

Artigo

Antropoceno: Os Desafios de um Novo Mundo

Silva, C. M.; Arbilla, G.*

Rev. Virtual Quim., 2018, 10 (6), 1619-1647. Data de publicação na Web: 29 de março de 2018<http://rvq.sbq.org.br>**Anthropocene: The Challenges for a New World**

Abstract: In the last decades, the humankind has become a geological force and rivals with the great forces of nature in the impact and modification of the Earth system. The word Anthropocene was proposed by the scientists Paul Crutzen and Eugene F. Stoemer, in 2000, to describe this new age and capture the central human role in geology and ecology. In this article, a brief review of Anthropocene history, from the point of view of geology and environmental sciences, is presented and the confluence of Chemistry and the main Anthropocene topics is shown considering the future of our Planet. Several approaches to define the beginning of Anthropocene are discussed as well as the evidences that, from the point of view of chemistry, biology and environmental sciences, we are in a new epoch, different from Holocene. There is no doubt that mankind has modified the Planet in a dramatic extent, in some cases in an irreversible extent, and the Holocene concepts are not suitable to describe the new tendencies in the chemical and biological variables and the future of the earth system as a whole. The future depends on the approaches to manage humanity's relationship with the environment. The Planetary Boundaries concept defines a "safe operating space" for humanity with respect to the Earth system, and is based on a small number of sub-systems or processes, many of which exhibit abrupt change behavior when critical thresholds are crossed. Chemistry has a central role in the goal of identifying and maintaining a safe operating space in which humanity can pursue its further development and evolution.

Keywords: Anthropocene; Great Acceleration; Planetary Boundaries; global change; environmental chemistry.

Resumo

Nas últimas décadas, o homem tem se convertido em uma força geológica, competindo com as forças naturais, no impacto e modificação do sistema Terra. O termo Antropoceno foi proposto pelos cientistas Paul Crutzen e Eugene F. Stoemer, em 2000, para descrever esse novo tempo e enfatizar o papel preponderante do homem na geologia e na ecologia. Neste artigo é feita uma breve revisão da história do Antropoceno, desde o ponto de vista geológico e ambiental e mostrada a confluência da Química com a maioria dos assuntos centrais à discussão do Antropoceno, à luz do futuro de nosso Planeta. São discutidas as diferentes abordagens para identificar o início do Antropoceno e as evidências de que, desde o ponto de vista da química, da biologia e das ciências ambientais, estamos em um novo tempo, diferente do Holoceno. Não há dúvidas que o homem tem modificado o Planeta de uma forma inequívoca e, em alguns casos irreversível, e que os conceitos do Holoceno não podem mais ser utilizados para descrever as tendências das variáveis químicas e biológicas e o futuro do sistema Terra como um todo. O amanhã depende, em grande medida, das ações para otimizar a relação do homem com o meio ambiente. O conceito dos Limites Planetários define um "espaço seguro" para o desenvolvimento da humanidade em relação ao sistema Terra e está baseado em um pequeno número de sub-sistemas ou processos, muitos dos quais exibem uma mudança abrupta de comportamento quando certos umbrais são transpostos. A Química tem um papel central no objetivo de identificar e manter esse espaço seguro no qual a humanidade poderá se desenvolver e evoluir.

Palavras-chave: Antropoceno; Grande Aceleração; Limites Planetários; mudanças globais; química ambiental.

* Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Físico-Química. Instituto de Química, CEP 21941-909 Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

✉ gracielaig@gmail.com

DOI: [10.21577/1984-6835.20180111](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180111)

Antropoceno: Os Desafios de um Novo Mundo

Cleyton M. da Silva,^{a,b} Graciela Arbilla^{a,*}

^a Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Físico-Química, Instituto de Química, CEP 21941-909 Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

^b Universidade Veiga de Almeida, Campus Maracanã, CEP 20271-020, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

* gracielaiq@gmail.com

Recebido em 26 de março de 2018. Aceito para publicação em 27 de março de 2018

1. Introdução

2. Antropoceno

2.1. O conceito do Antropoceno

2.2. O início do Antropoceno. A visão geológica

2.3. A Grande Aceleração

2.4. As recomendações do Grupo de Trabalho do Antropoceno (AWG) em 2017

3. Que amanhã podemos esperar?

3.1. Os limites planetários

3.2. O Antropoceno e a Química no Brasil

4. Conclusões

1. Introdução

Onde se encontra o homem na história de 4,54 bilhões de anos da Terra? Até recentemente, a maioria dos cientistas consideravam que o aparecimento do *Homo sapiens* aconteceu há aproximadamente 200.000 anos. Contudo, em junho de 2017 foi publicado na revista *Nature* um artigo sugerindo, a partir de datação por termoluminescência de fósseis encontrados em Jebel Irhoud, Marrocos, que essa origem remonta a aproximadamente 315.000 anos.¹ Mesmo assim, considerando que a vida do planeta é de apenas um ano, o *Homo sapiens* apareceu sobre a Terra nos últimos minutos

do dia 31 de dezembro. A vida do homem pode, então, ter mudado o planeta?

Em 1979 a Agência Espacial dos Estados Unidos (NASA) iniciou o monitoramento das concentrações de ozônio na estratosfera, quando foi descoberta a diminuição dessas concentrações sobre a área do Polo Sul, na primavera, a partir do início da década de 1980.² O chamado “buraco na camada de ozônio” indica as regiões onde as concentrações de ozônio são menores que 220 DU (Unidades Dobson) e é, claramente, de origem antropogênica. Essa descoberta, assim como o aumento nas concentrações de CO₂, a valores maiores que 400 ppm (sendo que o valor na época pré-industrial era de 285 ppm),³ são apenas, nas palavras de Steffen et

al.⁴ a “ponta do iceberg” de uma mudança muito maior que envolve ciclos biogeoquímicos, como os do carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre, ciclos da água e extinção de espécies. Neste contexto, cresce a evidência do homem como uma força geológica, competindo com as forças naturais, no impacto e modificação do planeta.⁵⁻⁷

Surge assim o conceito de Antropoceno,⁶ que sugere essa modificação na relação entre a espécie humana e o meio ambiente: além das mudanças climáticas, novos materiais, como plásticos, concreto e alumínio, tem-se espalhado na superfície da Terra e nos oceanos, o uso de fertilizantes tem incrementado as concentrações de fósforo e nitrogênio, a mineração tem modificado e poluído o ambiente, e os testes nucleares têm deixado marcas nos sedimentos e no gelo. O Antropoceno (a “Época dos Humanos”) pode ser visto desde um ponto de vista apenas geológico ou, em uma forma mais ampla, como um conceito que envolve o meio ambiente, a química, a biologia, a cultura, a economia e as relações políticas e econômicas.

Em 2011 foi comemorado o Ano Internacional da Química, uma iniciativa da UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura) e da IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada). O evento, aprovado na Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) em 2009 teve o slogan “*Chemistry: our life, our future*” e o objetivo de celebrar as grandes conquistas da Química e sua enorme contribuição para o bem-estar da humanidade.⁸ No Brasil, o Ano Internacional da Química foi comemorado na 34^o Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química (SBQ) e através de numerosas iniciativas, para divulgação e ensino da Química e, também, para reflexão do papel da Química no desenvolvimento sustentável.⁹

Coincidentemente, neste mesmo ano de 2009, foi formado um grupo de trabalho com 38 acadêmicos, incluindo diferentes áreas, como geologia, química, biologia e história, por solicitação da Subcomissão de Estratigrafia do Quaternário (*Subcommission*

of Quaternary Stratigraphy, SQS) da Comissão Internacional de Estratigrafia (*International Commission of Stratigraphy, ICS*), para estudar as possíveis evidências geológicas de um novo tempo.¹⁰ Os resultados obtidos por esse grupo, chamado de Grupo de Trabalho do Antropoceno (*Anthropocene Working Group, AGW*), e divulgados até o momento, foram apresentados no 35^o Congresso Geológico Internacional, na África do Sul, em 2016,¹¹ sob a forma de numerosos artigos que serão discutidos ao longo desta revisão.

A discussão, no mundo, sobre o Antropoceno cresce cada vez mais, tanto na área das ciências naturais como das ciências humanas, e começa a ser abordada no Brasil.¹³ Já em 2018, a SBQ organiza a 41^o Reunião Anual com o tema “Construindo o amanhã”. Cabe, assim, a pergunta: Neste mundo em constante transformação, onde o homem tem se transformado em uma força geológica capaz de alterar o equilíbrio do planeta, qual o papel da Química e a responsabilidade dos químicos? O objetivo deste artigo de revisão é apresentar uma breve história do Antropoceno, desde o ponto de vista geológico e ambiental e mostrar a confluência da Química com a maioria dos assuntos centrais à discussão do Antropoceno à luz do futuro de nosso Planeta.

2. Antropoceno

2.1. O conceito do Antropoceno

O surgimento do conceito do Antropoceno tem sido amplamente discutido na literatura.^{4,7,14} O termo foi usado pela primeira vez pelo biólogo Eugene F. Stoemer na década de 1980, mas só foi formalizado em 2000, numa publicação conjunta com o Prêmio Nobel de Química, Paul Crutzen, na *Newsletter* do *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP) do mês de maio.⁶ Nessa comunicação, os autores propõem o uso do termo Antropoceno para a época geológica atual, para enfatizar o papel central do homem na geologia e ecologia, e o

início dessa época nos finais do século XVIII, que coincide com o aumento nas concentrações de CO₂ e CH₄, e, também, com a invenção da máquina a vapor, em 1784, por James Watt.⁶

Nesse mesmo número da *Newsletter* do IGBP, Will Steffen discutiu o metabolismo planetário à luz dos dados obtidos nos registros de gelo obtidos na base Vostok, na Antártica.¹⁵ A partir da análise de registros obtidos até 3.623 m de profundidade foi possível correlacionar a temperatura e as concentrações de CO₂ e CH₄ nos últimos 420.000 anos.¹⁶ Os resultados mostraram as variações cíclicas entre os períodos glaciais e interglaciais nos quais as concentrações de CO₂ mudaram entre 180-200 ppm, nos períodos glaciais, e 265-280 ppm nos períodos interglaciais. Steffen discute a autorregulação do sistema terrestre durante esses períodos e chama a atenção sobre o fato que o valor observado na época da publicação do artigo (365 ppm) estava fora do valor máximo observado num passado recente e, talvez, fora do intervalo onde o planeta pode evoluir em uma forma reproduzível e regulada através dos ciclos biogeoquímicos.¹⁵

Em 2002, Crutzen publicou um artigo sucinto, intitulado “*Geology of Mankind*” na revista *Nature*.¹⁷ Para Crutzen, o homem tem se convertido em uma poderosa força geológica e será uma força predominante no meio ambiente no futuro, fazendo necessário distinguir esta nova época com um termo que descreva apropriadamente esta “Idade dos Humanos” (“*Age of Humans*”). Crutzen, reconhecido mundialmente pelo Prêmio Nobel de Química (1995), junto a Mario F. Molina e F. Sherwood Rowland, pelo trabalho em química atmosférica, teve um papel importante na discussão sobre o papel do homem nas mudanças climáticas, especialmente no início do século XXI, quando ainda esse era um tema em início de debate.

Como destacado em diversas publicações o conceito da influência do homem sobre a Terra remonta ao século XVIII,^{4,10,14,17} e foi discutida, entre outros, pelo naturalista

Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon (1707-1788), os geólogos e paleontologistas Antonio Stoppani (1824-1891) e Alexei P. Pavlov (1854-1929), o geoquímico Vladimir Vernadsky (1863-1945) e o biólogo Hubert Markl (1938-2015). Contudo, a introdução do neologismo Antropoceno e seu conceito como uma mudança clara a partir da Revolução Industrial marcam uma diferença substancial com respeito às visões anteriores, nas quais a influência do homem no planeta era vista como parte da evolução da vida e não como uma perigosa ruptura no equilíbrio da Terra.^{18,19}

2.2. O início do Antropoceno. A visão geológica

A Comissão Internacional de Estratigrafia é o maior e mais antigo corpo científico da União Internacional de Ciências Geológicas (*International Union of Geological Sciences, IUGS*) e seu principal objetivo é definir as unidades da Escala de Tempo Geológico Internacional (*International Geologic Time Scale*): Eon, Era, Períodos, Épocas, Idades, que expressam a história geológica da Terra.²⁰ A idade da Terra é estimada em aproximadamente 4.600 Ma (milhões de anos).²⁰ O Eon atual (Fanerozoico) se iniciou há aproximadamente 450 Ma. Sua fronteira com o Eon anterior (Proterozoico) não está bem definida, mas a sua principal característica é o surgimento dos animais de concha e a maior abundância da vida. A terceira e mais recente Era do Eon Fanerozoico é a Era Cenozoica, iniciada aproximadamente 66 Ma, após a extinção dos dinossauros, sendo chamada informalmente de “Era dos mamíferos”.²⁰ Foi dividida em três períodos (Paleogeno, Neogeno e Quaternário). O Período atual (Quaternário), iniciado há 2,58 Ma, durante o qual a Terra passou por vários períodos de glaciações e é dividido em duas épocas: Pleistoceno e Holoceno.⁵ Este último sendo reconhecido como uma época em 2008.²¹⁻²³ As divisões da Era Cenozoica são ilustradas na Figura 1.

Éon	Era	Período	Época	Idade	Idade (Ma)	
Fanerozoico	Cenozoico	Quaternário	Holocênico		atualidade	
			Pleistocênico	Superior	0,0117	
				Médio	0,126	
				Calabriano	0,781	
				Gelasiano	1.806	
		Neogênico	Pliocênico	Piacenziano	2.588	
				Zancleano	3.600	
			Miocênico	Messiniano	5.333	
				Tortoniano	7.246	
				Serravalliano	11.62	
				Langhiano	13.82	
				Burdigaliano	15.97	
				Aquitano	20.44	
					23.03	
			Paleogênico	Oligocênico	Chattiano	28.1
					Rupeliano	33.9
				Eocênico	Priaboniano	38.0
					Bartoniano	41.3
Lutetiano	47.8					
Ypresiano	56.0					
Paleocênico	Thanetiano	59.2				
	Selandiano	61.6				
	Daniano	66.0				

Figura 1. Divisões dos últimos 66 Ma (Era Cenozoica, no Eon Fanerozoico). As cores indicadas na figura são as utilizadas na Tabela Cronoestratigráfica Internacional. Fonte: Tabela Cronoestratigráfica Internacional²⁰

É nesse contexto que aparece a proposta de um novo tempo, o Antropoceno e a discussão sobre seu início e sobre sua classificação como uma nova Época posterior ao Holoceno, uma subdivisão (Idade) do Holoceno ou diretamente uma Época após o Pleistoceno. Essa discussão tem sido abordada por diversos autores.^{5,20}

Para Crutzen e Stoemer, o início do Antropoceno corresponde com o início da

Revolução Industrial, especificamente com o desenvolvimento da máquina a vapor.^{6,17} Existem, porém, outras propostas, a maioria delas indicando para o período entre 1610 e 1964.²¹ Desde o ponto de vista geológico, o fim do Holoceno e o início do Antropoceno, ou seja, o fim de uma época geológica e o início de outra, requer que esse momento possa ser definido com precisão. Em geral, as divisões em eras, períodos e épocas dentro do Fanerozoico (Eon) foram realizadas através da

determinação do chamado “golden spike”, uma posição específica nos registros sedimentários que define uma base sincrônica, que seja igual no tempo em todos os lugares do planeta.^{14,22} Como discutido por Gale e Hoare,²² a natureza diacrônica do impacto das mudanças antrópicas no planeta e a proximidade dos eventos (numa escala geológica) tornam essa tarefa muito mais difícil que, por exemplo, a determinação do início do Holoceno.²³ Nesse caso, os registros de gelo coletados na Groenlândia, o NGRIP (*North Greenland Ice Core Project*), permitiram estabelecer o fim da última era glacial em 11.700 b2k (antes AD 2000) anos, com um erro de apenas 99 anos.²⁴

Ruddiman fez a proposta do início do Antropoceno com o desenvolvimento da agricultura (a chamada “*early-Anthropocene hypothesis*”) que levou a um aumento nas concentrações de CO₂ (aproximadamente a partir de 8.000 anos atrás) e de CH₄ (a partir de 5.000 anos atrás) e a modificação da paisagem, especialmente por desflorestamento.²⁵ Essa hipótese tem sido bastante discutida e não existem fortes evidências em seu favor, já que em uma escala global sincrônica, a influência do homem na litosfera, hidrosfera, atmosfera e criosfera, foi pequena no início e meio do Holoceno.²⁶

Em 2011, Certini e Scalenghe questionaram a escolha de marcadores atmosféricos para determinar o início do Antropoceno, e propuseram o uso de solos antropogênicos, ou seja, solos modificados pelo homem, indicando que o início do Antropoceno teria acontecido em aproximadamente 2.000 BP, onde BP significa “antes do presente” (em inglês *before present*) e é uma escala de tempo utilizada em geologia e arqueologia, que inicia em 1 de janeiro de 1950).²⁷ Essa proposta é semelhante à da utilização do início dos testes nucleares (1945) que deixaram radioatividade residual nos solos.²⁸

Essas e outras propostas têm sido analisadas pelo Grupo de Trabalho do Antropoceno e discutidas em diversos documentos e artigos científicos.^{29,30} A

proposta formal de modificação da Tabela Cronoestratigráfica Internacional é um processo complexo, que ainda não aconteceu. A comunidade estratigráfica iniciou a consideração dessa possibilidade em 2008, ante a discussão do assunto na literatura científica de diversas áreas e o uso informal do termo, e, no ano seguinte, foi formado o Grupo de Trabalho AWG.^{29,30} O Grupo inclui membros da ICS e cientistas de outras áreas das ciências naturais e humanas, mas seu objetivo principal é fazer uma proposta para determinar se o Antropoceno é um tempo geológico diferente do Holoceno e reunir evidências estratigráficas relevantes. Isso significa que é necessária a determinação de um marcador sincrônico global. Assim, a Comissão considerou que eventos anteriores à Revolução Industrial não implicariam em uma mudança clara na evolução da Terra. Mesmo assim, as evidências estratigráficas da Revolução Industrial estão principalmente relacionadas à Europa e América do Norte, ao longo de um século, posteriormente, foram estendidas à China, Índia e outros países em desenvolvimento. Assim, as evidências relacionadas à industrialização e urbanização, obtidas através do uso do carvão como marcador, são diacrônicas e com descontinuidades espaciais.

Surge, então, como candidato a marcador do início do Antropoceno um conjunto de parâmetros ambientais e socioeconômicos propostos por Steffen *et al.* e que foram chamados de a “Grande Aceleração”.^{31,32}

2.3. A Grande Aceleração

Em 2004, após mais de uma década de estudos, foi publicado, pelo IGBP, o livro “*Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*” e uma síntese dos principais resultados, disponível para *download*.^{31,33}

As principais conclusões desse trabalho foram:³¹

-Os processos biológicos interagem

fortemente com os processos químicos e físicos, de tal forma que desempenham um papel fundamental na manutenção do equilíbrio da Terra.

-As mudanças globais vão além dos câmbios climáticos e as atividades antropogênicas influenciam o sistema de igual ou maior forma que as forças naturais, levando a mudanças fora dos limites esperados para as variações naturais.

-Os efeitos estão inter-relacionados e as relações causas-efeitos não são lineares, extrapolando os níveis locais em que acontecem.

-A dinâmica da Terra está caracterizada por umbrais críticos e mudanças abruptas, de forma que as atividades humanas podem, inadvertidamente, causar consequências catastróficas para o sistema.

-A Terra, como sistema, está atualmente fora do intervalo de mudanças esperadas de forma natural (de acordo com o acontecido nos últimos 500.000 anos) e a magnitude e velocidade dessas mudanças não têm precedentes na sua história.

Essas conclusões refletem não só a importância do homem como uma nova força geológica, mas levam o problema além do campo da geologia, envolvendo a química, biologia, engenharias e, inclusive, as relações políticas e sociais.

Steffen *et al.*³¹ identificaram 12 tendências socioeconômicas como indicadoras do desenvolvimento da humanidade a partir de 1750, assim como 12 indicadores das condições biogeoquímicas do “sistema” Terra. Os gráficos, originalmente publicados para o período 1750-2000, mostram uma mudança drástica a partir de aproximadamente 1950. O termo “Grande Aceleração” foi utilizado pela primeira vez por um grupo de trabalho, na Conferência de Dahlem em 2005, liderado por William Steffen, e que incluía Paul Crutzen e John McNeill,⁷ e foi citado pela primeira vez em um artigo científico em 2007.³⁴ Esses

gráficos são considerados, hoje, um ícone do Antropoceno, e têm sido reproduzidos em diversos artigos científicos, livros, artigos de divulgação, conferências, museus e exposições e sites na internet.

Em um trabalho posterior,⁷ esses indicadores foram reformulados e atualizados para o período 1750-2010. Os indicadores socioeconômicos incluem indicadores de população global e urbana, crescimento econômico (investimentos e produto interno bruto), uso de energia primária e de água, consumo de fertilizantes, produção de papel, construção de represas, transporte, comunicação e turismo. Curiosamente, no trabalho original tinha sido utilizado o número de restaurantes McDonalds como indicador de globalização, sendo substituído pelo uso de energia primária para o período 1750-2010, por ser este um indicador central da dinâmica da sociedade contemporânea.⁷

Os 12 indicadores do sistema Terra, mostram as mudanças fundamentais na sua estrutura e funcionamento: composição da atmosfera (através das concentrações de CO₂, CH₄ e óxidos de nitrogênio), ozônio estratosférico, clima (através da temperatura), ciclos da água e do nitrogênio (acidificação dos oceanos, fluxos de nitrogênio para as regiões marinhas), ecossistemas marinhos e terrestres (desmatamento das florestas tropicais, ocupação de solos para a agricultura, pesca, criação de camarões e degradação da biosfera terrestre). Muitos desses indicadores estão relacionados, por exemplo, as mudanças climáticas representadas através dos registros de temperaturas, dependem das concentrações dos gases de efeito estufa (GEE), CO₂ e CH₄, e, por sua vez a acidificação dos oceanos é uma consequência do aumento nos níveis de CO₂. Esses indicadores, mostrados na Figura 2, têm se convertido em um ícone do Antropoceno e têm sido apresentados em diversos artigos, relatórios, websites e revistas de divulgação científica.

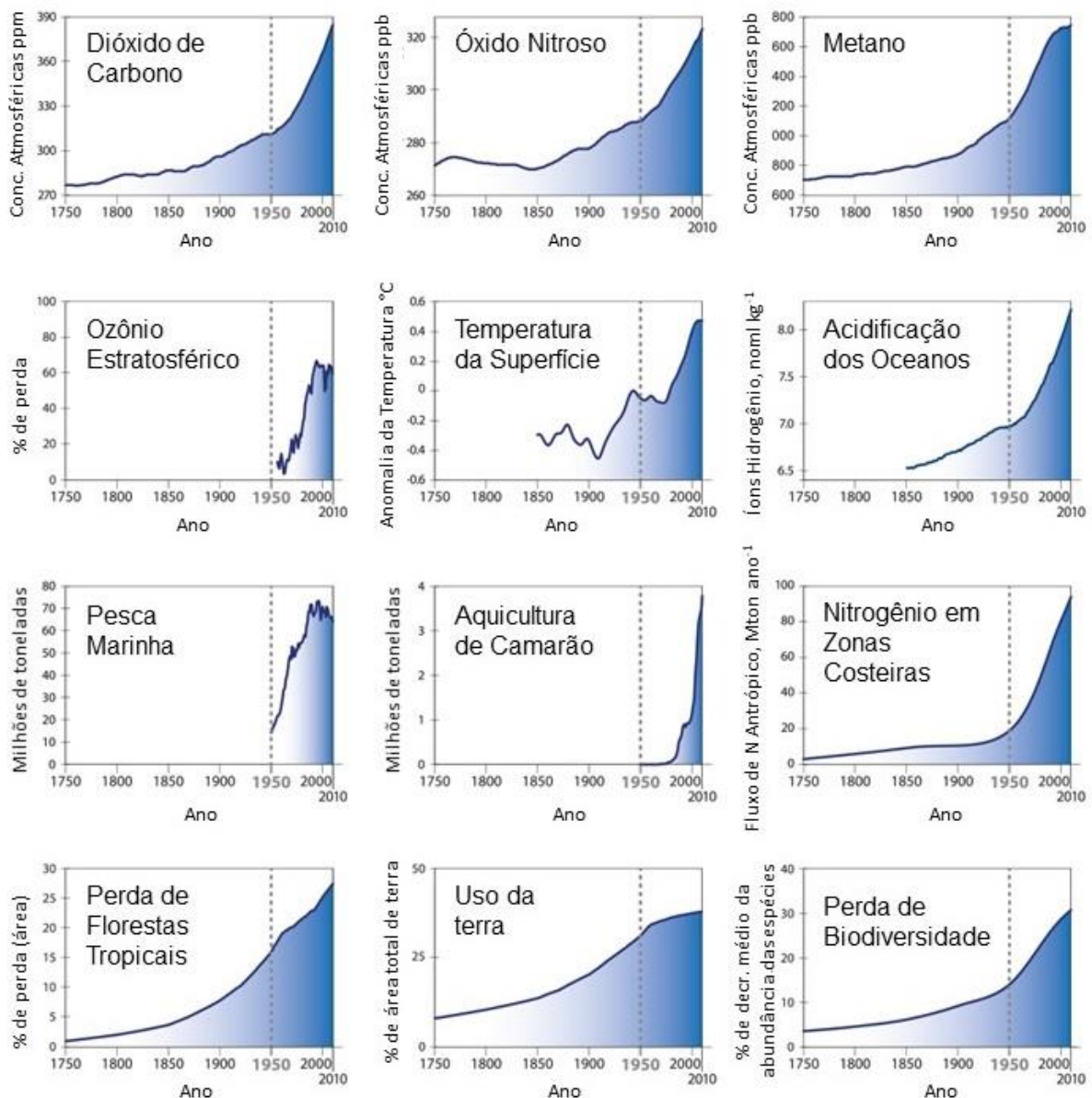


Figura 2. Indicadores da Grande Aceleração para o sistema Terra. Fonte: Adaptado de Steffen *et al.*^{7,31}

Nem todos os indicadores ambientais mostram a mesma tendência, em particular a pesca e a perda de solos para a agricultura tem mostrado uma diminuição na tendência de crescimento, devido, provavelmente ao próprio esgotamento dos recursos naturais. A diminuição da camada de ozônio representa, provavelmente, o exemplo mais claro da possibilidade de reversão, ou pelo menos deter a degradação do sistema, pelo menos desde o ponto de vista ambiental. A diminuição da camada de ozônio tem sido

objeto da atenção da comunidade científica e do público em geral ao longo das últimas décadas.^{35,36} Hoje é sabido que a principal causa da diminuição das concentrações do ozônio estratosférico, principalmente na região da Antártica durante a primavera, foi antropogênica através da produção de clorofluorocarbonos (CFCs) que, lançados na atmosfera levaram a um conjunto de complexas reações químicas, nesta região da atmosfera, potencializadas pelas condições climáticas.³⁶ A recuperação da camada de

ozônio é um processo lento devido a vários fatores como o tempo de residência dos CFCs na atmosfera e variabilidade climática de um ano para outro ou, ainda, eventos como erupções vulcânicas.^{37,38} Esse processo envolve várias etapas: uma diminuição no declínio, uma estabilização dos valores de declínio e, finalmente, uma lenta recuperação, claramente identificável e associada à diminuição das concentrações de halocarbonetos.³⁹ Em 2016, foi publicado, na revista *Science*,³⁹ um artigo reportando que, após considerar todos esses fatores (processos dinâmicos, temperatura e erupções vulcânicas) e os dados de satélites e balões, assim como medidas de aerossóis e resultados de modelos climáticos e químicos, pode-se concluir que a camada de ozônio tem iniciado um processo lento de recuperação. Esse fato é provavelmente um dos mais importantes exemplos do resultado positivo do esforço conjunto das ciências e, paralelamente, da comunidade internacional. O Protocolo de Montreal, que foi assinado em 16 de setembro de 1987 e entrou em vigor em 1 de janeiro de 1989, entrou para a história ao se tornar, em 2009, o primeiro tratado sobre meio ambiente a ser universalmente ratificado por 197 países. O tratado estabeleceu metas para a eliminação das substâncias destruidoras da camada de ozônio (ODS) e recebeu seis emendas e ajustes ao longo dos anos.⁴⁰ A remoção de 98% dos ODS, entre 1989 e 2014,⁴¹ e a recuperação da camada de ozônio verificada em 2016,³⁹ mostram dois aspectos importantes na discussão do Antropoceno: por um lado o sucesso do acordo e das ações conjuntas e, por outro lado, a lenta recuperação do sistema Terra a sua condição de equilíbrio.

2.4. As recomendações do Grupo de Trabalho do Antropoceno (AWG) em 2017

O AWG trabalhou desde 2009 de diversas formas, intercâmbio de informações, publicação de artigos e reuniões científicas patrocinadas pela *Geological Society of London* (Londres, 2011), o *Haus der Kulturen*

der Welt (Berlim, 2014), o *MacDonald Archaeological Institute* (Cambridge, UK, 2015), e o *Fridtjof Nansen Institute* (Oslo, 2016).³⁰

Foram identificados parâmetros sincrônicos para caracterizar geologicamente o Antropoceno, entre eles: aceleração das velocidades de erosão e sedimentação, perturbações em longa escala dos ciclos do carbono, nitrogênio, fósforo e outros elementos, aumento do nível dos oceanos e mudanças na biota. Algumas dessas mudanças são irreversíveis e deixarão sinais ao longo do tempo, por exemplo os chamados “tecnofósseis”,⁴² entre eles os plásticos, distribuídos em depósitos sedimentares terrestres e marinhos, como fragmentos macroscópicos e como micropartículas, sendo dispersos por processos físicos e biológicos, através da cadeia alimentar de animais e depositados através de diversos artefatos nos quais estão moldados (“tecnofosséis”) que serão preservados ao longo dos séculos.^{43,44} Um caso semelhante é o das partículas de carvão espalhadas em solos e sedimentos de lagos, como consequência do uso de carvão e outros combustíveis fósseis, e que são um marcador antrópico inequívoco,⁴⁵ e o aparecimento de plutônio 239 nos sedimentos como consequências dos testes com armas nucleares.^{46,47}

O AWG identificou a Grande Aceleração como um evento sincrônico que iria proporcionar os melhores marcadores para identificar o fim do Holoceno e o início do Antropoceno. É interessante observar que, como já mencionado, a influência do homem sobre a Terra foi iniciada muito antes, tendo provavelmente uma participação na extinção da megafauna em todos os continentes exceto África, no Pleistoceno Tardio,⁴⁸ e a introdução da agricultura.²⁵ Contudo, esses eventos foram diacrônicos e as mudanças variaram muito de um continente para outro. Assim, desde o ponto de vista geológico a “Grande Aceleração” oferece marcadores sincrônicos e, desde o ponto de vista ambiental e biogeoquímico, representa um ponto claro de mudança no equilíbrio do Planeta.

As principais conclusões e recomendações

apresentadas pelo AWG no 35º Congresso Geológico Internacional, na África do Sul, em 2016,¹¹ e compiladas no artigo publicado na revista *Anthropocene*, em 2017,³⁰ são resumidas a seguir:

A ampla maioria dos membros do AWG considera que existem evidências estratigráficas para determinar o início do Antropoceno (34 membros votaram a favor, um membro votou contra e um membro se absteve), e sugerem esse início aproximadamente nos anos 1950, e que este deve ser formalizado (30 cientistas foram a favor).

Entre as opções, Época (posterior ao Holoceno) ou Idade (como uma subdivisão do Holoceno), prevaleceu a opinião de considerar o Antropoceno uma Época, posterior ao Holoceno, dentro do Período Quaternário e a Era Cenozoica (Figura 1).

A ampla maioria considerou, também, que seu início deve ser determinado por um indicador estratigráfico (*Global Boundary Stratotype Section and Point*, GSSP), o chamado “*golden spike*”, porém a escolha desse marcador é, como esperado, controversa. Entre as opções consideradas (plásticos, partículas de fuligem, concentrações de CO₂, CH₄, mudanças isotópicas de carbono e oxigênio, radioisótopos em geral, decaimento radioativo de plutônio, concentração de nitratos e registros da extinção de espécies) a maioria dos cientistas recomendaram a utilização de plutônio 239.

A partir dessa análise, será necessário escolher os pontos onde serão realizadas as análises (GSSP) e as análises auxiliares para confirmação em outros pontos do Planeta. Esse processo será demorado e o AWG espera concluí-lo em dois ou três anos para posteriormente iniciar o processo de discussão na SQC e, se aprovado, na ICS. Desde o ponto de vista geológico, essa formalidade é importante e necessária já que influencia nas atividades de toda a comunidade estratigráfica e paleontológica: a Tabela Cronoestratigráfica Internacional é,

para os geólogos, como a Tabela Periódica dos Elementos é para os Químicos.

Contudo, é necessário mencionar que apesar das evidências e dos documentos apresentados no 35º Congresso Geológico Internacional e na literatura, existem ainda cientistas, nas áreas de ciências naturais, que consideram que não existem ainda evidências suficientes para propor formalmente o Antropoceno.^{12,49,50} Esses cientistas reconhecem as mudanças ambientais acontecidas como consequência da Revolução Industrial e da Grande Aceleração, mas destacam a importância dos eventos anteriores, já mencionados nesta revisão, como a extinção massiva dos mamíferos nas Américas, erosão do solo e aumento nas emissões de CH₄ e CO₂ que podem ser atribuídas ao desenvolvimento da agricultura e domesticação dos animais.⁴⁹ Destacam ainda que as mudanças futuras como consequência, por exemplo, da acidificação dos oceanos podem ser muito maiores, porém imprevisíveis. Assim, surge a ideia de tratar o Antropoceno apenas como um novo tempo sem a necessidade de uma formalização desde o ponto de vista geológico. Nas palavras de Ruddiman *et al.*, “usar o termo informalmente (com “a” minúscula)”.⁴⁹

Esse ponto de vista está de alguma forma relacionado à discussão de Lewis e Maslin que apresentam diferentes alternativas para o início do Antropoceno,²¹ desde a extinção da megafauna (50.000 a 100.000 BP) ou o início da agricultura (aproximadamente 11.000 BP) até a 1945-1950 com os ensaios nucleares e a Grande Aceleração. Nesse contexto os autores mostram duas opções: o Antropoceno como uma nova Época (após o Holoceno) ou como uma nova Época diretamente após o Pleistoceno. Considerando ainda que qualquer escolha do início do Antropoceno significaria que o Holoceno seria uma Época com uma duração semelhante as divisões (Idades) do Pleistoceno e que o *Homo Sapiens* é uma espécie do Holoceno, Lewis e Maslin propõem que o Antropoceno seja uma Época diretamente após o Pleistoceno.²¹ De alguma forma, essa opinião significa considerar o

Holoceno e o Antropoceno como uma mesma Época caracterizada pela influência do homem sobre o Planeta.

Independentemente dos resultados dessas discussões, desde o ponto de vista da química, a biologia e as ciências ambientais, é claro que o homem tem modificado o Planeta de uma forma inequívoca e, em alguns casos irreversível, e que os conceitos do Holoceno não podem mais ser utilizados para descrever as tendências das variáveis químicas e biológicas e o futuro do sistema Terra como um todo. Fica clara, também, a responsabilidade como cientistas e educadores e, especialmente, como químicos de procurar soluções e alternativas. A pergunta “Que amanhã é possível esperar?”, é cada vez mais relevante e deverá se tornar parte dos projetos e pesquisas.

3. Que amanhã podemos esperar?

Em uma escala planetária, a inteligência do homem é algo novo e poderoso. Através da agricultura e a domesticação dos animais, a humanidade reformulou o ambiente e passou de uma sociedade nômade para uma sociedade sedentária. A Revolução Industrial e a mecanização da agricultura levaram ao aumento populacional, ao crescimento das megacidades e à modificação da paisagem. Mas, muito mais do que isso, através da tecnologia e a ciência, foram modificados os ciclos bioquímicos. A atividade do homem teve profundos efeitos químicos e biológicos a nível global.

Quando, em 2011, *The Economist* publica o, já famoso, artigo “*Welcome to the Anthropocene*”, na verdade não dava as boas-vindas para um mundo melhor, mas advertia que o homem tinha mudado o Planeta de tal forma que agora seria necessário repensar nossa forma de interagir com ele.⁵¹

Após mais de uma década do século XXI, muitas das tendências da Grande Aceleração continuaram, mas aconteceram ainda outras mudanças. A Grande Aceleração do período

1945-2000 foi devida, principalmente, ao progresso dos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), principalmente Europa, América do Norte e Japão.⁴ Contudo, a partir do século XXI, as emissões de CO₂ de países como China e Índia têm crescido mais rapidamente que as dos países da OECD. As emissões globais de CO₂ pelo uso de combustíveis fósseis e atividades industriais foram de $36,2 \pm 2$ GtCO₂ em 2016 (62% a mais que em 1990) e aproximadamente $36,8 \pm 2$ GtCO₂ em 2017 (valor projetado), segundo o relatório do *Global Carbon Project*.⁵² Das emissões em 2016, 59% foram devidas a apenas à China (28%), aos Estados Unidos (15%), à União Europeia (10%) e à Índia (7%), sendo que as emissões da China e da Índia, aumentaram mais de 10 vezes entre 1960 e 2016, especialmente a partir do ano 2000, enquanto que as dos Estados Unidos e Europa diminuíram levemente a partir de 2010.⁵²

Da mesma forma, o declínio em biodiversidade continua,⁴ apesar de alguns esforços locais para aumentar as áreas protegidas e das ações internacionais como a Convenção sobre Diversidade Biológica, assinada no Rio de Janeiro em 05 de junho de 1992.⁵³

Alguns autores consideram que o Antropoceno está entrando em um “terceiro estágio” (o primeiro seria a partir da Revolução Industrial, 1800-1945, e o segundo com a Grande Aceleração, 1945-2015).³⁴ A ideia é mostrada na Figura 3. Nesse novo estágio se iniciaria o reconhecimento de que as atividades do homem realmente estão afetando o funcionamento da Terra como um todo, em oposição às ideias de que esses efeitos são em escala local ou regional, o que levaria a tomada de decisões em diferentes esferas. Esse reconhecimento seria a consequência do rápido avanço científico, especialmente interdisciplinar, da maior difusão e globalização do conhecimento em todos os níveis, do surgimento de ações de organizações não-governamentais e da maior participação ou influência da sociedade civil na tomada de decisões.³⁴

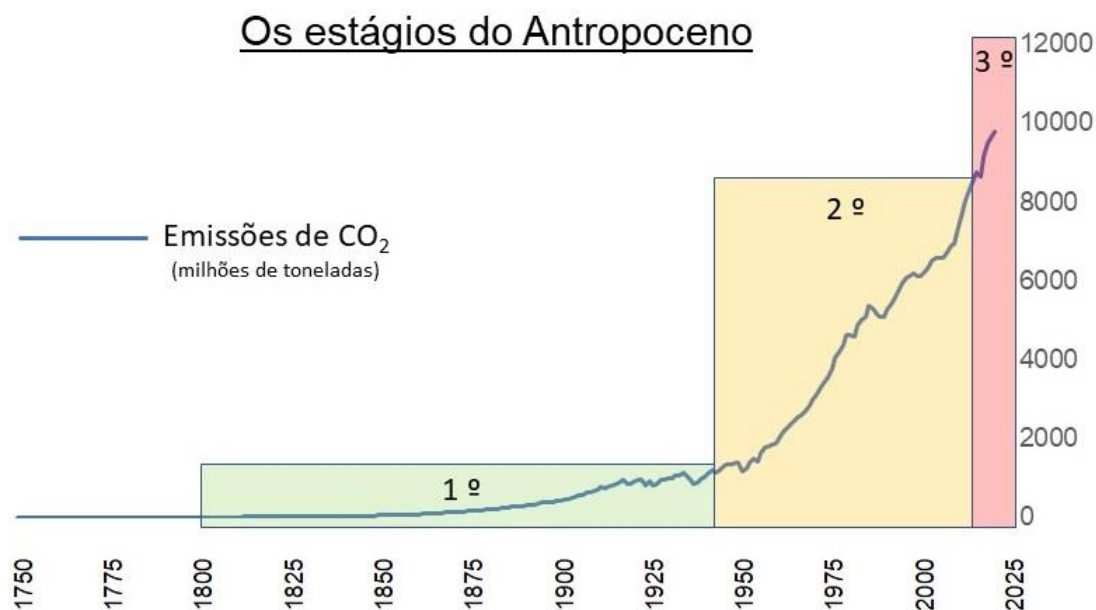


Figura 3. Os estágios do Antropoceno, segundo a proposta de Steffen et al.³⁴ As emissões de CO₂ são valores disponíveis na literatura⁵²

Neste contexto, uma das abordagens mais promissoras é a dos Limites Planetários introduzida por Rockstrom *et al.*⁵⁴ Essa abordagem reconhece os riscos associados à manipulação deliberada do sistema terrestre, através de outras soluções como a geo-engenharia, dada à complexidade do sistema e ao desconhecimento de possíveis mudanças abruptas e irreversíveis não previstas.⁵⁵ Alternativamente, propõe uma alternativa com o objetivo de manter a Terra dentro dos parâmetros de equilíbrio do Holoceno.⁵⁴

3.1. Os limites planetários

O conceito dos Limites Planetários (LP) foi publicado em 2009,^{56,57} e sua ideia principal é definir um “espaço operacional seguro” (*safe operating space*) para desenvolvimento da humanidade com respeito ao funcionamento da Terra. “Espaço seguro” está referido à variação de uma série de processos fundamentais para o sistema terrestre, que se transgredidos poderiam levar a mudanças globais catastróficas, dentro do atual conhecimento científico sobre o

funcionamento do Planeta. Originalmente foram propostos nove processos: mudanças climáticas, acidificação dos oceanos, depleção da camada de ozônio estratosférico, ciclos globais de fósforo e nitrogênio, aerossóis atmosféricos, uso de água potável, mudanças no uso dos solos, perda da biodiversidade e poluição química.⁵⁵ Em uma revisão posterior,⁵⁸ esses limites foram considerados como: mudanças climáticas, acidificação dos oceanos, depleção da camada de ozônio estratosférico, fluxos biogeoquímicos (fósforo e nitrogênio), aerossóis atmosféricos, uso de água potável, mudanças no uso dos solos, integridade da biosfera e outros parâmetros (a serem ainda determinados). Os dois LP principais são, segundo essa proposta, as mudanças climáticas e a integridade da biosfera.⁵⁸ Desde sua publicação, essa ideia chamou a atenção da ciência,⁴ especialmente das ciências ambientais, biologia e química,⁵⁹⁻⁶² e, também, de outros setores (economia, governos e relações internacionais) como uma forma de desenvolvimento sustentável.^{13,63}

Da forma que esses limites foram estabelecidos, não são um ponto umbral ou valor crítico a partir do qual podem ser

observadas mudanças irreversíveis. O limite é um valor da variável utilizada como variável de controle que está a uma distância considerada “segura” com respeito ao valor crítico. Por exemplo, para o limite mudança climática, para o qual é utilizada a concentração de CO₂ como variável de controle, a concentração limite foi considerada de 350 ppm, e o intervalo de incerteza entre 350 e 550 ppm. Isso significa que os valores 400,0 e 403,3 ppm, divulgados para 2015 e 2016, respectivamente,⁶⁴ se encontram na região de incerteza. Qual o significado dessa região de incerteza? Por um lado, ela representa a incerteza inerente a determinar um valor preciso de concentração de CO₂ que signifique um risco real para a manutenção da temperatura e o clima do planeta. Por outro lado, considera o tempo necessário para a sociedade tomar uma iniciativa de controle e a inércia do sistema Terra para responder a essa iniciativa. O valor de 403,3 ppm é 145% maior que o valor estimado para a época pré-industrial (278 ppm) e tem aumentado 2,21 ppm ano⁻¹ nos últimos 10 anos.⁶⁴ A incerteza nos efeitos dessas concentrações, levou inclusive à proposta de reduzir o intervalo para 350-450 ppm.⁵⁸

Diversos autores têm colaborado com novas discussões especialmente nos aspectos da biodiversidade e dos fluxos biogeoquímicos de fosforo e nitrogênio.⁶⁰⁻⁶² Porém, o conceito dos LP tem sido criticado por alguns autores. Em 2018, Montoya *et al.* publicaram um artigo na revista *Trends in Ecology & Evolution* contestando a ideia de um “espaço operacional seguro” por considera-la vaga e sujeita a interpretações errôneas na tomada de decisões, principalmente pela interconectividade dos processos ecológicos.⁶⁵ Rocktröm *et al.* responderam essas críticas considerando que o conceito de LP não tinha sido compreendido pelos autores na sua devida dimensão.⁶⁶

Na Tabela 1 são apresentados os nove LP, suas variáveis de controle, o valor limite dessas variáveis, o intervalo de incerteza e o atual valor dessas variáveis. Os dados informados para os valores atuais são aproximados e foram estimados e reportados

por Steffen *et al.*,⁵⁸ exceto para a concentração de CO₂, para a qual existem valores mais recentes disponíveis na literatura.³

Na Figura 4 é mostrada uma versão da ilustração clássica de Steffen *et al.*⁵⁸ disponível em diferentes publicações e sites de internet (inclusive para *download* livre).⁶⁷

Tabela 1. Os Limites Planetários: Processos escolhidos como os nove LP, variáveis de controle, valores limite para as variáveis e intervalo de incerteza (entre parêntesis) e valor atual da variável de controle.

Processo do sistema terrestre	Variável de controle	Limites planetários (intervalo de incerteza)	Valor atual da variável de controle
Mudança climática	Concentração atmosférica de CO ₂ (ppm) e energia incidente no topo da atmosfera (W m ⁻²)	350 ppm (350-450 ppm) +1,0 W m ⁻² (+1,0-1,5 W m ⁻²)	403,3 ppm (em 2016) 2,3 W m ⁻² (+1,1-3,3 W m ⁻²)
Mudança na integridade da biosfera (*)	Diversidade genética: velocidade de extinção (**) Diversidade funcional: Índice de biodiversidade intacto (BII) (**)	Genética: <10 E/MSY (10-100 E/MSY) E/MSY = extinções por 1 milhão de espécies ano ⁻¹ Funcional: Manutenção de BII em 90% (90-93%), considerando os biomas/grandes escalas regionais, ecossistemas marinhos ou grupos funcionais	100-1000 E/MSY Funcional: 84% em África do Sul
Acidificação dos oceanos	Concentração de íons carbonato, valor médio do estado de saturação com respeito a aragonita (Ω _{arag})	≥80% do valor pré-industrial (≥80%-≥70%)	Aproximadamente 84%
Depleção da camada de ozônio	Concentração de O ₃ estratosférico, DU	Redução <5% do valor pré-industrial de 290 DU (5%-10%)	Apenas transgredido na Antártica na primavera (aproximadamente 200 DU)
Fluxos biogeoquímicos (ciclos do P e N)	Ciclo do P: Global: fluxos de P para os oceanos Regional: fluxos de P para os solos degradados Ciclo do N:	Ciclo do P: Global: 11 Tg P ano ⁻¹ (11-100 Tg P ano ⁻¹) Regional: 6,2 Tg P ano ⁻¹ (6,2-11,2 Tg P ano ⁻¹) Ciclo do N:	Ciclo do P: Global: aproximadamente 22 Tg P ano ⁻¹ Regional: aproximadamente 14 Tg P ano ⁻¹ Ciclo do N: aproximadamente 150 Tg N ano ⁻¹

Mudanças no uso dos solos	Global: Fixação industrial e biológica intencional de N	Global: 62 Tg N ano ⁻¹ (62-82 Tg P ano ⁻¹)	Global: 62%
	Global: áreas florestadas com respeito ao original (em %)	Global: 75% (75-45%)	
Uso da água	Biomass: áreas florestadas com respeito ao potencial original (em %)	Biomass: Tropical: 85% (85-60%) Temperado: 50% (50-30%) Boreal: 85% (85-60%)	Biomass: Grandes diferenças regionais: áreas de África e Ásia (florestas tropicais e temperadas) ultrapassaram o intervalo de incerteza
	Global: Máxima quantidade de água consumida (km ³ ano ⁻¹)	Global: 4000 km ³ ano ⁻¹ (****)	Aproximadamente 2600 km ³ ano ⁻¹
Aerossóis atmosféricos	Global: Variação regional da profundidade ótica dos aerossóis (AOD) Regional: Variação sazonal da AOD	Regional: AOD sobre a Índia de 0,25 (0,25-0,50)	0,3 AOD sobre a região da Sul da Ásia
Introdução de um novo LP em substituição da poluição química	Ainda não decidido		

Fonte: Tabela adaptada de Steffen *et al.*⁵⁸

Notas: As cores na última coluna indicam: limite não transgredido (verde), variável no intervalo de incerteza (amarelo), fora do intervalo de incerteza (laranja); (*) esse LP substituiu a velocidade de perda de biodiversidade; (**) variáveis de controle provisórias até a determinação de outras que permitam uma medição mais adequada; BII indica as mudanças nas populações devido ao impacto humano através de um conjunto de grupos funcionais (grupos de espécies que realizam funções similares), para um dado bioma ou ecossistema, com respeito ao nível pré-industrial; (***) esse LP substituiu os ciclos de P e N; (****) são necessários mais estudos sobre este LP (os dados disponíveis são de um estudo de caso), não foi marcada nenhuma cor devido à falta de dados.

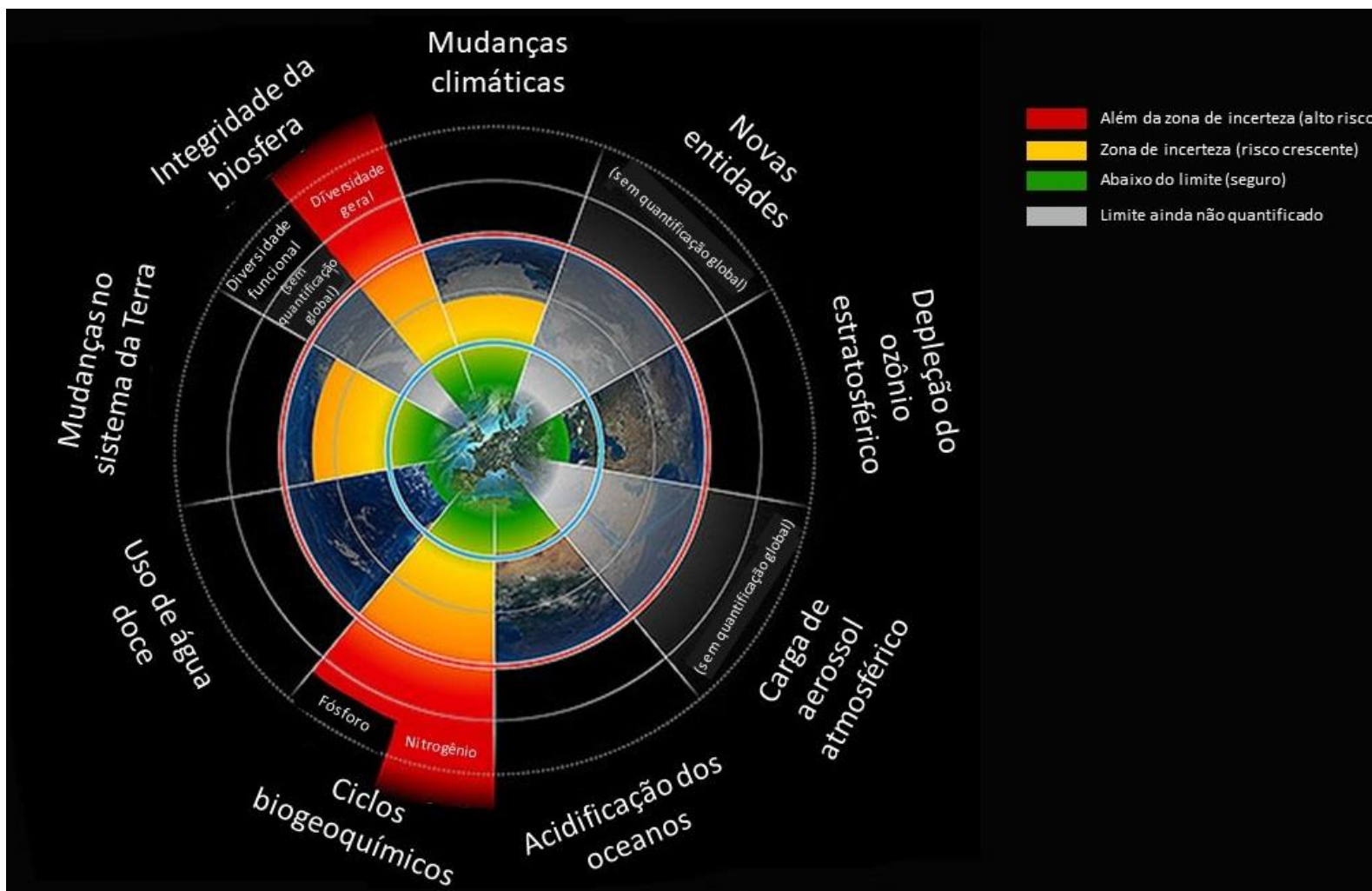


Figura 4. Limites Planetários na interpretação de Steffen *et al.*⁵⁸ Fonte: Adaptado de F. Pharand-Deschênes /GloBaia. Disponível em inglês (livre para download) em: <http://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>.⁶⁷

Os LP podem ser considerados em escala regional (bacias oceânicas, biomas, fontes de emissão ou sumidouros) ou em escala global (o sistema terrestre como um todo). As mudanças climáticas e a acidificação dos oceanos são processos globais e para os quais é possível definir uma variável de controle nessa escala. Para ambos os processos existem amplas evidências científicas, porém existem ainda discussões sobre os valores dos intervalos estabelecidos por conta das incertezas na resposta biogeoquímica do sistema às mudanças.^{58,68,69} A diminuição da camada de ozônio é um processo global, porém com consequências mais intensas para apenas para uma região específica do Planeta.³⁵⁻³⁷ As evidências científicas são bem estabelecidas e os limites estabelecidos são claros e respeitados pela comunidade internacional tanto desde o ponto de vista científico como dos acordos que foram feitos.^{40,41}

Nos outros processos as componentes regionais ou níveis sub-globais são predominantes.⁵⁸ As mudanças na integridade da biosfera acontecem ao nível dos biomas terrestres, grandes ecossistemas marinhos ou de rios e lagos. As mudanças nos fluxos de nitrogênio e fósforo estão vinculadas a grandes áreas de agricultura. Da mesma forma, o uso da água acontece em um nível sub-global e afeta, inicialmente, as grandes bacias de água doce, e a emissão de aerossóis e formação de aerossóis secundários tem relação com o uso de combustíveis fósseis.

As mudanças no uso dos solos com maior impacto estão relacionadas ao desmatamento, principalmente das florestas tropicais que influencia a evapotranspiração ao serem substituídas por áreas não florestadas, e as florestas boreais que influenciam o albedo terrestre e os fluxos de energia.⁷⁰

A nível global, as áreas florestadas passaram de 59 para 40 milhões de km² associadas ao crescimento populacional, a demanda do uso da terra para agricultura e pastagens, a exploração madeireira descontrolada e a mineração.⁷¹ Historicamente o desmatamento foi iniciado

no Oriente Médio e na Europa. Com os processos de colonização, a exploração e desmatamento dos solos foi acelerada em outras áreas. Por exemplo, na América do Norte o desflorestamento em grande escala foi iniciado com a chegada dos europeus, enquanto que na América Central e do Sul se estima que as florestas foram reduzidas em até 70% nos séculos XVIII e XIX. No período 2000-2015 o maior desmatamento aconteceu nos países ainda não desenvolvidos (*low-income countries*, ou seja, países com Produto Nacional Bruto anual *per capita* menor que US\$1.005), sendo de aproximadamente 10% no continente Africano e 8,7% na América do Sul.⁷¹

Contudo, se os limites estabelecidos para esses processos, para os quais os LP são mais adequados a nível regional, são ultrapassados é de se esperar consequências ao nível global. Da mesma forma, os LP foram estabelecidos em forma individual, mas interagem entre eles, existindo evidências que a Terra se comporta com um sistema integrado complexo.⁷² Anderies *et al.*,⁷² desenvolveram um modelo matemático para simular um caso típico e analisar as interações do uso do solo, mudança climática e acidificação dos oceanos. Os resultados confirmaram que os LP não podem ser considerados como um conjunto de limites individuais estáticos, porque eles interagem de forma fluída, dinâmica e não linear. Isso, reforça também a necessidade de estabelecer intervalos de incerteza e de revisar constantemente esses valores à luz dos novos conhecimentos.

A discussão dos LP, mesmo controversa,²⁸ mostra que o Antropoceno é muito mais que uma proposta geológica. O Antropoceno tem se convertido em um desafio para as ciências naturais, a tecnologia, a antropologia, a história e as relações sociais, políticas e econômicas.^{12-14,18,73-77} O mundo atual é um novo mundo, claramente diferente da Terra do Holoceno. O Antropoceno, independentemente de sua formalização como época geológica, representa uma nova fase na história do Homem e na história da Terra, onde as forças humanas e as forças

naturais se entrelaçam e uma determina o destino da outra.

O Antropoceno tem, também implicações sociais já que a discussão ultrapassou os limites das ciências para chegar ao público, aos formadores de opinião, aos líderes políticos e as organizações privadas. Nas palavras de Trischler,¹⁴ o Antropoceno tem se convertido em um conceito cultural, dissolvendo os limites entre ciências naturais e ciências humanas, entre a comunidade científica e a sociedade. Artigos sobre o tema têm sido publicados em revistas e jornais do mundo, revistas de divulgação científica, inclusive no Brasil,⁷⁸ *websites* educacionais e

de divulgação científica,⁷⁹ exposições e museus abordam o tema em diversos contextos. O *National Fossil Hall* do *National Museum of Natural History* em Washington, está reformulando suas exposições e irá reabrir, em 2019, com um espaço dedicado à interação entre a vida, os ecossistemas e o meio ambiente, com o objetivo de mostrar ao público o papel do homem no Planeta.⁸⁰ No Rio de Janeiro, o Museu do Amanhã (Figura 5) apresenta na sua Exposição Principal o espaço Antropoceno, com seis totens, de dez metros de altura, e conteúdo audiovisual sobre como o homem modificou o planeta e sobre mudanças climáticas globais.⁸¹



Figura 5. a) Museu do Amanhã na cidade de Rio de Janeiro. b) *Hall* de entrada do Museu com o globo iluminado e dados da Terra. c) Exposição principal: Antropoceno

Finalmente, o tema chega às salas de aula de ensino médio e superior, e oferece uma oportunidade ímpar de educar e transformar aos jovens. Em 2014, foi publicado um artigo na revista *Journal of Chemical Education*,⁸² ilustrando como os temas relacionados aos Limites Planetários poderiam ser abordados

na sala de aula de Química. Alguns exemplos são mostrados na Tabela 2.

A comunidade científica brasileira e, em particular, a comunidade química tem iniciado essa participação de diversas formas, como será discutido no próximo item.

Tabela 2. Exemplo de conceitos químicos relacionados aos Limites Planetários

Limite Planetário	Conceitos químicos
Mudança climática	Interação eletromagnética da radiação com a matéria, espectroscopia infravermelha, termoquímica, aerossóis, isótopos, estado da matéria, reações de combustão
Acidificação dos oceanos	Química ácido-base, equilíbrio, solubilidade, estequiometria, especiação química
Depleção da camada de ozônio	Fotoquímica, cinética química, termoquímica, catálise, espectroscopia ultravioleta
Fluxos de nitrogênio e fósforo	Especiação química, estequiometria, solubilidade e precipitação, equilíbrio químico, estados da matéria
Aerossóis	Estados da matéria e equilíbrio de fases, termoquímica, química ácido-base, cinética química
Uso da água	Equilíbrio químico, reações iônicas, solubilidade e precipitação, estados da matéria

Nota: Tabela adaptada de Mahaffy.⁸²

3.2. O Antropoceno e a Química no Brasil

A Química permeia grande parte dos temas relacionados ao Antropoceno, especialmente quando olhado desde o ponto de vista dos parâmetros que levaram à Grande Aceleração e do conceito dos Limites Planetários. As mudanças climáticas e a integridade da biosfera estão inter-relacionadas, interagem e influenciam os outros Limites Planetários e dependem de processos químicos e físico-químicos. As mudanças climáticas, dependem fundamentalmente das concentrações atmosféricas dos GEE e a integridade da biosfera depende dramaticamente dos ciclos da água, do carbono, fósforo e nitrogênio.^{83,58}

Assim, muito além de oferecer as técnicas analíticas para as determinações estratigráficas,⁸⁴ a química está, junto à biologia, no centro dos grandes temas do Antropoceno: composição da troposfera e dos solos, aerossóis secundários, ozônio estratosférico, ciclos da água, do nitrogênio e do fósforo, novos materiais e processos, fertilizantes, agrotóxicos e medicamentos, biocombustíveis, purificação e reciclagem da água etc.

A procura dos termos “Antropoceno” e “Grande Aceleração” nas publicações de revistas brasileiras de Química, leva a poucos artigos,^{83,85-87} contudo, os temas relacionados têm sido abordados pela Química no Brasil, nas últimas décadas. Em 2012, a revista Química Nova publicou o artigo “Química sem fronteiras”, redigido pelos ex-Presidentes da SBQ, Angelo C. Pinto, César Zucco, Fernando Galembeck, Jailson B. de Andrade e Paulo C. Vieira.⁸⁶ Nesse artigo é feita uma reflexão e discussão sobre os temas centrais e transversais que permitirão ao país contribuir para o futuro próspero, seguro e melhor. Entre outros, os autores destacam os temas educação, vida (incluindo fármacos e medicamentos), matérias primas e materiais (incluindo nanociência e nanomateriais), biodiversidade, energia, água, alimentos e ambiente, inovação e indústria química.

Em 2013, como parte das atividades do Fórum Mundial de Ciência que aconteceu no Rio de Janeiro, nos dias 25 e 26 de novembro de 2013, com o tema “Ciência para o Desenvolvimento Global”, a SBQ publicou um número especial de Química Nova.⁸⁸ Nesse número especialistas apresentaram o estado da arte de assuntos de importância para o desenvolvimento brasileiro e para a ciência

em geral, vários deles relacionados diretamente ao que hoje poderíamos chamar a Química do Antropoceno.⁸⁹⁻⁹²

A influência das atividades antrópicas sobre o planeta e o conceito Antropoceno foram, também, abordados na Tese de Doutorado de Silva, defendida em 2016.⁹³ Muitos outros trabalhos relacionados à Química do Antropoceno têm sido recentemente publicados por pesquisadores brasileiros. Os LP, e especialmente as mudanças climáticas, acidificação dos oceanos, depleção da camada de ozônio, aerossóis, e ciclos de nitrogênio e fósforo abrem múltiplas opções.

O Brasil, que é o maior país de América Latina tanto quanto à população quanto à superfície, é o quinto emissor do mundo de GEE, representando 5% do total de emissões mundiais. Segundo o relatório do Observatório do Clima, as emissões brutas de GEE no Brasil aumentaram 14%, passando de 1,62 Gt CO_{2eq} para 1,85 Gt CO_{2eq}.⁹⁴ O CO₂, que é o principal GEE e a variável de controle nas mudanças climáticas, representa 69% das emissões brutas e pode ser atribuído principalmente à queima de combustíveis fósseis e às mudanças de uso da terra. As emissões devidas às atividades econômicas têm apresentado um crescimento contínuo desde 1970 através do uso da energia, agropecuária, processos industriais e despejo de resíduos. Já as emissões relacionadas ao uso do solo apresentam oscilações ao longo do tempo, com máximas em períodos anteriores a 2004, já que estão fortemente vinculadas ao desmatamento, principalmente na Amazônia.⁹⁵ Dessa forma, as emissões de CO₂ estão fortemente vinculadas ao uso de combustíveis e à manutenção das áreas verdes. Em um trabalho recente,⁸³ foram determinadas as concentrações dos três principais GEE (CO₂, CH₄ e N₂O) nas capitais Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro, localizadas na Mata Atlântica, Belém localizada na Amazônia e Brasília na região do Cerrado. Os resultados mostraram que as concentrações são semelhantes às encontradas em outras cidades do mundo e

não apresentaram diferenças importantes dentro de uma mesma cidade ao se comparar a área verde com a área livre de cobertura vegetal. Contudo, para a cidade do Rio de Janeiro as concentrações de CO₂ foram 10 a 15% menores, tanto no inverno quanto no verão, que nas outras cidades, sugerindo a importância das áreas compactas de florestas, especialmente de floresta secundária e outras áreas de reflorestamento recente, no processo de sequestro de carbono.

Trabalhos na área de mudanças climáticas foram realizados na Antártida e na Amazônia em colaborações interdisciplinares com a física, biofísica e glaciologia.

Estudos na Antártica e nos Andes tem permitido analisar o impacto das mudanças climáticas nos gelos polares, no nível do mar e na circulação atmosférica e marinha,^{96,97} assim como marcadores antrópicos nos gelos resultantes das atividades nas estações de pesquisa e do transporte de partículas por correntes marítimas, em grande escala geográfica, provenientes de atividades antrópicas em outros continentes.⁹⁸ O módulo de pesquisas Criosfera, instalado no verão 2011-2012, no centro-oeste do continente Antártico (84°00'S; 79°30'), a 6670 km do Polo Sul Geográfico e a aproximadamente 2.500 km ao sul da Estação Antártica Brasileira Comandante Ferraz, é a primeira plataforma de pesquisas do Brasil no centro da Antártica e permite acompanhar as variações atmosféricas e coletar dados sobre aerossóis para analisar a composição elementar e iônica.⁹⁹

A maioria dos trabalhos na Amazônia foram realizados no marco do Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA).¹⁰⁰ Esse Programa tem como objetivo principal estudar e entender as mudanças climáticas e ambientais em curso para favorecer o processo de desenvolvimento sustentável da Amazônia. Estão vinculadas a esse Programa cerca de 280 instituições de pesquisa nacionais e estrangeiras e 1400 cientistas brasileiros de diversas áreas, alguns deles da Química. Diversos trabalhos foram publicados sobre a

química da atmosfera, medidas de compostos orgânicos biogênicos, CO₂, CH₄ e ozônio e aerossóis e seus efeitos no balanço radiativo e estudos do papel do ambiente aquático no ciclo do carbono.¹⁰¹⁻¹⁰³

As observações de GEE do satélite GOSAT,¹⁰⁴ que opera desde 2004, têm sido comparadas, também, com medidas de aviões sobre a Amazônia e resultados de modelos de transporte 3D. Os fluxos de CH₄ e CO₂, assim como os balanços sazonais e anuais de carbono, na Amazônia, têm sido estudados a partir de 2010 e reportados em diversos artigos.¹⁰⁵⁻¹⁰⁶

A importante contribuição da Química na Oceanografia já foi tema de um Editorial do *Journal of Brazilian Chemical Society*¹⁰⁷ no qual foram destacadas as ações, no Brasil, no âmbito do Projeto GEOTRACES,¹⁰⁸ a partir do *Workshop GEOTRACES Latin America* (Rio de Janeiro, 2012), onde foi identificada a necessidade de estudos de elementos traço e seus isótopos nas águas oceânicas dos países da América Latina e o *Workshop GEOTRACES Brazil* (que aconteceu em Santos, 2015) onde se reuniram pesquisadores brasileiros e estrangeiros para promover o envolvimento da comunidade brasileira nos estudos da química dos oceanos. Em 2013, Hatje *et al.*,⁸⁵ revisaram o estado da arte nos principais temas relacionados à química dos oceanos e à intervenção antrópica nos ecossistemas marinhos: acidificação dos oceanos; poluição nos ambientes marinhos por resíduos sólidos, incluindo plásticos;¹⁰⁹⁻¹¹¹ e poluição por substâncias químicas e medicinais (incluindo as de uso veterinário), tais como hormônios, antibióticos, cosméticos, drogas ilícitas e outras como cafeína.¹¹² As pesquisas relacionadas a acidificação dos oceanos são relativamente recentes. Pesquisadores da Rede de Pesquisa Brasileira em Acidificação dos Oceanos (BrOA),¹¹³ têm projetos sobre a biogeoquímica de ecossistemas costeiros e estuarinos, o efeito da acidificação dos oceanos em organismos marinhos e processos físicos e geoquímicos do sistema carbonato marinho e da troca de carbono na interface ar-mar.¹¹⁴⁻¹¹⁷ Em um artigo de 2016,¹¹⁴ são destacados os grandes desafios e dificuldades

enfrentadas e a necessidade de medições continuadas durante longos períodos para compreender a variabilidade dos sistemas carbonato em ecossistemas marinhos. Os autores destacam a grande diversidade dos sistemas costeiros e de oceano aberto na costa do Atlântico Sul Oeste (WSAO) e sua vulnerabilidade à acidificação e revisam os esforços observacionais, experimentais e de modelagem que estão sendo realizados no contexto do BrOA.¹¹³

A Química tem contribuído, também, para o estudo dos solos antropogênicos, o impacto do uso da terra, os processos de transformação química e de erosão e a composição da matéria orgânica dos solos, especialmente a chamada terra preta arqueológica ou Terra Preta de Índio (*anthropogenic dark earths*) formada a partir das atividades de populações pré-históricas e de importância econômica e agrônômica pela sua grande fertilidade.¹¹⁸⁻¹²⁰

Vários cientistas brasileiros participam de programas, projetos e grupos de trabalho internacionais que desenvolvem pesquisas relevantes relacionada ao desenvolvimento sustentável do planeta e aos grandes temas do Antropoceno. Os temas e pesquisas citadas aqui, a modo de exemplo, não são de forma alguma uma listagem exaustiva e, menos ainda, completa do desenvolvimento da Química do Antropoceno no Brasil, até porque o Antropoceno não se limita à determinação das evidências estratigráficas ou a determinação das variáveis de controle dos LP (nas quais a Química tem um papel fundamental). O conceito do Antropoceno extrapola esses temas, ao ser o tempo no qual a humanidade e a Terra se encontram atualmente. Assim a Química do Antropoceno é a Química desse novo tempo, especialmente a Química do século XXI centrada nos problemas da sustentabilidade e a manutenção da vida sobre a Terra. Está claro que 7 bilhões de pessoas não poderiam se sustentar no planeta anterior à Revolução Industrial. O homem, através da ciência e da tecnologia, mudou o planeta, levando-o a um novo estágio aparentemente irreversível e próximo de parâmetros que levam ao

desequilíbrio biogeoquímico. Mais que discutir se existe um Antropoceno bom ou apenas um Antropoceno ruim, desde o ponto de vista do sistema Terra, professores e pesquisadores e, especialmente os químicos, devem usar a ciência como ferramenta de busca de soluções sustentáveis. A depleção da camada de ozônio é uma mostra de como a ciência, através de muitas pesquisas, lideradas principalmente pelos ganhadores do Prêmio Nobel de Química 1995, Crutzen, Molina e Rowland, conseguiu passar esse conjunto de evidências, muito bem fundamentadas e rigorosamente examinadas, à sociedade e aos governos, tendo um enorme impacto industrial e político e chegando-se, finalmente, ao Protocolo de Montreal.¹⁰⁸ Nas palavras do Professor Ingmar Grenthe na cerimônia de entrega do Prêmio, os laureados “não só criaram um claro entendimento dos fenômenos químicos fundamentais, como das consequências em grande escala e, frequentemente negativas, do comportamento humano”.¹²¹

Mais de 20 anos depois, a Química tem uma nova oportunidade de mudar positivamente a história do homem e de todas as espécies que habitam a Terra.

4. Conclusões

O homem tem se convertido em uma força geológica, capaz de mudar o planeta tanto ou mais que as forças naturais. Surge, assim, o conceito de Antropoceno, que pode ser visto desde um ponto de vista apenas geológico ou, de uma forma mais ampla, como uma nova época com característica totalmente diferentes do Holoceno, envolvendo o meio ambiente, a biologia, a química, a cultura, a economia e as relações políticas e econômicas. Independentemente da formalização do Antropoceno como época geológica, esta é em uma nova fase na história do Homem e na história da Terra, onde as forças humanas e as forças naturais se entrelaçam e influenciam mutuamente seu destino.

Dentre as diferentes propostas para o início do Antropoceno, as grandes mudanças ambientais, sociais e econômicas a partir de 1950, conhecidas como a “Grande Aceleração”, são consideradas atualmente as mais adequadas para definir o começo dessa nova época, não só pelo crescimento exponencial das variáveis, mas, também, por apresentar evidências estratigráficas globais e sincrônicas.

Ao longo de quase duas décadas de discussão sobre o futuro do sistema Terra, a proposta dos Limites Planetários, centrada nas mudanças climáticas e na integridade da biosfera, mesmo controversa, mostra que o Antropoceno é muito mais que uma proposta geológica.

O Antropoceno tem se convertido em um desafio para as ciências naturais, a tecnologia, a antropologia, a história e as relações sociais, políticas e econômicas. A Química do século XXI terá um papel preponderante na busca de soluções para um desenvolvimento sustentável e para a proteção da vida sobre a Terra. Também a Química no Brasil tem dado grandes contribuições a este tema, uma vez que os cientistas brasileiros têm desenvolvido, especialmente na última década, pesquisas pioneiras nos ciclos biogeoquímicos dos principais biomas, em biocombustíveis e novos materiais, entre outros, que abrem uma nova perspectiva na Química do país, engajada nas grandes questões do século.

Agradecimentos

GA agradece ao Professor Hermínio Ismael de Araújo Júnior (Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro) pela discussão inicial sobre este tema.

Referências Bibliográficas

- ¹ Hublin, J. J.; Ben-Ncer, A.; Bailey, S. E.; Freidline, S. E.; Neubauer, S.; Skinner, M. M.; Bergmann, I.; Le Cabec, A.; Benazzi, S.; Harvati, K.; Gunz, P. New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of *Homo sapiens*. *Nature* **2017**, *546*, 289. [CrossRef]
- ² NASA. Ozone Hole Watch Website. Disponível em: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ³ IPCC, Climate Change 2014. Synthesis Report. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_All_Topics.pdf. Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ⁴ Steffen, W.; Grinevald, J.; Crutzen, P.; McNeill, J. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society* **2011**, *369*, 842. [CrossRef]
- ⁵ Monastersky, R. The human age. *Nature* **2015**, *519*, 144. [Link]
- ⁶ Crutzen, P. J.; Stoermer, E. F. The Anthropocene. *Global Change Newsletter* **2000**, *41*, 17. [Link]
- ⁷ Steffen, W.; Broadgate, W.; Deutsch, L.; Gaffney, O.; Ludwig, C. The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. *The Anthropocene Review* **2015**, *2*, 81. [CrossRef]
- ⁸ Rezende, C. M. Editorial Ano Internacional da Química. *Química Nova* **2011**, *34*, 3. [Link]
- ⁹ Rezende, C. M. Editorial O sucesso do Ano Internacional da Química no Brasil. *Química Nova*, **2011**, *34*, 1681. [Link]
- ¹⁰ Antropoceno: The journey to a new geological epoch. [Link] Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ¹¹ 35th International Geological Congress. Disponível em: <http://www.35igc.org/> e http://www.35igc.org/Uploads/Conference/IGC_CTICC_GUIDEBOOK_2016_WEB.pdf. Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ¹² Rodrigues, M. O Antropoceno em disputa. *Ciência e Cultura*, **2017**, *69*, versão on line. [Link]
- ¹³ Franchini, M.; Viola, E.; Barros-Platiau, A. F. The challenges of the Antropoceno: From international environmental politics to global governances. *Ambiente & Sociedade*. **2017**, *20*, 177. [CrossRef]
- ¹⁴ Trischler, H. The Anthropocene. A Challenge for the History of Science, Technology, and the Environment. *NTM* **2016**, *24*, 309. [CrossRef]
- ¹⁵ Steffen, W. An integrated approach to understanding Earth's metabolism. *Global Change Newsletter* **2000**, *41*, 9. [Link]
- ¹⁶ Petit, J.R.; Jouzel, J.; Raynaud, D.; Barkov, N. I.; Barnola, J.-M.; Basile, I.; Benders, M.; Chappellaz, J.; Davis, M.; Delaygue, G.; Delmotte, M.; Kotlyakov, V. M.; Legrand, M.; Lipenkov, V.Y.; Lorius, C.; Pépin, L.; Ritz, C.; Saltzman, E.; Stievenard, M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* **1999**, *399*, 429. [CrossRef]
- ¹⁷ Crutzen, P. J. Geology of mankind. *Nature* **2002**, *415*, 23. [CrossRef]
- ¹⁸ Grinevald, J. Le concept d'Anthropocène et son contexte historique et scientifique. Momentum Institut. Séminaire di 11 de maio 2012. Disponível em: <https://www.institutmomentum.org/lanthropocene-entree-et-sor%C2%ADtie-par-jacques-grinevald/>. Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ¹⁹ Hamilton, C. The Anthropocene as rupture. *The Anthropocene Review* **2016**, *8*, 93. [CrossRef]
- ²⁰ International Commission on Stratigraphy. Disponível em: <http://www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale>. Acesso em: 14 março 2018.
- ²¹ Lewis, S. L.; Maslin, M. A. Defining the Anthropocene. *Nature* **2015**, *519*, 171. [CrossRef]
- ²² Gale, S. J.; Hoare, P. G. The stratigraphic status of the Anthropocene. *The Holocene* **2012**, *22*, 1491. [CrossRef]
- ²³ Gale, S. J. Dating the recent past. *Quaternary Geochronology* **2009**, *4*, 374. [CrossRef]
- ²⁴ Walker, M.; Johnsen, S.; Rasmussen, S. O.; Popp, T.; Steffensen, J.-P.; Gibbard, P.; Hoek, W.; Lowe, J.; Andrew, J.; Björck, S.; Cwynar, L. C.; Hughen, K.; Kershaw, P.; Kromer, B.; Litt, T.; Lowe, D. J.; Nakagawa, T.; Newnham, R.; Schwander, J. Formal definition and dating

- of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records. *Journal of Quaternary Science* **2009**, *24*, 3. [CrossRef]
- ²⁵ Ruddiman, W. F. The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago. *Climatic Change* **2003**, *61*, 261. [CrossRef]
- ²⁶ Ruddiman, W. F.; Crucifix, M. C.; Oldfield, F. A. Introduction to the early-Anthropocene Special Issue. *The Holocene* **2011**, *21*, 713. [CrossRef]
- ²⁷ Certini, G.; Scalenghe, R. Anthropogenic soils are the golden spikes for the Anthropocene. *The Holocene* **2011**, *21*, 1269. [CrossRef]
- ²⁸ Zalasiewicz, J.; Williams, M.; Steffen, W.; Crutzen, P. The New World of the Anthropocene. *Environmental Science and Technology* **2010**, *44*, 2228. [CrossRef]
- ²⁹ Zalasiewicz, J.; Waters, C. N.; Williams, M.; Barnosky, A. D.; Cearreta, A.; Crutzen, P.; Ellis, E.; Ellis, M. A.; Fairchild, I. J.; Grinevald, J.; Haff, P. K.; Hajdas, I.; Leinfelder, R.; McNeill, J.; Odada, E. O.; Poirier, C.; Ritcher, D.; Steffen, W.; Summerhayes, C.; Syvitski, J. P. M.; Vidas, D.; Wagemann, M.; Wing, S. L.; Wolfe, A. P.; Zhisheng, A.; Oreskes, N. When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal. *Quaternary International* **2015**, *383*, 196. [CrossRef]
- ³⁰ Zalasiewicz, J.; Waters, C. N.; Summerhayes, C. P.; Wolfe, A. P.; Barnosky, A. D.; Cearreta, A.; Crutzen, P.; Ellis, E.; Fairchild, I. J.; Galuszka, A.; Haff, P.; Hajdas, I.; Head, M. J.; Ivar do Sul, J. A.; Jeandel, C.; Leinfelder, R.; McNeill, J. R.; Neal, C.; Odada, E.; Oreskes, N.; Steffen, W.; Syvitski, J.; Vidas, D.; Wagemann, M.; Williams, M. The Working Group on the Anthropocene: Summary of evidence and interim recommendations. *Anthropocene* **2017**, *19*, 55. [CrossRef]
- ³¹ Steffen, W.; Sanderson, A.; Tyson, P. D.; Jäger, J.; Matson, P. A.; Moore III, B.; Oldfield, F.; Richardson, K.; Schellnhuber, H. J.; Turner II, B. L.; Wasson, R. J. Executive Summary. *Global Change and the Earth System. A Planet under pressure. Global IGBP Change. Disponível em: http://www.igbp.net/download/18.1b8ae20512db692f2a680007761/1376383137895/IGBP_ExecSummary_eng.pdf. Acesso em: 2 janeiro 2018.*
- ³² Steffen, W.; Broadgate, W.; Deutsch, L.; Gaffney, O.; Ludwig, C. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review* **2015**, *2*, 81. [CrossRef]
- ³³ Steffen, W.; Sanderson, A.; Tyson, P. D.; Jäger, J.; Matson, P. A.; Moore III, B.; Oldfield, F.; Richardson, K.; Schellnhuber, H. J.; Turner, B. L.; Wasson, R. J. *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg New York, 2004.
- ³⁴ Steffen, W.; Crutzen, P. J.; McNeill, J. R. The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? *Ambio* **2007**, *36*, 614. [Link]
- ³⁵ Farman, J. C.; Gardiner, B. G.; Shanklin, J. D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature* **1985**, *315*, 207. [CrossRef]
- ³⁶ World Meteorological Organization/United Nations Environment Programme (WMO/UNEP), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014 (Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 55, WMO, 2014). Disponível em: https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2014/chapters/preface_2014OzoneAssessment.pdf. Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ³⁷ Kuttippurath, J.; Godin-Beekmann, S.; Lefèvre, F.; Santee, M. L.; Froidevaux, L.; Hauchecorne, A. Variability in Antarctic ozone loss in the last decade (2004–2013): high-resolution simulations compared to Aura MLS observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2015**, *15*, 10385. [CrossRef]
- ³⁸ Livesey, N. J.; Santee, M. L.; Manney, G. L. A Match-based approach to the estimation of polar stratospheric ozone loss using Aura Microwave Limb Sounder observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2015**, *15*, 9945. [CrossRef]
- ³⁹ Salomon, S.; Ivy, D. J.; Kinnison, D.; Mills, M. J.; Neely III, R. R.; Schmidt, A. Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science* **2016**, *353*, 269. [CrossRef]

- ⁴⁰ UNEP. Ozone Secretariat. The Montreal Protocol on Substances that Deplete de Ozone Layer. Disponível em: <http://ozone.unep.org/en/treaties-and-decisions/montreal-protocol-substances-deplete-ozone-layer>. Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ⁴¹ United Nations Development Programme. Montreal Protocol. Disponível em: <http://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development/environment-and-natural-capital/montreal-protocol.html>. Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ⁴² Zalasiewicz, J.; Williams, M.; Waters, C. N.; Barnosky, A. D.; Haff, P. The technofossil record of humans. *The Anthropocene Review* **2014**, *1*, 34. [CrossRef]
- ⁴³ Zalasiewicz, J.; Waters, C.N.; Ivar do Sul, J. A.; Corcoran, P. L.; Barnosky, A.D.; Cearreta, A.; Edgeworth, M.; Galuszka, A.; Jeandel, C.; Leinfelder, R.; McNeill, J. R.; Steffen, W.; Summerhayes, C.; Wagemann, M.; Williams, M.; Wolfe, A. P.; Yonan, Y. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. *Anthropocene* **2016**, *13*, 4. [CrossRef]
- ⁴⁴ Corcoran, P. L.; Norris, T.; Ceccanese, T.; Walzak, M. J.; Helm, P. A.; Marvin, C. H. Hidden plastics of Lake Ontario, Canada and their potential preservation in the sediment record. *Environmental Pollution* **2015**, *204*, 17. [CrossRef]
- ⁴⁵ Rose, N. L. Spheroidal Carbonaceous Fly Ash Particles Provide a Globally Synchronous Stratigraphic Marker for the Anthropocene. *Environmental Science and Technology* **2015**, *49*, 4155. [CrossRef]
- ⁴⁶ Parekh, P. P.; Semkow, T. M.; Torres, M. A.; Haines, D. K.; Cooper, J. M.; Rosenberg, P. M.; Kitto, M. E. Radioactivity in Trinitite six decades later. *Journal of Environmental Radioactivity* **2006**, *85*, 103. [CrossRef]
- ⁴⁷ Waters, C. N.; Syvitski, J. P. M.; Galuska, A.; Hancock, G. J.; Zalasiewicz, J.; Cearreta, A.; Grinevald, J.; Jeandel, C.; McNeill, J. R.; Summerhayes, C.; Barnosky, A. Can nuclear weapons fallout mark the beginning of the Anthropocene Epoch? *Bulletin of the Atomic Scientists* **2015**, *71*, 46. [Link]
- ⁴⁸ Koch, P. L.; Barnosky, A. D. Late Quaternary Extinctions: State of the Debate. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* **2006**, *37*, 215. [CrossRef]
- ⁴⁹ Ruddiman, W. F.; Ellis, E. C.; Kaplan, J. E.; Fuller, D. Q. Defining the epoch we live in. *Science* **2015**, *348*, 6230. [CrossRef]
- ⁵⁰ Ruddiman, W. F. Geological evidence for the Anthropocene-Response. *Science* **2015**, *349*, 247. [CrossRef]
- ⁵¹ The Economist. Welcome to the Anthropocene. Disponível em: <http://www.economist.com/node/18744401>. Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ⁵² Global Carbon Project. Global Carbon Budget 2017. Disponível em: http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/17/files/GCP_CarbonBudget_2017.pdf. Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ⁵³ Convention on Biological Diversity. Thematic Programmes and Cross-cutting Issues. Disponível em: <https://www.cbd.int/programmes/>. Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ⁵⁴ Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, A.; Chapin III, F. S.; Lambin, E. F.; Lenton, T. M.; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, H. J.; Nykvist, B.; de Wit, C. A.; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sörlin, S.; Snyder, P. K.; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, R. W.; Fabry, V. J.; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P.; Foley, J. A. A safe operating space for humanity. *Nature* **2009**, *461*, 472. [CrossRef]
- ⁵⁵ Geoengineering the climate. Science, governance and uncertainty. 2009. The Royal Society. Disponível em: https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf. Acesso em: 2 janeiro 2018.
- ⁵⁶ Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, Å., Chapin, III, F. S.; Lambin, E.; Lenton, T. M.; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, H.; Nykvist, B.; De Wit, C. A.; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sörlin, S.; Snyder, P. K.; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, R. W.; Fabry, V. J.; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P.; Foley, J. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society* **2009**, *14*, 32. [Link]

- ⁵⁷ Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, A.; Chapin III, F. S.; Lambin, E. F.; Lenton, T. M.; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, H. J.; Nykvist, B.; de Wit, C. A.; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sörlin, S.; Snyder, P. K.; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, R. W.; Fabry, V. J.; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P.; Foley, J. A. A safe operating space for humanity. *Nature* **2009**, *461*, 472. [CrossRef]
- ⁵⁸ Steffen, W.; Richardson, K.; Rockstrom, J.; Cornell, S. E.; Fetzer, I.; Bennett, E. M.; Biggs, R.; Carpenter, S. R.; de Vries, W.; de Wit, C. A.; Folke, C.; Gerten, D.; Heinke, J.; Mace, G. M.; Persson, L. M.; Ramanathan, V.; Reyers, B.; Sorlin, S. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* **2015**, *347*, 1259855. [CrossRef]
- ⁵⁹ Running, S. W. Ecology. A Measurable Planetary Boundary for the Biosphere. *Science* **2012**, *337*, 1458. [CrossRef]
- ⁶⁰ Mace, G. M.; Reyers, B.; Alkemade, R.; Biggs, R.; Chapin III F. S.; Cornell, S. E.; Díaz, S.; Jennings, S.; Leadley, P.; Mumby, P. J.; Purvis, A.; Scholes, R. J.; Seddon, A. W. R.; Solan, M.; Steffen, W.; Woodward, G. Approaches to defining a planetary boundary for biodiversity. *Global Environmental Change* **2014**, *28*, 289. [CrossRef]
- ⁶¹ Carpenter, S. R.; Bennett, E. M. Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus. *Environmental Research Letters* **2011**, *6*, 014009. [CrossRef]
- ⁶² de Vries, W.; Kros, J.; Kroeze, C.; Seitzinger, S. P. Assessing planetary and regional nitrogen boundaries related to food security and adverse environmental impacts. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **2013**, *5*, 392. [CrossRef]
- ⁶³ UN GSP (UN High-level Panel on Global Sustainability), *Resilient People, Resilient Planet: A future worth choosing*. (Report for the 2012 Rio+20 Earth Summit, United Nations, New York, 2012). Disponível em: <http://archive.ipu.org/splz-e/rio+20/rpt-panel.pdf>. Acesso em: 3 janeiro 2018.
- ⁶⁴ World Meteorological Organization. Global Atmosphere Watch. WMO Greenhouse Gas Bulletin. Disponível em: https://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/ckeditor/files/GHG_Bulletin_13_EN_final_1_1.pdf?LGJNmHpwKkEG2Qw4mEQidm6bWxgWAJHa. Acesso em: 3 janeiro 2018.
- ⁶⁵ Montoya, J. M.; Donohue, I.; Pimm, S. L. Planetary Boundaries for Biodiversity: Implausible Science, Pernicious Policies. *Trends in Ecology & Evolution* **2018**, *33*, 71. [CrossRef]
- ⁶⁶ Rockstrom, J.; Richardson, K.; Steffen, W.; Mace, G. Planetary Boundaries: Separating Fact from Fiction. A Response to Montoya et al. *Trends in Ecology & Evolution*, 2018, *in press* [CrossRef]
- ⁶⁷ Stockholm Resilience Centre. Stockholm University. Disponível em: <http://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>. Acesso em 21 janeiro 2018.
- ⁶⁸ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. A special report of Working Groups I and II of the IPCC. C.B. Field et al. (Eds.) (Cambridge University Press, Cambridge, UK (2012). doi: 10.1017/CBO9781139177245). Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf. Acesso em 4 janeiro 2018.
- ⁶⁹ Royal Society, *Ocean Acidification Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide*. Policy Document 12/05 (The Royal Society, London, 2005). Disponível em: https://www.us-ocb.org/wp-content/uploads/sites/43/2017/03/Royal_Soc_OA.pdf. Acesso em: 4 janeiro 2018.
- ⁷⁰ Snyder, P. K.; Delire, C.; Foley, J. A. Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. *Climate Dynamics* **2004**, *23*, 279. [CrossRef]
- ⁷¹ Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2016. State of the World's Forests. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5588e.pdf>. Acesso em 4 janeiro 2018.
- ⁷² Anderies, J. M.; Carpenter, S. R.; Steffen, W.; Rockström, J. The topology of non-linear global carbon dynamics: From tipping points

- to planetary boundaries. *Environmental Research Letters* **2013**, *8*, 044048. [CrossRef]
- ⁷³ da Veiga, J. E. The first Anthropocene Utopia. *Ambiente & Sociedade* **2017**, *20*, 227. [CrossRef]
- ⁷⁴ Latour, B. Telling friends from foes in the time of the Anthropocene. In Hamilton, C.; Bonneuil, C.; Gemenne, F. (editors). *The Anthropocene and the Global Environmental Crisis: Rethinking Modernity in a New Epoch*. Pag 145-155. Ed. Routledge: London, 2015.
- ⁷⁵ Viola, E.; Basso, L. O Sistema Internacional no Antropoceno. *Revista Brasileira de Ciências Sociais* **2016**, *31*,1. [CrossRef]
- ⁷⁶ Torres, S. O antropoceno e a antropológico pós-humana: narrativas de catástrofe e contaminação. *Ilha Desterro* **2017**, *70*, 93. [CrossRef]
- ⁷⁷ Vianna, R. B. Retornar à Terra no Antropoceno: estamos atrasados? *Desenvolvimento e Meio Ambiente* **2017**, *42*, 385. [CrossRef]
- ⁷⁸ Ivar do Sul, J. A. Uma nova época na história geológica da Terra? *Ciência Hoje* **2016**, *333*, 56. [Link]
- ⁷⁹ Welcome to the Anthropocene. Disponível em: <http://www.anthropocene.info/>. Acesso em 21 janeiro 2018.
- ⁸⁰ Smithsonian National Museum of Natural History. The National Fossil Hall. Disponível em: <https://naturalhistory.si.edu/fossil-hall/>. Acesso em: 4 janeiro 2018.
- ⁸¹ Museu do Amanhã. Exposição Principal. Antropoceno. Disponível em: <https://museudoamanha.org.br/pt-br/antropoceno>. Acesso em: 4 janeiro 2018
- ⁸² Mahaffy, P. G. Telling Time: Chemistry Education in the Anthropocene Epoch. *Journal of Chemical Education* **2014**, *91*, 463. [CrossRef]
- ⁸³ Moreira Junior, D. P.; Silva, C. M.; Bueno, C.; Corrêa, S. M.; Arbilla, G. Determinação de Gases de Efeito Estufa em Cinco Capitais de Diferentes Biomas Brasileiros. *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 2032. [CrossRef]
- ⁸⁴ Galuszka, A.; Migaszewski, Z. M.; Namiesnik, J. The role of analytical chemistry in the study of Anthropocene. *Trends in Analytical Chemistry* **2017**, *97*, 146. [CrossRef]
- ⁸⁵ Hatje, V.; Costa, M. F. da; Cunha, L. C. da. Oceanografia e Química: unindo conhecimentos em prol dos oceanos e da sociedade. *Química Nova* **2013**, *36*, 1497. [CrossRef]
- ⁸⁶ Pinto, A. C.; Zucco, C.; Galembeck, F.; de Andrade, J. B.; Vieira, P. C. Química sem fronteiras. *Química Nova* **2012**, *35*, 2092. [CrossRef]
- ⁸⁷ Lacerda, L. D. de. Biogeoquímica de contaminantes no Antropoceno. *Oecologia Brasiliensis* **2007**, *11*, 297. [Link]
- ⁸⁸ Pinto, A. C.; Zucco, C.; Galembeck, F.; Andrade, J. B.; Catalani, L. H.; Vieira, P. C. Química sem fronteiras. *Química Nova* **2013**, *36*, 1. [Link]
- ⁸⁹ Mota, C. J. A.; Monteiro, R. S. Química e sustentabilidade: novas fronteiras em biocombustíveis. *Química Nova* **2013**, *36*, 1483. [CrossRef]
- ⁹⁰ Pinto-Zevallos, D. M.; Zarbin, P. H. G. A Química na agricultura: perspectivas para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. *Química Nova* **2013**, *36*, 1509. [CrossRef]
- ⁹¹ da Rocha, G. O.; de Andrade, J. B.; Guareiro, A. L. N.; Guarieiro, L. L. N.; Ramos, L. P. Química Sem Fronteiras: O desafio da energia. *Química Nova* **2013**, *36*, 1540. [CrossRef]
- ⁹² Pinto, A. C.; Barreiro, E. J. Desafios da indústria farmacêutica brasileira. *Química Nova* **2013**, *36*, 1557. [CrossRef]
- ⁹³ Silva, C. M.; *Tese de Doutorado*, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2016.
- ⁹⁴ Observatório do Clima. Análise das emissões de GEE Brasil (1970-2014) e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris. Disponível em: <http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/WIP-16-09-02-RelatoriosSEEG-Sintese.pdf>. Acesso em: 20 setembro 2017.
- ⁹⁵ Ferreira, L. Da C.; Martinelli, M. Anthropocene: Governing climate change in China and Brazil. *Sociology and Anthropology* **2016**, *4*, 1084. [CrossRef]
- ⁹⁶ Veetil, B. K.; Wang, S.; de Souza, S. F.; Bremer, U. F.; Simões, J. C. Glacier monitoring and glacier-climate interactions in the tropical Andes: A review. *Journal of South American Earth Sciences* **2017**, *77*, 218. [CrossRef]

- ⁹⁷ Schwanck, F.; Simões, J. C.; Handley, M.; Mayewski, P. A.; Auger, J. D.; Bernardo, R. T.; Aquino, F. E. A 125-year record of climate and chemistry variability at the Pine Island Glacier ice divide, Antarctica. *The Cryosphere* **2017**, *11*, 1537. [CrossRef]
- ⁹⁸ Dalfior, B. M.; Roriz, L. D.; Júnior, R. F.; Freitas, A. C. de; da Silva, H. E.; Carneiro, M. T. W. D.; Licinio, M. V.V. J.; Brandão, G. P. Avaliação dos teores de Pb, Cd, Sn, Co, Hg, Mo e As em solos da Península Fildes-Antártica. *Química Nova*, 2016, *39*, 893. [CrossRef]
- ⁹⁹ Projeto Antártico. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Criosfera 1. O futuro das medidas para o estudo da atmosfera antártica. Disponível em: <http://www3.inpe.br/crs/pan/pesquisas/criosfera.php>. Acesso em: 4 janeiro 2018.
- ¹⁰⁰ Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA). Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Disponível em: <http://lba2.inpa.gov.br/index.php/lba-apresentacao.html>. Acesso em: 5 janeiro 2018.
- ¹⁰¹ Alves, E. G.; Jardine, K.; Tota, J.; Jardine, A.; Yanez-Serrano, A. M.; Karl, T.; Tavares, J.; Nelson, B.; Gu, D.; Stravrakou, T.; Martin, S.; Artaxo, P.; Manzi, A.; Guenther, A. Seasonality of isoprenoid emissions from a primary rainforest in central Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2016**, *16*, 3903. [CrossRef]
- ¹⁰² Martin, S. T.; Artaxo, P.; Machado, L.; Manzi, A. O.; Souza, R. A. F.; Schumacher, C.; Wang, J.; Biscaro, T.; Brito, J.; Calheiros, A.; Jardine, K.; Medeiros, A.; Portela, B.; Sá, S. S. de; Adachi, K.; Aiken, A. C.; Albrecht, R.; Alexander, L.; Andreae, M. O.; Barbosa, H. M. J.; Buseck, P.; Chand, D.; Comstock, J. M.; Day, D. A.; Dubey, M.; Fan, J.; Fast, J.; Fisch, G.; Fortner, E.; Giangrande, S.; Gilles, M.; Goldstein, H.; Guenther, A.; Hubbe, J.; Jensen, M.; Jimenez, J. L.; Keutsch, F. N.; Kim, S.; Kuang, C.; Laskin, A.; McKinney, K.; Mei, F.; Miller, M.; Nascimento, R.; Pauliquevis, T.; Pekour, M.; Peres, J.; Petaja, T.; Pohlker, C.; Poschl, U.; Rizzo, L.; Schmid, B.; Shilling, J. E.; Dias, M. A. S.; Smith, J. N.; Tomlinson, J. M.; Tota, J.; Wendisch, M. The Green Ocean Amazon Experiment (GoAmazon2014/5) Observes Pollution Affecting Gases, Aerosols, Clouds, and Rainfall over the Rain Forest. *American Meteorology Society*, **2017**, *97*, 981. [CrossRef]
- ¹⁰³ Andreae, M. O.; Afchine, A.; Albrecht, R.; Holanda, B. A.; Artaxo, P.; Barbosa, H. M. J.; Bormann, S.; Cecchini, M. A.; Costa, A.; Dollner, M.; Futterer, D.; Jarvinen, E.; Jurkat, T.; Klimach, L.; Konemann, T.; Knote, C.; Kramer, M.; Krisna, T.; Machado, M. L. A. T.; Mertes, S.; Minikin, A.; Pohlker, C.; Pohlker, M. L.; Poschi, U.; Rosenfeld, D.; Sauer, D.; Schlager, H.; Schnaiter, M.; Schneider, J.; Schultz, C.; Spanu, A.; Sperling, V. B.; Voigt, C.; Walser, A.; Wang, J.; Weinzierl, B.; Wendisch, M.; Ziereis, H. Aerosol characteristics and particle production in the upper troposphere over the Amazonian Basin. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* **2017**, in review. [CrossRef]
- ¹⁰⁴ Greenhouse gases. GOSAT Project Observing Satellite. Disponível em: <http://www.gosat.nies.go.jp/en/>. Acesso em: 6 janeiro 2018.
- ¹⁰⁵ Feng, L.; Palmer, P. I.; Bösch, H.; Parker, R. J.; Webb, A. J.; Correia, C. S. C.; Deutscher, N. M.; Domingues, L. G.; Feist, D. G.; Gatti, L. V.; Gloor, E.; Hase, F.; Kivi, R.; Liu, Y.; Miller, J. B.; Morino, I.; Sussmann, R.; Strong, K.; Uchino, O.; Wang, J.; and Zahn, A. Consistent regional fluxes of CH₄ and CO₂ inferred from GOSAT proxy XCH₄:XCO₂ retrievals, 2010–2014, *Atmospheric Chemistry and Physics* **2017**, *17*, 4781. [CrossRef]
- ¹⁰⁶ Gatti, L. V.; Gloor, M.; Miller, J. B.; Doughty, C. E.; Malhi, Y.; Domingues, L. G.; Basso, L. S.; Martinewski, A.; Correia, C. DS. C.; Borges, V. F.; Freitas, S.; Braz, R.; Anderson, L. O.; Rocha, H.; Grace, J.; Phillips, O. L.; Lloyd, J. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature* **2014**, *506*, 76. [CrossRef]
- ¹⁰⁷ Hatje, V. Editorial. Chemistry of Our Oceans. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2015**, *26*, 2169. [CrossRef]
- ¹⁰⁸ GEOTRACES. An international study of the marine biogeochemical cycles of trace elements and their isotopes. Disponível em:

- <http://www.geotraces.org/>. Acesso em: 7 janeiro 2018.
- ¹⁰⁹ Widmer, W. M.; Hennemann, M. C. Marine Debris in the Island of Santa Catarina, South Brazil: Spatial Patterns, Composition and Biological Aspects. *Journal of Coastal Research*, **2010**, *26*, 993. [CrossRef]
- ¹¹⁰ Ivar do Sul, J. A.; Costa, M. F. Plastic pollution risks in an estuarine conservation unit. *Journal of Coastal Research* **2013**, *SI65*, 48. [CrossRef]
- ¹¹¹ Ivar do Sul, J. A.; Costa, M.; Fillmann, G. Occurrence and characteristics of microplastics on insular beaches in the Western Tropical Atlantic Ocean. *PeerJ PrePrints*, **2017**, *5*, e2901v1. [CrossRef]
- ¹¹² Lisboa, N. S.; Fahning, C. S.; Cotrim, G.; dos Anjos, J. P.; de Andrade, J. B.; Hatje, V.; Rocha, G. O. da. A simple and sensitive UFLC-fluorescence method for endocrine disrupters determination in marine waters. *Talanta* **2013**, *117*, 168. [CrossRef]
- ¹¹³ Rede de Pesquisa Brasileira em Acidificação dos Oceanos (Broa). Disponível em: <http://www.broa.furg.br/>. Acesso em 7 de janeiro 2018.
- ¹¹⁴ Kerr, R.; da Cunha, L. C.; Kikuchi, R. K. P.; Horta, P. A.; Ito, R. G.; Muller, M. N.; Orselli, I. B. M.; Lencina-Avila, J. M.; Orte, M. R. de; Sordo, L.; Pinheiro, B. R.; Bonou, F. K.; Schubert, N.; Bergstrom, E.; Copertino, M. S. The Western South Atlantic Ocean in a High-CO₂ World: Current Measurement Capabilities and Perspectives. *Environmental Management* **2016**, *57*, 740. [CrossRef]
- ¹¹⁵ Bonou, F. K.; Noriega, C.; Lefèvre, N.; Araujo, M. Distribution of CO₂ parameters in the Western Tropical Atlantic Ocean. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* **2016**, *73*, 47. [CrossRef]
- ¹¹⁶ Goulding, T. A.; Orte, M. R. De; Szalaj, D.; Basallote, M. D.; DelValls, T. A.; Cesar, A. Assessment of the environmental impacts of ocean acidification (OA) and carbon capture and storage (CCS) leaks using the amphipod *Hyale youngi*. *Ecotoxicology* **2017**, *26*, 521. [CrossRef]
- ¹¹⁷ Kerr, R.; Goyet, C.; da Cunha, L. C.; Orselli, I. B. M.; Lencina-Avila, J. M.; Mendes, C. R. B.; Carvalho-Borges, M.; Mata, M. M.; Tavano, V. M. Carbonate system properties in the Gerlache Strait, Northern Antarctic Peninsula (February 2015): II. Anthropogenic CO₂ and seawater acidification. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **2017**, on line first. [CrossRef]
- ¹¹⁸ Vasconcelos, S. S.; Ruivo, M. de L. P.; Lima, A. M. M. de. Organizadores. *Amazônia no tempo. Impactos do uso da terra em diferentes escalas*. Universidade Federal do Para: Museu Paraense Emílio Goeldi: Embrapa Amazônia Oriental: Belém, 2017.
- ¹¹⁹ Mello, M. L. V. C. B. de; Soares, R. Matéria orgânica em solos arqueológicos amazônicos: uma revisão. *Diversidade e Gestão* **2017**, *1*, 189. [Link]
- ¹²⁰ Madari, B. E.; Cunha, T. J. F.; Soares, R. Organic matter of the Anthropogenic Dark Earths of Amazônia. *Dynamic Soil, Dynamic Plant* **2011**, *5*, 21 [Link]
- ¹²¹ The Nobel Prizes and Laureates. The Nobel Prize in Chemistry 1995. Award Ceremony Speech. Disponível em: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1995/presentation-speech.html. Acesso em: 4 janeiro 2018.