto digno de respeto, cuidado, conservación y restauración. Ahora, ya aparecen las consecuencias desastrosas de este comportamiento equivocado como humanidad.

A la fecha, el tema del Antropoceno, aún no posee un estatus de hipótesis o teoría científica (o fenómeno natural verificable), ni caracterizado formalmente por los métodos convencionales que la ciencia establece, y la aceptación de la comunidad científica preconiza. El Antropoceno es aún un campo especulativo, de posible conocimiento organizado futuro, quizá, pero aun de carácter complejo, polisémico y paradójico. Al ser polisémico, el tema del Antropoceno implica, y necesita, la concurrencia de una gran variedad de disciplinas científicas (Geología, biología, ecología, las ciencias sociales, económicas, jurídicas y políticas, o la antropología), para esclarecer las esencias fenomenológicas y los impactos ambientales antropogénicos sobre el Sistema Tierra y sobre la humanidad, y la biosfera en su totalidad. Además, esta situación de crisis ambiental, por otra parte, como una aciaga realidad, requiere movilizaciones sociales y políticas y tomas de consciencia para revertir los impactos ambientales provocados, en el actual contexto complejo de pensamientos y acciones desarrollistas y de ingentes intereses financieros globales.

### El Antropoceno y la Nomenclatura Estratigráfica del Tiempo Geológico

El análisis y estudio de estas circunstancias del desastre ecológico actual, como una época *sui generis*, se ha discutido en diferentes foros internacionales, así como la propuesta de identificar esta época con el término Antropoceno, e incluir el término en la nomenclatura cronoestratigráfica de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional, como la sucesión cronológica del Holoceno; definiendo al Antropoceno como la época geológica del ser humano *versus* la historia geológica *sensu stricto*. Su posible inclusión en la Tabla Cronoestratigráfica se ha analizado y estudiado, durante la última década del siglo XXI, en las sesiones del Grupo de Trabajo sobre el Antropoceno (AWG, *Anthropocene Working Group*), el cual depende de la Subcomisión de Estratigrafía del Cuaternario (SQS, *Sub-commission of Quaternary Stratigraphy*) y de la Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS, *International Commission of Stratigraphy*) de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS, *International Union of Geological Sciences*).

El Grupo de Trabajo sobre el Antropoceno (AWG, por sus siglas en inglés) está encargado de definir la validez, el nivel jerárquico, la duración y el inicio de esta nueva época, “pretendidamente geológica”, a partir de las actividades humanas y su asignación en el registro geológico. Empero, algunos autores argumentan que el impacto ambiental no es significativo a la escala del tiempo de los acontecimientos geológicos del pasado. Dentro de la nomenclatura cronoestratigráfica de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional, el Antropoceno correspondería a una *serie* en tanto unidad-roca, y como una *época* en calidad de unidad geocronológica; si finalmente fuere aceptada su inclusión formal por parte de la Comisión Internacional de Estratigrafía (cf. Figura 1).

La Comisión Internacional de Estratigrafía es el subcomité científico de la IUGS, que se ocupa de la investigación estratigráfica, geológica y geocronológica a escala mundial, para el establecimiento de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional. Su principal objetivo, desde 1974, es establecer la escala temporal estratigráfica estándar de carácter global (identificada y materializada por eonotemas, eratemas, sistemas, series, pisos y

chronozonas) que sirvan de base para la conformación de la escala del tiempo geológico (definida por eones, eras, periodos, épocas, edades y chrones), para llevar a cabo las asignaciones de tiempo geológico y facilitar las correlaciones estratigráficas, así como las comparaciones litoestratigráficas, cronoestratigráficas, bioestratigráficas (paleontológicas) y geobiológicas entre distintas regiones del planeta. Para lograr este objetivo, se establecen patrones obtenidos con criterios estratigráficos rigurosos en las rocas (series sedimentarias, ígneas y metamórficas), y con la ayuda del registro fósil u otros métodos de

datación, los cuales se denominan secciones y puntos de estrato-tipos de límite globales.

Este sitio debe ser un lugar de sedimentación clara y perceptible.<sup>8</sup> En tal caso, la pregunta sería: ¿los seres humanos han marcado una influencia evidente y concreta a tal punto que la sedimentación geológica actual, en formación, contenga trazas distintivas humanas diferentes de los registros geológicos del Holoceno? Igualmente, ¿será susceptible de correlacionarse a nivel global?<sup>9</sup>

Eonotema / Eón	Erátoma / Era	Sistema / Sistema	Serie / Época	Piso / Edad	GSSP	Edad (Ma)
Cenozoico	Neógeno	Mioceno	Holoceno	Megalyano	↗	0.0042
				Noripiano	↗	0.0042
				Greenlandiano	↗	0.0117
			Pleistoceno	Superior	↗	0.129
				Chibaniano	↗	0.774
				Calabriano	↗	1.80
			Plioceno	Gelasiano	↗	2.58
				Piacenziano	↗	3.600
		Oligoceno		Zandliano	↗	5.333
				Mesiniano	↗	7.246
				Tortoniano	↗	11.63
				Serravaliano	↗	13.82
				Langhiano	↗	15.97
				Burdigaliano	↗	20.44
				Aquitano	↗	23.03
	Cuaternario			Chattiano	↗	27.82
				Rupeliano	↗	33.9

Figura 1.- Fragmento de la Tabla Cronoestratigráfica del Tiempo, visualizando los periodos Neógeno y Cuaternario, así como la posición del Holoceno. El término Antropoceno se ubicaría a continuación del Holoceno. Fuente: Comisión Internacional de Estratigrafía, versión 2021.

Actualmente, el Antropoceno no posee una asignación en la Tabla Cronoestratigráfica Internacional, al cuidado y edición de la Comisión Internacional de Estratigrafía. Por tanto, para adquirir una posición como Serie/Época en la Tabla Cronoestratigráfica se requiere la selección y ubicación de una sección cronoestratigráfica, o estrato-tipo, indicando, con precisión, su edad de inicio (*Global Boundary Stratotype Section and Points*), sobre la cima de la época del Holoceno; sitio de inicio cronológico

con edad o fecha precisa de inicio, el cual sería designado por un “Clavo dorado” (*Golden Spike*), o GSSP (*Global Standard Stratigraphic Point*), respaldado por la asignación de la Comisión Internacional de Estratigrafía, (cf. Figura 1). Este GSSP debe ser posicionado en un lugar del planeta, teniendo una correlación demostrada en un nuevo contexto global. Después de ser ubicado físicamente el GSSP, se asigna el GSSA (*Global Standard Stratigraphic Age*), es decir, la asignación de la edad, o

<sup>6</sup>Steffen, W., Sanderson, A., Tyson, P. D., Jäger, J., Matson, P., Moore III, B., Oldfield, F., Richarson, K., Schellnhuber, H. J., Turner II, B. L., Wasson, R. J., 2004.- *Global Change and the Earth System. A Planet Under Pressure*. The IGBP Book Series. New York: Springer.

<sup>7</sup>Wallenhorst, N., N., Robin, J.-Y. and Boutinet, J.-P., 2019.- *L'Émergence de l'Anthropocène, une Révélation Étonnante de la Condition Humaine? Répenser une Anthropologie Éducative en Anthropocène*. Asimismo: Wallenhorst, N., 2019.- *L'Anthropocène décodé pour les humains*. Paris: Le Pommier.



De acuerdo a lo estipulado anteriormente, varios de los requisitos de la Comisión Internacional de Estratigrafía para admitir el término Antropoceno no son aún cumplidos: v. gr., determinar nivel jerárquico; definir el límite inferior con el Punto (“Clavo dorado”) y Sección Estrato-tipo Global (GSSP), y el GSSA (*Global Standard Stratigraphic Age*, o escala geocronológica); tener un marcador principal y otros secundarios; debe poseer una correlación regional global; además, ser objeto de un proceso de sedimentación continua y un espesor adecuado, tanto en la parte superior, como por debajo para poder demostrar la transición; debe ser identificado como un punto de ubicación geográfica con latitud, longitud y altitud; y definir cuál es el acontecimiento humano que será el inicio del Antropoceno.

Se han analizado varios acontecimientos y sus posibles fechas de datación para marcar el inicio supuesto del Antropoceno. Entre estos acontecimientos, es posible mencionar los siguientes: la edad de la piedra (ca. 2.5 Ma 11,800 años), el mesolítico (ca. 11,800 a 5,000 años) y el neolítico; la depredación inicial de la megafauna del Cuaternario por el ser humano (ca. 50,000 a 12,000 años)<sup>10</sup>; y además las extinciones de la megafauna en Australia (marsupiales y aves) al final del Holoceno como el tigre dientes de sable de América o los mamuts lanudos de Siberia<sup>11</sup>; el inicio de la agricultura, en el Neolítico, y su influencia sobre el clima y la producción de CO<sub>2</sub> (hace 11,000 a 5,000 años aproximadamente) en el Creciente Fértil de Medio Oriente a Europa al inicio del Holoceno; el comienzo de la revolución industrial (durante el siglo XVIII, según Steffen *et al.*, 2011<sup>12</sup>, entre otros); el desarrollo de los modelos capitalistas y neoliberales basados en la depredación y la explotación de los recursos del planeta a partir de las estructuras colonialistas e imperiales de explotación y maximización de ganancias mercantiles, llevadas a cabo en los cinco continentes (en su apogeo desde el siglo XV hasta la actualidad); la “Gran Aceleración” (1945-2022) identificada como la sobrepoblación del planeta con más de 7 mil millones de personas y su consecuente depredación sobre el ambiente (siglo XX); las explosiones de las bombas nucleares y termo-nucleares y el despliegue del poder tecnocientífico de destrucción hacia la multiplicación de los escenarios de

guerra por todo el mundo durante el siglo XX, y hasta la actualidad.

Todos estos hechos históricos humanos, seguramente han marcado la sedimentación y el registro geológico, a pesar de la falta de análisis y estudios integrales que permitan conocer el balance fatal y real, y la confirmación de la presencia humana sobre el planeta. Entre estos acontecimientos de la historia humana, probablemente el más significativo, para ubicar el inicio del Antropoceno, sea el siglo XX (tiempo de la “Gran Aceleración”), ya que las guerras, la contaminación radiactiva y química alcanzó una inusitada magnitud y gran extensión a la escala de todo el planeta. Así, la existencia de marcadores en los sedimentos podrían ser las sustancias químicas nuevas de origen industrial, radioactividad, trazas de oligoelementos radiactivos, basura industrial, desechos industriales, desechos de guerras de armas convencionales y no convencionales, etcétera. Los ciclos biogeoquímicos naturales (del carbono, nitrógeno, oxígeno, fósforo, azufre...), están siendo fuertemente perturbados; su daño está ya produciendo cambios irreversibles en la biosfera, principalmente.<sup>13</sup>

Sin embargo, al no cumplir aún con los requerimientos previstos, y por las evidencias del Antropoceno, siendo una entidad de carácter histórico humano, se considera que el Antropoceno debería ser establecido sólo como una etapa de la historia humana, mas no de la historia geológica. Sería una etapa más como, por ejemplo, el paleolítico, neolítico, renacimiento, etc. La historia humana se caracteriza y es medible en años, fechas, etapas históricas, culturales; y sus objetos de estudio son los objetos arqueológicos, las diversas paleografías y los vestigios culturales. Por el contrario, la historia geológica se mide en miles o millones de años de edades absolutas y relativas de los acontecimientos geológicos, estudiados en las rocas, que han conformado el origen, la evolución, la composición y la conformación del planeta, así como la historia de la vida durante, y sincrónicamente, a tales acontecimientos.

Las ciencias geológicas son esencialmente ciencias geohistóricas, en las cuales el método científico es

retrodictivo (el estudio efecto-origen de los fenómenos en el tiempo pasado), basado en la retrodicción inductiva y el principio de la uniformidad de los procesos y las leyes naturales. Y, por otra parte, en el estudio y análisis desde el presente geológico hacia el acontecer del Antropoceno futuro, la Geología se encontraría en posición de hacer predicción “o de predecir”, ahora, hacia el devenir de la historia del planeta (un procedimiento epistemológico “invertido”, respecto al estudio geológico efecto-origen, basado, igualmente, en el principio de la “uniformidad de leyes naturales”). En esta situación, en la Geología, respecto al estudio del Antropoceno, se tendría que adoptar un enfoque epistemológico diferente para esta época de la historia humana, mas no el mismo principio de la teoría del conocimiento geológico, que tradicionalmente se ha aplicado, para el análisis de los acontecimientos ocurridos durante las etapas del tiempo geológico en el pasado.

A la fecha, aún no se ha dado una resolución o pronunciamiento sobre la posible inclusión del término Antropoceno, en cuanto a sitio y sección física (GSSP), y menos aún en cuanto a su edad geológica (GSSA), por parte de la Comisión Internacional de Estratigrafía. Por otro lado, el Grupo de Trabajo sobre el Antropoceno (AWG, por sus siglas en inglés), y el *Haus der Kulturen der Welt*, HKW, (Casa de las Culturas del Mundo), informan que se están llevando a cabo trabajos e investigaciones en el programa GSSP, los cuales serán dados a conocer durante el verano del año 2022.

Con acuerdo a lo precedentemente mencionado, los geólogos no deben precipitarse a introducir el término Antropoceno, cuando toda la Tabla Cronoestratigráfica, de 4,600 Ma<sup>14</sup> de historia geológica, ha sido compuesta y fundamentada por una gran cantidad de investigación y trabajo desde hace siglos; y no por una aparente evidencia en estas épocas históricas de la humanidad. Además, frente a la historia geológica del planeta de 4,600 Ma, la presencia humana no va más allá de “1 minuto” si se compara esa historia de la Tierra a un día de 24 horas. Por tanto, la duración de la permanencia del ser humano y su impacto ambiental durante algunos siglos de su historia, no significa prácticamente nada en una secuencia sedimentaria que “registre” la presencia humana en la sedimentación. ¡El Holoceno se sitúa, en esta comparación, en el último cuarto de segundo y la revolución industrial en las dos últimas milésimas de segundo! Por lo tanto, el Antropoceno tendría que estudiarse profundamente como una etapa de la historia

humana, en esta postmodernidad, mas no como una serie/época del registro geológico del tiempo.

### La catástrofe ecológica actual y los vectores del no – retorno; La urgente prioridad

Amén de las consideraciones geológicas y científicas que ha suscitado el Antropoceno, el hecho esencial es la realidad del desastroso impacto ambiental que la actividad humana ha producido sobre el planeta, así como el riesgo que representan los vectores de no-retorno, los cuales anuncian, ya, una próxima catástrofe planetaria. Esta situación ambiental compleja en cuanto a su análisis y a las vías de solución, representa un desafío multifactorial y polisémico para la ciencia, la tecnología, el humanismo, la cultura y para la conciencia humana en su sentido más profundo. Lo cual implica, incluso, poner en riesgo la continuidad de la vida humana sobre el planeta.

Las formaciones socioeconómicas durante las diferentes etapas de la historia humana son responsables de la depredación; por ello son cuestionables los modos de producción, implementados a lo largo de la historia humana, particularmente a partir de la era industrial y del desarrollo científico y tecnológico. El paradigma científico – tecnológico incide, paradójicamente, en una crisis ambiental de magnitud colosal. La etapa de estabilidad geológica-climática del Holoceno se ha interrumpido por la presencia humana, principalmente a partir de la revolución industrial. Y en cuanto a la seguridad de la humanidad en el planeta, ésta se precipita hacia un escenario de inestabilidad desconocida, en un Sistema Tierra que, desde hace millones de años, era estable y geológicamente natural. En un escenario mediano, por ejemplo, la temperatura media del planeta sería, según los pronósticos, de +4°C hacia el año 2100. Además, la pérdida de la biodiversidad ocurre actualmente a una velocidad sin precedente, mil veces más elevada que la media geológica-paleontológica observada en el registro fósil. A este ritmo, la humanidad podría protagonizar la sexta extinción masiva de la historia geológica, desde la aparición de la vida. Estos impactos ambientales sobrepasan la posibilidad de la adquisición de una experiencia, o de la conformación de una conciencia en la cultura humana. Aun conceptualizando sabiamente el ambiente natural, la ecología, la economía ecológica, por una parte, y el impacto y depredación ambiental como externalidades, por otra parte, es urgente fundamentarse sobre las variables económicas y sociales *vis-à-vis* del Sistema Tierra en su totalidad, para así, proceder a la

<sup>8</sup>Wallenhorst, N., *et al.*, op.cit. 2019.

<sup>9</sup>Wallenhorst, N., 2019.- *L'Anthropocène décodé pour les humains*. Paris: Le Pommier.

Harari, Y. N., 2018.-, *De animales a dioses; Breve historia de la humanidad*. Ed. Penguin Random House Grupo Editorial., pp 80-91; 95-116.

<sup>10</sup>Zalasiewicz, J., Williams, M., Haywood, A., and Ellis, M., 2011.- *The Anthropocene: a new epoch of geological time?*

<sup>11</sup>Phil. Trans. R. Soc. A, 369, 835-841. doi: 10.1098/rsta.2010.0339.

<sup>12</sup>Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P., McNeill, J. -2011. *The Anthropocene: conceptual and historical perspectives*. Philosophical Transactions of the Royal Society, 369, 842-867, in Wallenhorst *et al.*, 2019.

<sup>13</sup>Manahan, S., E., 2007.- *Introducción a la Química Ambiental*. Ed. Reverté-UNAM. Pp.1-29.

<sup>14</sup>Comisión Internacional de Estratigrafía, 2021.- *Tabla Cronoestratigráfica Internacional*.

conformación de un desarrollo sustentable en el futuro: y, aun así, la problemática ambiental parece no tener soluciones precisas e inmediatas actualmente.

Además, desde el punto de vista de la teoría sistémica, la concepción del Sistema Tierra tiene por objeto el estudio de las interacciones de los diferentes componentes del planeta, es decir, la geosfera, hidrosfera, atmósfera y la biosfera, (Figura 2). El objetivo fundamental, amén de la aprehensión del ente geológico *per se*, es la definición y conocimiento de las condiciones necesarias para el mantenimiento de los estados de equilibrio dinámico del Sistema Tierra, desde los inicios del Holoceno, por ser ésta la época de la presencia humana, y a partir de una perspectiva humanística, altruista e integral. En todo el Universo, sólo existe un lugar donde la vida puede sustentarse, un pequeño planeta que orbita alrededor de una estrella llamada Sol, que le proporciona el calor y la dinámica para proveer las condiciones para la vida. ¿Cuáles fueron esos fortuitos acontecimientos en el Universo, que crearon un maravilloso planeta apto para alojar la vida en su seno? Una cadena fortuita y probabilística jamás hubiese creado tanta perfección y belleza. En esta manifestación de sentido ético y estético, la humanidad no debe, y no puede, ser inconsciente verdugo.

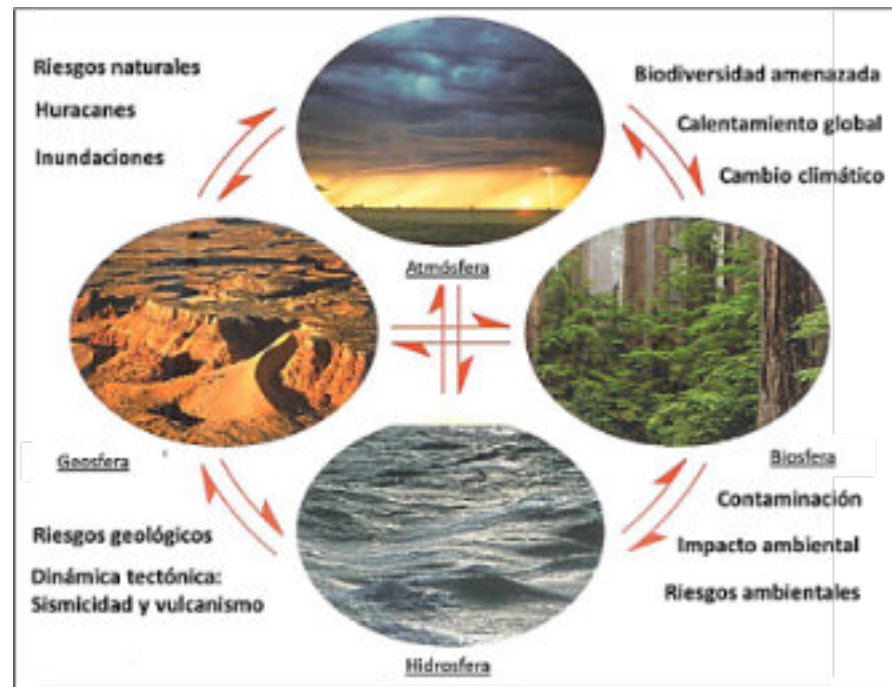


Figura 2.- El Sistema Tierra y sus esferas envolventes y cuyas relaciones complejas, definen el funcionamiento de todo el sistema que mantiene un asombroso equilibrio dinámico. Sobre este sistema tienen lugar los fenómenos geológicos, meteorológicos y los riesgos geológicos, así como los riesgos e impactos ambientales antropogénicos. Imagen según Tarbuck y Lutgens, 2013, Ciencias de la Tierra; modificada.

Ya desde la antigüedad los filósofos griegos aprehendieron la intuición que la composición del mundo-cosmos poseía cuatro elementos: la tierra, el agua, el aire y el fuego. Cada uno ha sido abordado por las ciencias modernas: la tierra en su composición por la física, la química, la mineralogía y la petrología; y en su dilucidación estructural y cinemática, por la estratigrafía, la geología estructural y la geotectónica. La teoría del conocimiento de los elementos agua y aire, se vislumbra maravillosamente por la física, la química, la hidrología, la meteorología, la climatología, la mecánica de fluidos... Finalmente, el fuego, que se traduce en la energía, es el objeto del conocimiento de varias disciplinas científicas como la física teórica, mecánica cuántica; y de manera prodigiosa por la ecuación relativista general, profunda y elegante de Einstein, donde la materia y la energía interactúan en el espacio-tiempo, constituyendo una sola e impresionante unidad en la evolución de todo el Universo.

Por otra parte, la distribución dinámica de los contaminantes físicos, químicos y radiactivos se lleva a cabo a través del agua, el aire y el suelo. En su transporte son determinantes los fenómenos de la geodinámica externa del planeta, ya que los procesos sedimentarios como la erosión, el transporte y el depósito de los sedimentos constituyen, asimismo, los vectores de transporte de los productos contaminantes generados por

la actividad humana en todos los contextos de la actividad económica, industrial, de consumo, y hasta de actividades bélicas, etcétera. Por tal razón, los diferentes productos residuales contaminantes se encuentran en los suelos transportados y residuales, así como en la mayoría de los cuerpos de agua, superficiales de escorrentía, subterráneos, acuíferos, lagunas, mares y océanos. De esta manera, los contaminantes son depositados con los sedimentos, alterando los ecosistemas y los ciclos biogeoquímicos naturales del planeta. A partir de tales conocimientos, sobre la dinámica geo-ecológica, ha nacido la Geología ambiental hace ya varias décadas, con el objetivo de aprehender la dinámica e interacción de las esferas envolventes del Sistema Tierra como una sola entidad, (Figura 2). El estudio de la geodinámica externa de la superficie del planeta permite identificar, caracterizar, cuantificar y evaluar los componentes contaminantes y conocer su dinámica de distribución en los ecosistemas.

Según Steffen *et al.*, 2011 y 2015, todos los incrementos en las variables del impacto ambiental,

durante el siglo XX, principalmente a partir de 1945, conforman lo que se ha denominado la “Gran Aceleración”<sup>15</sup>. Algunas variables son: el incremento del bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera, de los óxidos nitrosos, del metano, de la temperatura media de la Tierra, de la acidificación de los océanos, así como la afectación de la capa de ozono estratosférico y las fuertes disminuciones de las especies animales y vegetales en la biosfera, que conlleva la pérdida grave de la biodiversidad (cf. Figura 3). Según las investigaciones en diversas disciplinas científicas, el incremento desmesurado de estos factores son la causa del calentamiento global, del acelerado deshielo en las regiones polares y en áreas de montaña en altitud, de la desertificación de extensas regiones continentales, de las modificaciones y alteraciones climáticas (sequías e inundaciones) y de la inminencia presente y futura de la elevación del nivel medio de mares y océanos a escala global.<sup>16</sup>

Por otra parte, en el contexto de la historia humana destacan varios acontecimientos de carácter social, económico, político y cultural que han incidido e impactado el ambiente natural. Así, destacan, desde los

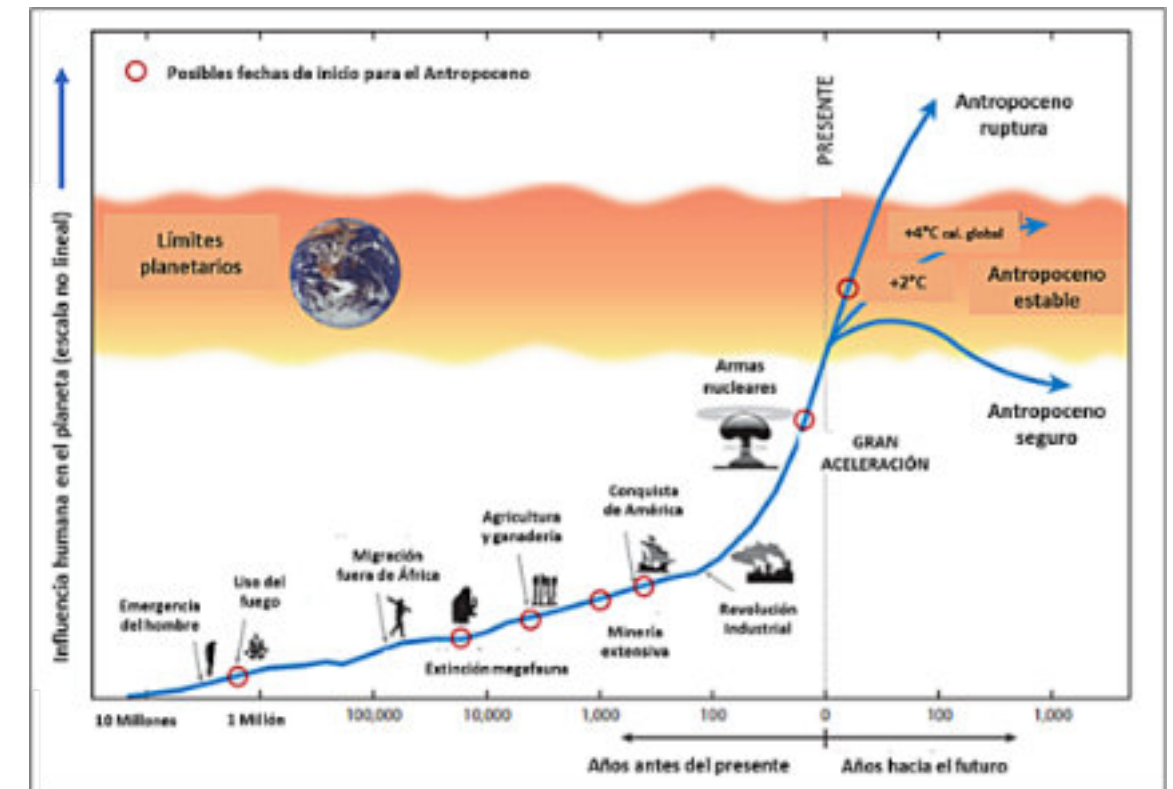


Figura 3.- Cronología de la influencia humana en el medio ambiente, hasta la Gran Aceleración contemporánea; según: Malhi, Y., 2017.- *The Concept of the Anthropocene*. Annual Review of Environment and Resources. 42. pp.77-104.

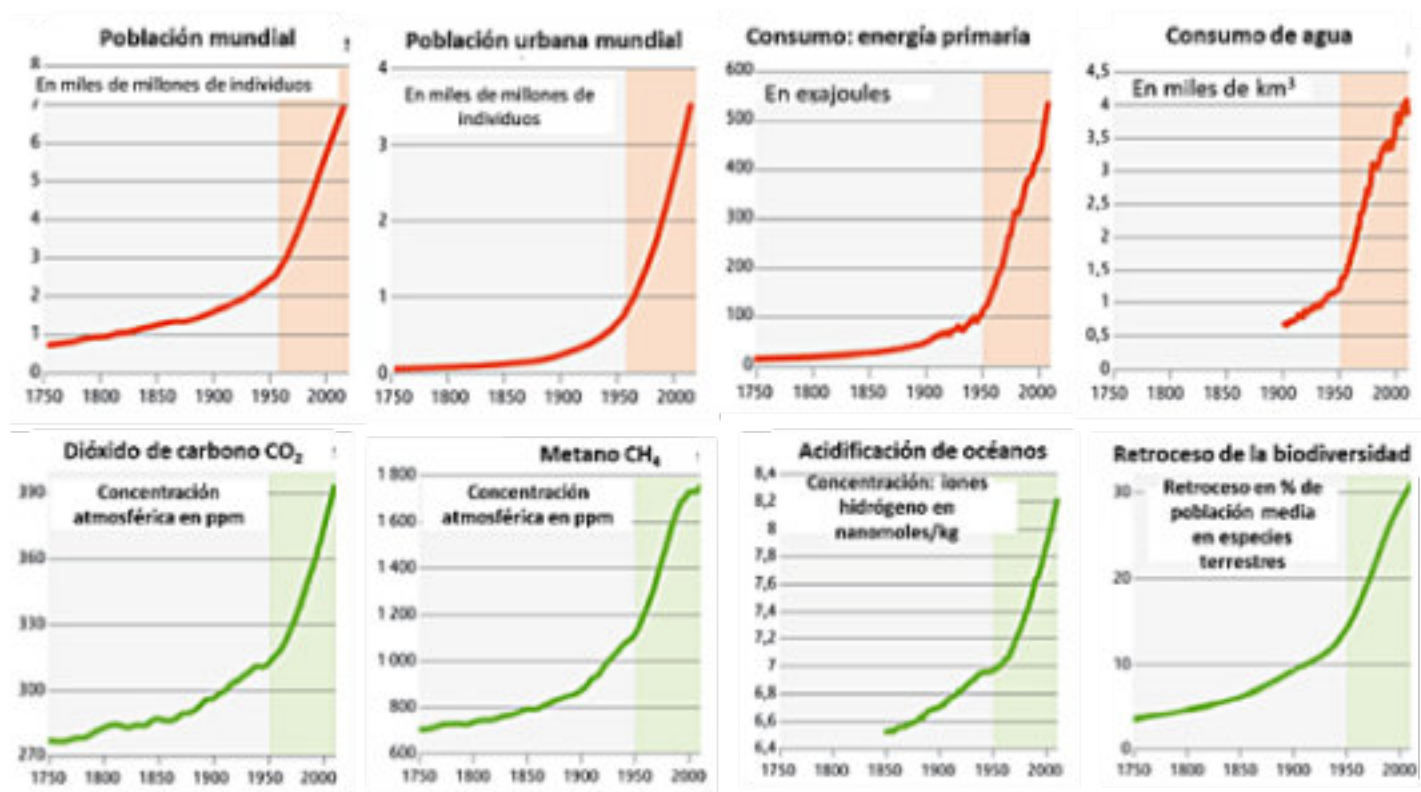
<sup>15</sup>Steffen, W. *et al.*, 2011.- *The Anthropocene: conceptual and historical perspectives*. Philosophical Transactions of The Royal Society A., 369, 842-867, doi: 10.1098/rsta.2010.0327. Steffen, W., *et al.*, 2015.- *The trajectory of the Anthropocene: the Great Acceleration*. The Anthropocene Review.

<sup>16</sup>Hansen, J. *et al.*, 2015.- *Ice melt, sea level rise and superstorms*. Atmospheric Chemistry and Physics.



albores de la humanidad, la emergencia del ser humano, como ente pensante y con enorme capacidad de acción sobre el entorno natural, el uso del fuego, las extensas migraciones humanas la conquista de todo el planeta, la extinción de la megafauna durante el Cuaternario, la revolución agrícola acompañada con el pastoreo y la crianza de animales, la explotación de recursos como los metales y la minería, la revolución industrial (y el inicio del uso intensivo de los combustibles fósiles), el desarrollo de armamento, la expansión del colonialismo y la acelerada explotación de recursos naturales, el desarrollo de la geopolítica armamentista, la tecnología nuclear bélica... Y así, hasta llegar a “La Gran Aceleración” que comenzó entre los siglos XIX y XX y se mantiene peligrosamente presente en este convulsionado siglo XXI, (Figura 3).

De estas variables, o vectores cruciales, varios se encuentran en etapa crítica y de “no retorno” (cf. la Figura 4 y la Tabla 1, siguientes). Entre los parámetros de desarrollo económico general destacan, a partir de la mitad del siglo XX, el incremento desmesurado de la población mundial, de la urbanización de la población mundial, del consumo de energía primaria y del desmesurado consumo de agua continental, entre otros factores críticos. Y entre los parámetros que inciden en la dinámica del Sistema Tierra, el incremento del CO<sub>2</sub>, del metano, la acidificación de los océanos y el aniquilamiento de la biodiversidad. Un vector o indicador crítico de esta etapa es el contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera que, desde 1950 ha alcanzado un valor de 380 ppm en 2007<sup>17</sup>; y que en 2021 fue del orden de 414.7 ppm.



Fuentes: Steffen, W. et al., 2011.- The Anthropocene: conceptual and historial perspectives. Philosophical Transactions of The Royal Society A., 369, 842-867, doi: 10.1098/rsta. 2010.0327.  
Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. & Ludwig, C., 2015.- The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. The Anthropocene Review. (Données: International Geosphere-Biosphere Programme et Stockholm Resilience Centre), in Quenault, Béatrice, 2015.- Changement climatique à l'ère de l'Anthropocène. MCF en économie, ESO, Rennes (UMR CNRS, 6590) Université Rennes 2, France.

Figura 4.- Parámetros de desarrollo económico general; población y consumos de energía primaria y agua dulce (gráficas superiores); y parámetros ambientales del sistema Tierra (gráficas inferiores).

Asimismo, el calentamiento global, la pérdida de la biodiversidad, el cambio climático, el desmesurado consumo de los recursos del planeta y los desechos generados por sus procesos de extracción (caso de la minería en general y la explotación petrolera), han dado como resultado la actual y aciaga crisis ambiental. Es importante mencionar, además, que los recursos no renovables como los hidrocarburos, dada su sobreexplotación, se encuentran en etapa de fuerte declinación; con la consecuente agravación de las situaciones geopolíticas, conflictos bélicos e ingentes impactos ambientales, en suelos, agua y aire. Incluso, las llamadas energías limpias han generado inconvenientes en sus procedimientos tecnológicos, impactando también el ambiente; como el caso del uso de biocombustibles, o la afectación del paisaje por los sistemas eólicos de generación eléctrica.

Se han identificado nueve vectores o determinantes biofísicos, los cuales son considerados críticos y esenciales para el mantenimiento de los equilibrios ecológicos del planeta. Entre éstos, tres son susceptibles de presentar riesgos de ruptura o de disfuncionalidad a escala mundial, como: el cambio climático, acidificación de los océanos y adelgazamiento o vulnerabilidad de la capa de ozono estratosférica. Los restantes seis vectores parecen tener, por ahora, solo impactos locales o regionales; pero si interactúan o se adicionan pueden magnificarse y provocar impactos a la escala mundial. Para cada uno de los vectores, se han determinado límites críticos, que una vez sobrepasados representan riesgos y desequilibrios que amenazan la supervivencia humana de manera dramáticamente catastrófica<sup>18</sup>. Estos vectores y sus límites críticos son mencionados en la Tabla 1 y en la Figura 5.

Procesos: Sistema Tierra	Indicadores	Límites propuestos	Valor actual (2015)
Pérdida de la biodiversidad	Ritmo de extinción de especies (número de especies desaparecidas por millón de especies y por año)	10	>100
Cambio climático	Concentración atmosférica de CO <sub>2</sub> en ppm por volumen	350	387
	Forzamiento radiactivo en W/m <sup>2</sup>	1	1.5
Ciclos biogeoquímicos: Nitrógeno	Cantidades de N <sub>2</sub> removido de la atmósfera para actividades humanas (millones de toneladas/año)	35	121
Ciclos biogeoquímicos: Fósforo	Cantidades de P <sub>2</sub> vertidas al océano (millones de toneladas/año)	11	8.5 - 9.5
Acidificación de los océanos	Saturación media global de aragonita (CaCO <sub>3</sub> ), en los océanos; adimensional	2.75	2.90
Agujero en la capa de ozono	Concentración de ozono estratosférico (unidades Dobson)	276	283
Consumo de agua dulce	Consumo de agua dulce en km <sup>3</sup> /año	4,000	2,600
Cambio de uso de suelos	Porcentaje de tierras naturales transformadas en tierras agrícolas	15	11.7
Presencia de aerosoles atmosféricos	Concentración global de partículas	Indeterminada	
Contaminación química	Cantidades vertidas (concentración en el ambiente) de:	Indeterminadas	
	*Contaminantes orgánicos		
	*Materiales plásticos		
	*Perturbadores endocrinos		
	*Metales pesados		
	*Desechos radiactivos; etcétera.		

Fuente: Steffen, W. et al., 2011.- The Anthropocene: conceptual and historial perspectives. Philosophical Transactions of The Royal Society A., 369, 842-867, doi: 10.1098/rsta. 2010.0327.

Tabla 1.- Los vectores o procesos determinantes biofísicos y químicos ambientales en el ámbito global. Tales procesos definen indicadores medibles que se encuentran en situación de riesgo.

<sup>17</sup>Steffen, W., Crutzen, P. J., McNeill, J. R., 2007.- The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature? Ambio, vol. 36, no. 8, Stockholm.

<sup>18</sup>Steffen, W., et al., 2015.- Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, pp. 1259855. In Quenault, Béatrice, 2015.- Changement climatique à l'ère de l'Anthropocène. MCF en économie, ESO, Rennes (UMR CNRS, 6590) Université Rennes 2, France.

De estos vectores críticos ambientales, actualmente son tres los que han sobrepasado el umbral de riesgo que pueden provocar desequilibrios potencialmente irreversibles. Estos tres vectores de riesgo son el cambio climático, la pérdida progresiva de la biodiversidad y la presencia de óxidos nitrosos en el aire<sup>19</sup>. En cuanto al cambio climático y los riesgos de calentamiento global, un factor de riesgo, por la inminencia de catástrofe climática, es la cantidad peligrosa de contenido de bióxido de carbono, y otros gases de efecto invernadero, en la atmósfera. De acuerdo a los estudios de Steffen *et al*, 2015, el umbral de 350 ppm de CO<sub>2</sub> ya representa el valor límite inferior de un intervalo peligroso que se temía llegará a ser entre 350 y 550 ppm; con lo cual ya existe un grave peligro para el equilibrio dinámico planetario.

Desafortunadamente, durante el año 2021 se alcanzó la cifra de 414 ppm de CO<sub>2</sub>. Aunado a lo anterior, el efecto invernadero provocado por estos gases, es incrementado por la radiación solar la cual contribuye al calentamiento del suelo y de la atmósfera, incrementando la temperatura a niveles que alteran el equilibrio térmico del planeta. Desafortunadamente, no parece existir un consenso mundial para llevar a cabo estrategias concretas con el objeto de revertir este factor que, hasta ahora, parece irreversible. La Tierra, de manera natural, sin el ser humano a cuestas, tardaría varias decenas de miles de años para restaurar sus condiciones bio-geoclimáticas iniciales del Holoceno. Empero, la huella humana dañina permanecerá varios cientos de miles de años, o quizá, aun,

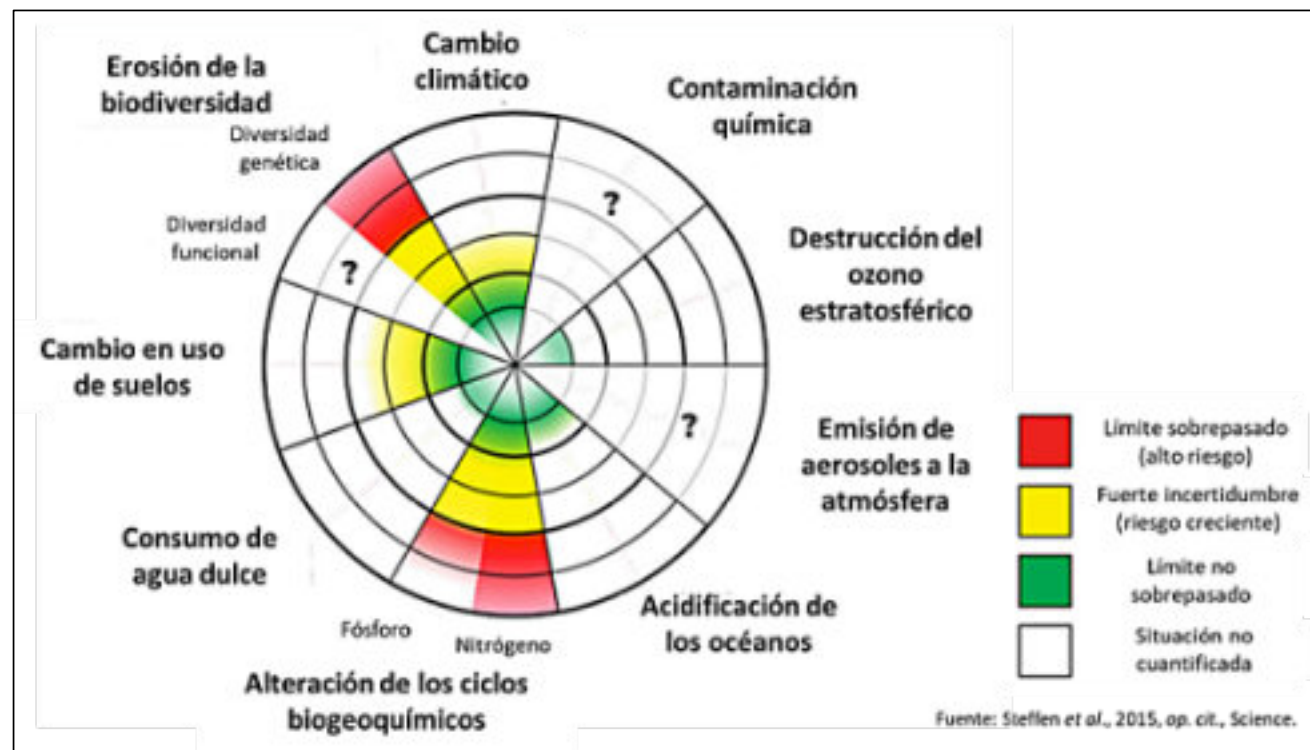


Figura 5.- Variables del riesgo planetario actual. Tres variables han sobrepasado los límites de riesgo, de estado irreversible o no retorno: Cambio climático, pérdida progresiva de la biodiversidad y tasa de nitrógeno. Fuente: Rockström *et al.*, 2009<sup>20</sup>; y Steffen *et al.*, 2015; in Quenault, B., *op. cit.*, 2015.

varios millones de años en los registros estratigráficos de la Tierra.

Debido a estos problemas ambientales, se han generado otras plagas y catástrofes humanas como las reiteradas epidemias y pandemias (v. gr. peste bubónica,

gripe española, amarilla, influenza humana y aviar, ébola, covid 19, etcétera)<sup>21</sup>, la inmigración acelerada<sup>22</sup>, las guerras internacionales, las crisis humanitarias, guerras civiles, ingobernabilidad y los desórdenes sociales, crisis económicas, crisis políticas, emergencia de poderes

militares y absolutistas, agresiones geopolíticas depredadoras hacia las naciones más vulnerables, las hambrunas mundiales (conllevando enfermedades endémicas y epidemias en zonas y países marginados), crisis individuales de consciencia y de pensamiento en las personas, la mundialización de las problemáticas sociales y de poder, excesos de depredación y de poder sobre lo otro y los otros (xenofobia y racismo a ultranza), etcétera. En tal contexto, las crisis sanitarias de los últimos dos siglos, tanto humanas como en los animales, parecen ser el resultado de varias causas, como son el medio ambiente contaminado, los sistemas económico-sociales y políticos en estado de crisis (naciones y zonas de influencia geopolítica de cualquier tinte ideológico), la dinámica de los agentes patógenos, las interacciones entre humanos y animales, y sus posibles enfermedades zoonóticas, originando, incluso, nuevas enfermedades emergentes. Las pandemias y epidemias han sido casi siempre desencadenadas por los cambios en el ambiente provocados por las actividades humanas. Particularmente, las enfermedades infecciosas suelen ser el resultado de la interacción ecológica entre los seres humanos y diferentes especies de organismos y/o microorganismos (zoonosis). Desgraciadamente, el medio ambiente, ahora, ha llegado a ser el esclavo de la humanidad, fuertemente contaminado y saqueado en sus recursos. En realidad, la huella ecológica más agresiva está conformada y dirigida por la élite oligárquica financiera y política del planeta, la cual representa menos del 10% de la población mundial, a través de sus mecanismos multinacionales y de explotación neoliberal, tanto de los recursos naturales como de los seres humanos ("*Homo hominī lupus*"; "*El hombre, lobo del hombre*"). Estas son las exigencias, a resolver, más urgentes que pesan sobre la consciencia ética de la población mundial.

### Breve Epílogo

Surge, de este breve ensayo, un definitivo corolario: la aciaga y preocupante crisis ambiental que sufre la humanidad es, y debe ser, la tarea más urgente, y prioritaria, por afrontar y resolver; o al menos paliar de manera inmediata. Los poderes financieros y políticos mundiales *de facto*, enfrentan un reto de elección por la vida o por el suicidio colectivo, que pesa sobre su afán desmedido de enriquecimiento. Y a la población mundial corresponde la toma y engrandecimiento de una consciencia cosmo-ética y de activismo y lucha política contra la explotación de la naturaleza y su propia emancipación.

Con respecto al Antropoceno, es evidente que su estudio está comenzando en este siglo XXI, perfilándose como una etapa fundamental de la historia humana. Aún no se ha incluido, ni requiere ser incluido como serie/época de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional. Su importancia es magna y radica en el hecho que será el vector fundamental en la solución de las problemáticas ambientales de la actualidad; porque dará la base para establecer estrategias y acciones por el mejoramiento, la preservación y la protección ambiental a escala mundial. El Antropoceno es y será una importantísima y esencial etapa de la historia de la humanidad.

Además, la crisis humanitaria actual, enraizada en la crisis ambiental, cuestiona y contradice nuestra visión del mundo *vis-à-vis* de la postmodernidad. Evidencia la contradicción entre la naturaleza y la ególatra cultura humana: una historia humana que lesiona la historia geológica de la vida en la Tierra acaecida durante millones de años. La idea del humanismo renacentista como inicio de la cúspide del saber humano, se contradice con el sentimiento de dominación y explotación de la naturaleza, que la era industrial y científico-tecnológica institucionalizó como vector del progreso. La crisis climática y ambiental pone en entredicho las estrategias económicas y geopolíticas fundadas sobre los recursos no renovables, como los hidrocarburos y el carbón, en tanto que fuentes de energía del llamado "progreso" material humano. El progreso depredador del ser humano borró la finalidad, el *Télos* (*Τέλος εως [ους] τό*), o realización, (cumplimiento, consumación o finalidad), de la historia geológica y de la vida en la Tierra. La egolatría humana parecería cerrar las sucesiones exitosas de la vida en la historia geológica, con su presencia "pensante" (*sic*) en la noósfera. Las ciencias humanas separaron la esencia de la explicación causal de los fenómenos humanos, de las causas fundamentales y del decurso de la naturaleza. El ser humano se separó de su fundamento vital: la naturaleza. Por ello, la libertad humana, tan preconizada por humanistas y filósofos (v. gr. las ideas de Jean Paul Sartre y Martín Heidegger, al respecto), sólo puede ser posible sobre la base de una consciencia y pertenencia de y a la naturaleza toda. Ahora, en la esperanza de una postmodernidad de nueva concepción, una innovada consciencia ambiental requiere urgentemente un renovado diálogo entre la naturaleza y todas las ciencias del relativo conocimiento y saber humanos. Por todo ello, sería fatal aplazar, *sine die*, las acciones en pro del medio ambiente; jestá de por medio el milagroso fenómeno de la vida en la Tierra!

<sup>19</sup>Steffen, W., *et al.*, 2015.-*op.cit.*

<sup>20</sup>Rockström, J., *et al.*, 2009.- *Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity*. Ecology and Society, vol. 14, no.2, 32 Stockholm Resilience Alliance.

<sup>21</sup>Galeana, P., 2020.- *Las epidemias a lo largo de la historia*. Antropología Americana, vol. 5, núm. 10, pp. 13-45.

<sup>22</sup>Gemenne, F., 2020.- *Les réfugiés de l'Anthropocène. La question du territoire à l'heure du changement climatique*. Geo-Eco-Trop., 44, 4: 623-629.



**Salvador Ortuño Arzate.** Semblanza sucinta



Actualmente es Comisionado de la Comisión Nacional de Hidrocarburos de México. Profesor titular en la Escuela Militar de Ingenieros de la Rectoría del Ejército y la Fuerza Aérea; y en la Facultad de Ingeniería de la UNAM; en asignaturas de Ciencias de la Tierra; Consultor independiente en temas de Geología y exploración petrolera.

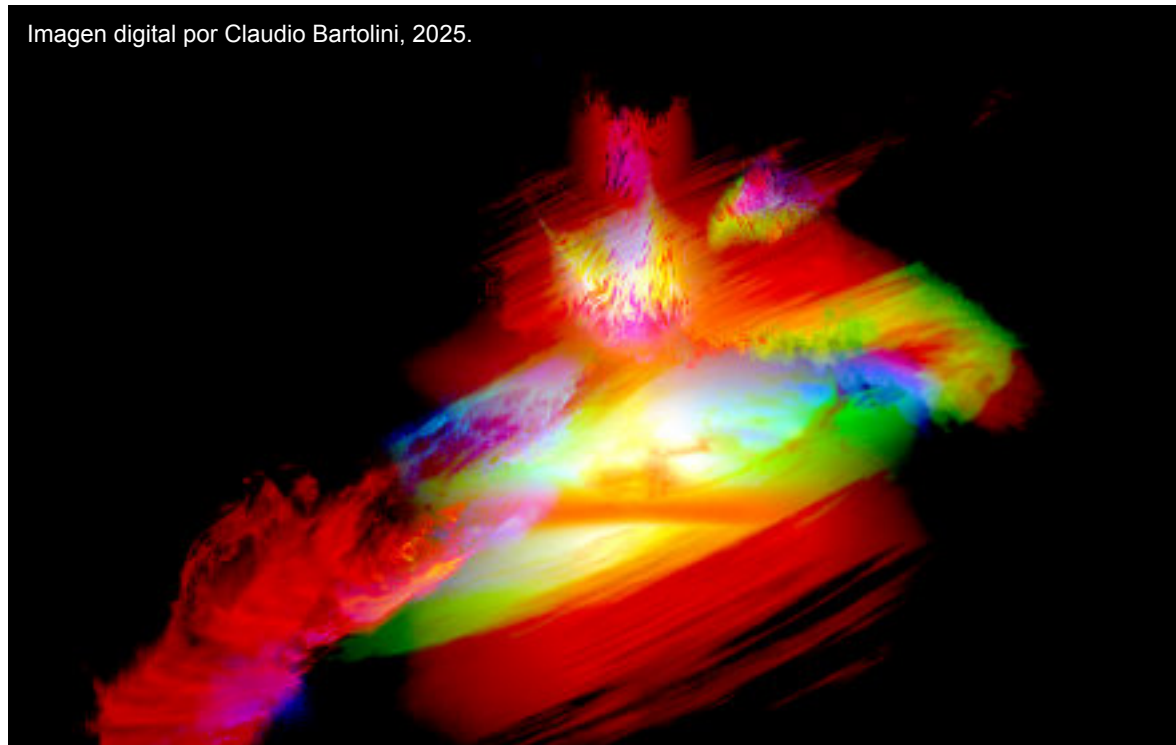
Ha sido investigador en el Instituto Mexicano del Petróleo por más de veinticinco años; y en el *Institut Français du Pétrole*, desempeñándose como investigador huésped (*“Visiteur scientifique”*), para el desarrollo de proyectos de investigación y uso de nuevas tecnologías de modelado geológico, caracterización de sistemas petroleros, métodos de exploración petrolera, yacimientos naturalmente fracturados y teledetección aeroespacial aplicada a la exploración de recursos petroleros.

Asimismo, ha publicado libros y artículos técnicos, v. gr. *“El Mundo del Petróleo”*. FCE, 2009; *“La seguridad energética como elemento de la seguridad nacional”*, *“Perspectivas petroleras de México”*; *“¿Cuándo se agotará el petróleo?”*; *“Campos maduros, retos difíciles”*; y *“Chicontepec: dislate técnico y político”*.

Ejerce la pintura al óleo, como reflejo de la maravilla estética de la naturaleza y la Geología del planeta.

<https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Salvador-Ortuno-Arzate-74472572>

Imagen digital por Claudio Bartolini, 2025.



**No hay nada imposible para quien lo intenta.**

**Alejandro Magno**

# Foro de discusión Discussion Forum

**A sugerencia de uno de nuestros lectores, a partir de ahora, estaremos incluyendo las opiniones y discusiones de nuestros lectores en relación a las Notas Geológicas publicadas, lo que permitirá la participación activa de los interesados. En definitiva, este foro de discusión será de gran valor para mantener el interés en una gran variedad de temas geológicos, y creará un ambiente de colaboración cordial entre nuestras comunidades de Geociencias.**

**Por favor envíen sus observaciones, comentarios y sugerencias a cualquiera de los Editores de la Revista Maya de Geociencias.**

**At the suggestion of one of our readers, beginning with this August issue we will be including opinions and discussions from our readers relating to the published geological notes. This will permit active participation by interested parties. This discussion forum will certainly have great value for maintaining interest in a wide variety of geological themes, and will create a cordial, collaborative atmosphere among our geoscience community.**

**Please send your observations, comments and suggestions to any of the Editors of the Revista Maya de Geosciencias.**