



# Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno?

*Paulo Artaxo*

## RESUMO

Nosso planeta seguiu uma evolução determinada pelas forças geológicas desde sua origem, há cerca de 4,5 bilhões de anos. Ao longo dessa jornada, passou por transformações significativas em sua crosta e atmosfera. Com o início da Revolução Industrial, na segunda metade do século XVIII, um novo agente de mudança se somou às transformações geológicas. O rápido crescimento populacional – somos 7,3 bilhões de habitantes hoje, e seremos cerca de 10 bilhões em 2050 –, associado ao uso excessivo de recursos naturais, fez com que muitos indicadores de saúde da Terra saíssem da região segura. A partir de 1950, o desenvolvimento humano e suas implicações no ecossistema terrestre crescem exponencialmente. Atualmente, uma grande fração das áreas continentais sem gelo é ocupada por atividades humanas como agricultura e urbanização, entre outras.

---

**Palavras-chave:** mudanças globais; mudanças climáticas; poluição atmosférica; gases de efeito estufa; eras geológicas.

## ABSTRACT

*Our planet has followed an evolutionary path determined by geological forces since its origin about 4.5 billion years ago. Throughout its evolution, the Earth has undergone significant changes in its crust and atmosphere. With the onset of the Industrial Revolution around 1750, a new agent of change has been added to the geological transformations. Rapid population growth (we are 7.3 billion people today, and we will be about 10 billion in 2050) associated with the excessive use of natural resources has brought several of the health indicators of our planet outside safe boundaries. Especially after 1950, human development and its implications on terrestrial ecosystem have grown exponentially. Currently, a large fraction of the continental areas without ice is occupied for human activities such as agriculture, grazing pastures, and urbanization, among others.*

---

**Keywords:** *global changes; climate changes; air pollution; greenhouse gases; geological eras.*

**A**Terra seguiu uma evolução determinada pelas forças geológicas desde sua origem, há cerca de 4,5 bilhões de anos. Ao longo dessa jornada, passou por transformações significativas em sua crosta e atmosfera. Nos últimos 3 bilhões de anos, a vida floresceu em nosso planeta de modo lento, inicialmente. Uma espécie peculiar apareceu há 200 mil anos e evoluiu a ponto de desenvolver a civilização que temos hoje. A dominação dessa espécie humana está sendo de tal modo importante que está influenciando algumas componentes críticas do funcionamento básico do sistema terrestre. Entre elas, o clima e a composição da atmosfera. Apesar de sermos uma única espécie entre os estimados 10 a 14 milhões de espécies atuais, e de estarmos habitando a Terra muito recentemente, nos últimos séculos estamos alterando profundamente a face de nosso planeta. O desenvolvimento da agricultura e o início da Revolução Industrial levaram a um explosivo crescimento populacional, que hoje atinge 7,3 bilhões de seres humanos. Éramos cerca de 700 milhões em 1750, no início da Revolução Industrial e, somente no século XX, a população humana cresceu de 1,65 para 6 bilhões. Tal crescimento populacional fez pressões importantes sobre os recursos naturais do planeta. A necessidade crescente de fornecimento de alimentos, água, energia e mais recentemente de bens de consumo em geral está transformando a face da Terra.

O período geológico chamado de Holoceno, que se iniciou há 11.700 anos e continua até o presente, tem sido uma época relativamente estável do ponto de vista climático (Crutzen, 2002). Desde os anos 80, alguns pesquisadores começaram a definir o termo Antropoceno como uma época em que os efeitos da humanidade estariam afetando globalmente nosso planeta. O prêmio Nobel de Química (1995) Paul Crutzen auxiliou na popularização do termo nos anos 2000, através de uma série de publicações discutindo o que seria essa nova era geológica da Terra (Crutzen, 2002) na qual a influência humana se mostra presente em algumas áreas, em parceria com as influências geológicas. A humanidade emerge como uma força significativa globalmente, capaz de interferir em processos críticos de nosso planeta, como a composição da atmosfera e outras propriedades.

## A GRANDE ACELERAÇÃO NO USO DOS RECURSOS NATURAIS DE NOSSO PLANETA

Humanos sempre afetaram o meio ambiente em que viveram, mas os impactos até certo tempo atrás eram locais ou regionais. Redman (1999) analisou o impacto histórico da agricultura, par-

---

**PAULO ARTAXO** é professor do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

ticularmente nos continentes europeu e asiático, e mostrou efeitos ambientais importantes muitos séculos antes da Revolução Industrial. As atividades socioeconômicas na Terra cresceram de modo significativo ao longo dos últimos 200 anos (Steffen et al., 2015) e hoje estão sendo comparadas às forças geofísicas que dão forma a nosso planeta. Nas últimas décadas, o conceito de sustentabilidade ambiental foi se desenvolvendo, e uma ciência emergiu discutindo os aspectos da análise do sistema terrestre para a sustentabilidade (Schellnhuber et al., 2004; Steffen et al., 2007).

Com o desenvolvimento das máquinas a vapor e, posteriormente, dos motores a combustão interna, o uso de combustíveis fósseis (inicialmente carvão, depois petróleo e gás) cresceu exponencialmente, até esses se tornarem hoje responsáveis por 70% a 80% da energia total utilizada em nosso planeta. Isso levou ao aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que passou de cerca de 280 ppm, na era pré-industrial, para uma concentração média

de 399 ppm, em 2015. Essa alta concentração não foi observada ao longo dos últimos 800 mil anos, pelo menos. O aumento nas concentrações de metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozônio (O<sub>3</sub>) e outros gases de efeito estufa também foi muito significativo. As alterações no albedo da superfície terrestre, que quantifica a refletividade do solo associada com mudanças de uso do solo, também foram grandes. A concentração de partículas de aerossóis atmosféricos também afeta fortemente o balanço de radiação terrestre através do efeito radiativo direto dos aerossóis bem como de seu efeito na alteração das propriedades e desenvolvimento de nuvens.

A Figura 1 ilustra a aceleração no uso dos recursos naturais em nosso planeta mostrada como tendência nos indicadores socioeconômicos das atividades humanas desde o início da Revolução Industrial em 1750 até 2010. A parte direita da figura mostra a resposta do sistema terrestre no mesmo período. Observamos um crescimento exponencial na maioria das variáveis.



Fonte: adaptada de IGBP, 2015 e de Steffen et al., 2015b.

## OS LIMITES PLANETÁRIOS

Uma intensa discussão científica ao longo dos últimos anos envolve o conceito de “limites planetários seguros” (“*planetary boundaries*”), que trata da questão da sustentabilidade ambiental global. Esse conceito discute os limites operacionais seguros para a humanidade em relação a questões críticas decorrentes da ocupação humana na Terra. Rockström et al. (2009a, 2009b) iniciaram esse debate com dois artigos que geraram polêmica, enquanto, recentemente, Steffen et al. (2015) revisaram o quadro dos limites planetários. Nesses trabalhos, tais limites planetários seguros foram avaliados para nove parâmetros relevantes:

- 1) mudanças climáticas;
- 2) perda de ozônio estratosférico;
- 3) acidificação dos oceanos;
- 4) ciclos biogeoquímicos de nitrogênio e fósforo;
- 5) mudanças na integridade da biosfera associadas à perda de biodiversidade;
- 6) mudanças no uso do solo;
- 7) uso de recursos hídricos;
- 8) carga de partículas de aerossóis na atmosfera;
- 9) introdução de entidades novas e poluição química.

A questão em discussão envolve a forte interatividade entre esses parâmetros devido à integração dos processos que governam nosso planeta.

### Mudanças climáticas

Atualmente, não há mais dúvidas de que a composição da atmosfera está mudando devido às emissões de gases e aerossóis causadas pelas atividades antrópicas. Os limites relativos às mudanças climáticas foram amplamente discutidos nas últimas reuniões das Conferências das Partes (COPs) da United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), que ocorreram em Lima, Varsóvia, Doha, Durban, Cancún e Copenhague. A próxima COP será em Paris, em dezembro de 2015, onde se espera que um acordo climático global que limite a emissão de gases de efeito estufa seja assinado.

Hoje, as atividades humanas emitem para a atmosfera cerca de 9,3 PgC por ano (1 PgC corresponde a 1 bilhão de toneladas de carbono), causando um aumento da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> de 2 ppm (partes por milhão) por ano (Forster et al., 2007). Desde 1850, as concentrações de CO<sub>2</sub> aumentaram em 40%, as de CH<sub>4</sub>, em 158%, e as de N<sub>2</sub>O, em 20%. Há certo consenso em tentar limitar o aumento médio da temperatura global em 2 graus centígrados a partir do nível pré-industrial. O “limite” de 2 graus centígrados foi assumido levando em conta aspectos científicos e políticos. Os aspectos científicos foram baseados nas projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), que ponderam os possíveis danos aos ecossistemas, o aumento médio do nível do mar e outras variáveis *versus* o que é possível ser feito a curto e médio prazo em termos de redução de emissões de gases de efeito estufa.

Esse “limite” de 2 graus centígrados inclui danos importantes em vários aspectos das mudanças globais e não pode ser considerado “seguro” (Richardson et al., 2009). O limiar foi estruturado sem que se levasse em conta possíveis mudanças não lineares, irreversíveis ou abruptas no sistema climático terrestre, tais como desestabilização da capa de gelo da Groenlândia ou Antártica, ou alterações na circulação termohalina. Atualmente, a forçante radiativa está em 2,29 w/m<sup>2</sup> (IPCC, 2013; Boucher et al., 2013) e a concentração de CO<sub>2</sub> próxima a 400 ppm. O sistema climático está saindo dos valores típicos do Holoceno, com um aumento médio já observado de 1 grau centígrado, em média, desde 1750 (IPCC, 2013). Uma maneira de definir o limite para mudança climática é através da forçante radiativa global ou da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférica. Steffen et al. (2015) propõem uma concentração máxima de 350 ppm de CO<sub>2</sub> e uma forçante radiativa de 1 w/m<sup>2</sup> relativa à era pré-industrial.

Todavia, é importante frisar que não temos evidências científicas seguras de que, limitando as concentrações de CO<sub>2</sub> em 350 ppm, evitaríamos o colapso das camadas de gelo polares, pois ainda não há uma compreensão completa da ciclagem de carbono global. Teríamos também que

reduzir as emissões dos demais gases de efeito estufa, tais como  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{O}_3$ . Esses limites propostos ( $\text{CO}_2$  em 350 ppm ou forçante radiativa em  $1 \text{ w/m}^2$ ) já foram excedidos, o que tem levado a um aumento de intensidade e frequência nos eventos climáticos extremos, como secas, furacões e chuvas intensas.

## Perdas de ozônio estratosférico

O ozônio naturalmente presente na estratosfera filtra a radiação ultravioleta solar que incide sobre a superfície terrestre. Uma combinação de aumento na concentração de substâncias feitas pelo homem, os clorofluorcarbonos com cristais de gelo em nuvens estratosféricas, destrói parcialmente as moléculas protetoras de ozônio na estratosfera. Essa radiação ultravioleta em excesso causa danos no DNA de todos os seres vivos expostos a ela. É difícil estimar o dano de DNA aceitável, pois seus efeitos dependem dos organismos, da cobertura de nuvens e de outros aspectos. Valores limites da ordem de 5% de decréscimo na coluna de ozônio estratosférico com relação aos valores de 1964-80 foram considerados como limite possível em Rockström et al. (2009), enquanto Steffen et al. (2015) recomendam um limite de concentração de coluna de  $\text{O}_3$  de 275 DU (Dobson Units). Contudo, temos que admitir que ambos os valores são arbitrários. Observamos também que ações tomadas pela implementação do Protocolo de Montreal estão limitando a redução do ozônio estratosférico, e até uma certa recuperação da camada de ozônio tem sido observada em algumas regiões.

## Acidificação dos oceanos

O aumento da concentração atmosférica de  $\text{CO}_2$  e sua parcial solubilidade na alcalina água do mar levam a uma absorção de  $\text{CO}_2$  atmosférico pelos oceanos. Cerca de 33% das emissões atmosféricas humanas de  $\text{CO}_2$  atualmente são absorvidas pelos oceanos através da sua dissolução na água do mar e absorção de carbono pela biota marinha. A pressão parcial de  $\text{CO}_2$  na coluna de água do mar aumentou significativamente nas últimas décadas, e esse composto químico, combinado com a água

do mar, forma compostos ácidos que aumentam a acidez dos oceanos. Nos últimos 200 anos, a acidez dos oceanos (medida pela concentração de íons  $\text{H}^+$ ) aumentou cerca de 30%, em média, enquanto a concentração de carbonatos caiu 16% desde a era pré-industrial. Muitos animais marinhos são sensíveis a alterações da acidez oceânica, pois eles secretam carbonato de cálcio na forma de aragonita e calcita, que se dissolvem em meio mais ácido. Os corais e o plâncton marinho também são particularmente sensíveis ao aumento da acidez.

Como a cadeia alimentar oceânica é muito complexa e interdependente, essas alterações afetam toda a biota marinha. Além do aquecimento oceânico, a eutroficação (excesso de nutrientes causado por uso excessivo de fertilizantes) coloca uma grande pressão nos ecossistemas marinhos. A definição dos limites, nesse caso, é particularmente difícil, mas definida como sendo uma diminuição no estado de saturação de aragonita de 80% do valor pré-industrial.

## Ciclos biogeoquímicos de nitrogênio e fósforo

A utilização em larga escala de fertilizantes permitiu o aumento da produtividade agrícola nos últimos séculos, mas o excesso na utilização de nitrogênio (N) e fósforo (P) faz com que a quantidade adicionada pelas atividades agrícolas hoje seja maior do que a ciclagem natural desses elementos. A eutrofização causada por esses elementos em excesso pode levar ecossistemas aquáticos e marinhos a alterar de modo não linear o funcionamento de sistemas terrestres, aquáticos e marinhos. O uso total atual de P em fertilizantes utilizados na agricultura é de 14,3 Tg por ano. O excesso de P nos oceanos pode levar a eventos anóxicos, removendo oxigênio e afetando de modo drástico a vida oceânica. Baseado na razão de N/P e na prevenção de eutrofização de ecossistemas aquáticos, estima-se que os limites de uso de fósforo sejam da ordem de 6,2 Tg por ano e de nitrogênio, de 73 Tg por ano. Temos evidências de que a deposição de aerossóis está tendo efeitos sobre a ciclagem de nutrientes mesmo na Amazônia, uma região ainda relativamente não perturbada por ações antrópicas (Artaxo et al., 2013, 2014).

## Mudanças na integridade da biosfera associadas à perda de biodiversidade

A diversidade genética fornece a capacidade em longo prazo de a vida em nosso planeta se adaptar a mudanças abióticas tais como temperatura, salinidade, radiação e outros fatores. A perda da biodiversidade afeta negativamente o sistema terrestre, aumentando a vulnerabilidade de ecossistemas terrestres e marinhos a mudanças no clima e na acidez oceânica, entre outros efeitos. Ao longo dos últimos séculos, muitas espécies foram extintas devido ao impacto humano tanto nos ecossistemas terrestres como nos oceanos. É possível a construção de um índice de integridade biológica que indique mudanças na população de espécies como resultado da ação humana. Uma possível medida é a perda de variabilidade de espécies filogenéticas (Mace et al., 2014; Helmus et al., 2007).

Em princípio, o limite às mudanças na integridade da biosfera deveria ser colocado a um valor próximo da razão de perda da biodiversidade ao longo do Holoceno, mas essa razão não é conhecida. Estima-se que esse limite possa ser definido como a extinção de 10 espécies por milhão de espécies por ano. Outra possível abordagem seria definir um índice tal como o Biodiversity Intactness Index (BII), que indica a mudança na biodiversidade advinda de impactos humanos, tais como mudanças de uso de solo, acidez oceânica, etc. A abundância na era pré-industrial poderia

ser utilizada como referência. Estudos realizados em várias áreas indicam que esse índice varia de 69% a 91% (Scholes & Biggs, 2005). Um limite preliminar de 90% foi estimado para esse índice após uma análise de vários trabalhos recentes. Entretanto, as incertezas na área são significativas, já que as interações entre as espécies e os ecossistemas são enormes. Também existem fortes efeitos não lineares entre a extinção de espécies e as mudanças ambientais globais, que ainda não são completamente compreendidos. Algumas espécies têm maior capacidade de adaptação do que outras.

## Mudanças no uso do solo

Todos os biomas terrestres sofreram importantes mudanças no uso do solo, incluindo florestas, savanas, tundras, etc. Os avanços na agricultura nos últimos séculos fazem com que hoje tenhamos cerca de 12% da área do planeta dedicada a cultivos (Foley et al., 2005). O caso de mudanças no uso de solo é importante, pois está fortemente associado à produção de alimentos e influencia outros limites, tais como biodiversidade, uso de água, clima e outras variáveis. Mudanças no uso do solo alteram o albedo da superfície terrestre, através, por exemplo, da retirada de florestas e da implementação de pastagens ou cultivos, e as estimativas são de uma forçante radiativa de  $-0,15 \text{ w/m}^2$  de 1750 a 2011. Esse efeito é de resfriamento do planeta, pois uma floresta absorve mais radiação solar do que uma área de pastagem, que é mais escura.



Na pastagem, uma fração maior da radiação solar é refletida ao espaço. O limite para o uso do solo pode ser estruturado lembrando-se que sua ligação com a produção de alimentos é forte, e que a eficiência de produção de alimentos por hectare é muito grande em nosso planeta. Esforços são feitos para aumentar a produtividade agrícola, intensificando sistemas agropecuários nas áreas mais férteis, mantendo florestas essenciais para o funcionamento do ecossistema terrestre preservadas, e mantendo solos que são ricos em carbono em sua condição a menos perturbada possível. É proposto um limite de 15% da área global sem gelo para uso da humanidade. Estamos em 12% atualmente, e isso permite uma ampliação de 3% da área agricultável em nosso planeta, que deve ser realizada em conjunto com o aumento da produtividade agrícola global.

## Uso de recursos hídricos

Água é um recurso natural essencial para os seres humanos, a biota e os ecossistemas. Mesmo sendo um bem essencial, a água não é distribuída equitativamente em nosso planeta, com fortes variações sazonais e decadais, e em várias regiões se tornou um bem precioso e escasso. A questão do uso da água tem aspectos regionais e locais que a faz difícil de ser caracterizada globalmente. Cada bacia hidrográfica tem os seus próprios limites de exploração e suas características, que variam sazonalmente e com fortes alterações decadais. Algumas bacias hidrográficas, como as do Rio Nilo, na África, Rio Amarelo, na China, Rio Colorado, nos Estados Unidos e México, e outras, estão sofrendo poluição excessiva, forte competição por uso de água e degradação do ecossistema.

O uso de água para agricultura visando à produção de alimentos é uma das maiores pressões na maior parte das bacias hidrográficas afetadas, mas a água é também essencial para manutenção de florestas, manutenção da biodiversidade e sequestro de carbono, entre outras questões. Em muitas áreas densamente ocupadas, o uso de água excedeu a capacidade de recarga, comprometendo a qualidade e o fluxo necessários. Em outras áreas, onde temos muita água, como na Amazônia, aspectos climáticos e logísticos limitam o seu uso

para agricultura e outras atividades. A manipulação global de recursos aquáticos afeta a produção de alimentos, a biodiversidade, o clima e o funcionamento ecológico, a segurança hídrica, etc. Em geral, separamos a água em três componentes: 1) a chamada “água azul”, que consiste em rios, lagos e água subterrânea; 2) a “água verde”, que é armazenada no solo como umidade; 3) os chamados “fluxos de água verde”, que são o transporte de umidade pela atmosfera.

Estimativas indicam que 90% dos fluxos de água verde são necessários para manter os serviços dos ecossistemas, enquanto de 20% a 50% da água azul é necessária para manter o sistema hídrico de lagos e rios em funcionamento. O fluxo de água verde influencia a quantidade de água azul através do transporte da umidade de chuvas. É estimado que o uso de aproximadamente 4.000 km<sup>3</sup> por ano de água seja um limite para a humanidade, para que se possa evitar o colapso de bacias hidrográficas importantes. Atualmente, a humanidade usa cerca de 2.600 km<sup>3</sup> por ano, o que indica que temos um certo espaço de crescimento, mas a pressão por recursos aquáticos está aumentando significativamente, principalmente no setor da agricultura e no fornecimento à população urbana global. Estima-se que o uso de água verde na agricultura seja hoje de 5.000 km<sup>3</sup> por ano, e tenha que aumentar 50% em 2030 para fornecer segurança alimentar ao nosso planeta (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, 2007).

## Carga de partículas de aerossóis na atmosfera

Além do aumento de emissões de gases de efeito estufa, também observamos um forte aumento de emissões de partículas de aerossóis que afetam uma série de processos atmosféricos (Forster et al., 2007). As partículas de aerossóis têm fortes efeitos no balanço radiativo terrestre, como resfriamento atmosférico pelo espalhamento da radiação solar, tendo uma forçante radiativa negativa (de resfriamento do clima) estimada em -0,82 w/m<sup>2</sup>. Parte dessa componente é devida aos efeitos do aerossol antropogênico nos mecanismos de produção e desenvolvimento de nuvens, o chamado efeito indi-

reto dos aerossóis no clima, que, na região amazônica, é particularmente intenso com as alterações atmosféricas causadas por emissões de queimadas (Andreae et al., 2004).

As partículas de aerossóis têm também um forte efeito negativo na saúde da população, sendo responsáveis por um número estimado de 7,2 milhões de mortes por ano (WHO, 2012). Os aerossóis afetam o funcionamento do sistema climático global de muitas maneiras (Boucher et al., 2013), e uma maneira de medir a carga de aerossóis na atmosfera é através da espessura óptica de aerossóis (AOD), que mede a quantidade total de partículas de aerossóis na coluna atmosférica. O valor de *background* global é uma AOD de 0,15. A média anual global atual é de 0,30, e o valor na Amazônia durante a estação chuvosa é de 0,10 (Sena et al., 2013). Está sendo proposto como limite para a carga de aerossóis na atmosfera uma AOD de 0,25.

## Introdução de entidades novas e poluição química

Um grande número de novas substâncias é desenvolvido a cada ano, e em geral seus impactos ambientais só vão ser conhecidos muitos anos depois de serem utilizados. Novos compostos químicos, novos materiais e novos organismos não existentes em nosso planeta, bem como metais pesados e poluentes orgânicos persistentes mobilizados pela ação do homem, podem se tornar uma ameaça à sustentabilidade da Terra. Esses riscos foram observados quando os CFCs (clorofluorcarbonos) foram introduzidos no ambiente global como gases refrigerantes ou de uso industrial, e posteriormente descobriu-se que causavam danos à camada de ozônio estratosférico. Atualmente, mais de 100 mil substâncias químicas são produzidas pelas atividades industriais, e seus efeitos físico-químicos são em larga escala não avaliados propriamente, o que constitui um risco potencial.

A toxicidade da maior parte desses compostos é desconhecida. Poluição química pode afetar a biodiversidade, como, por exemplo, a emissão de mercúrio na queima de carvão ou a emissão industrial de poluentes orgânicos persistentes (POPs). Muitos compostos são neurotóxicos e mutagêni-

cos, tais como metil mercúrio, chumbo, arsênico, PCBs, benzeno, tolueno, e muitos outros. As lições das emissões de DDT, dioxinas, pesticidas e outros compostos no meio ambiente mostram a necessidade de desenvolver melhores protocolos de proteção ao nosso planeta. Não existe ainda um sistema global que avalie os riscos de poluição química em larga escala, o que é fundamental para que a sociedade saiba como mitigar as emissões potencialmente perigosas ao meio ambiente e à vida no planeta.

## OS LIMITES PLANETÁRIOS E ONDE ESTAMOS ATUALMENTE

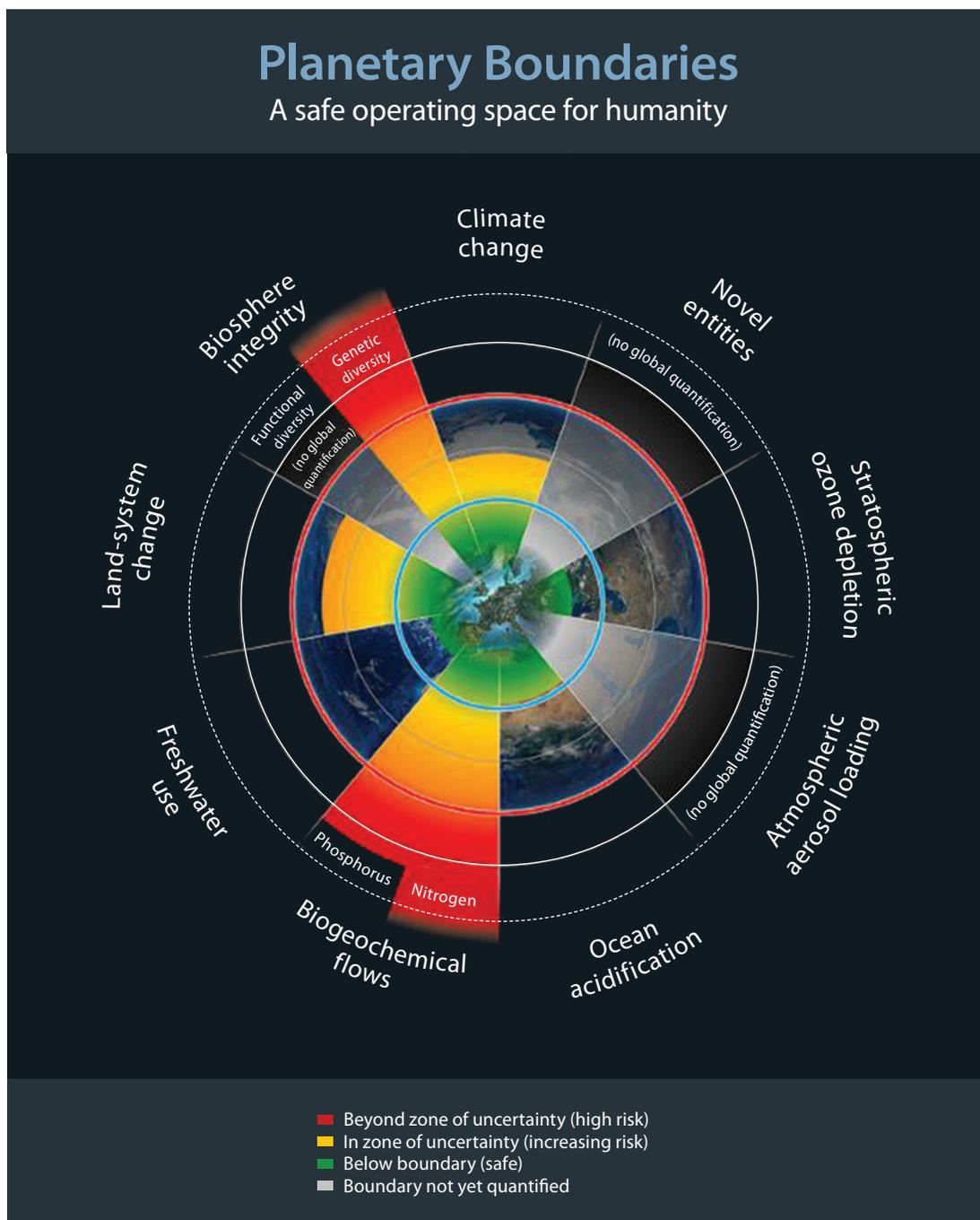
Onde nos situamos diante de todas essas questões de nosso planeta? Essa questão da definição dos limites planetários e a nossa atual colocação foram discutidas em várias publicações, como, por exemplo, em Running (2012) e Steffen et al. (2015). Uma dificuldade na quantificação está no fato de que os limites nas nove questões ambientais globais são interconectados. O planeta atua como entidade integrada e única, com interconexões em praticamente todas as áreas de risco. A Figura 2 ilustra um diagrama dos limites planetários com uma qualificação de onde estamos atualmente em cada aspecto discutido. Já ultrapassamos os limites na perda de biodiversidade, adição de nitrogênio e fósforo, e estamos nos aproximando dos limites nas áreas de mudanças climáticas e mudança de uso do solo. Três processos nos quais ainda não é possível quantificar adequadamente são mostrados em cinza: carga de aerossóis atmosféricos, perda de biodiversidade funcional e novos riscos, tais como poluição química. Esses limites e a avaliação de sua posição atual são uma primeira indicação, e deverão ser aprimorados conforme a ciência avança.

A discussão dos limites seguros de nosso planeta mostra que existe a possibilidade de que, ultrapassando os limites físicos de nosso planeta, podemos desestabilizar o relativamente estável clima que tivemos no Holoceno. Dois dos limites, mudanças climáticas e integridade da biosfera, estão em situação tão crítica que necessitam de medidas urgentes para a estabilização

das condições de sustentabilidade na Terra. As pressões sociais, econômicas e ambientais vão aumentar nas próximas décadas, e precisamos urgentemente de um sistema de governança glo-

bal para superar esses desafios. Essa tarefa pode demorar muitas décadas, por isso precisamos iniciar esse processo o mais rápido possível. O tempo corre contra a humanidade.

FIGURA 2



Estimativa da posição atual dos limites planetários desde a época pré-industrial até a atualidade. A área verde é considerada segura, no espaço operacional terrestre; a área em amarelo indica a entrada na zona de incerteza; e a área em vermelho é a região de alto risco. As variáveis de controle foram normalizadas para comparação. Três processos que ainda não é possível quantificar adequadamente são mostrados em cinza: carga de aerossóis atmosféricos, perda de biodiversidade funcional e novos riscos, tais como poluição química. Fonte: Steffen et al. (2015a). Disponível em: <https://agenda.weforum.org/wp-content/uploads/2015/01/slika2.jpg>. Discutido em Rockström et al. (2009) e Steffen et al. (2015a, 2015b)

## BIBLIOGRAFIA

- ANDREAE, M. O. et al. "Smoking Rain Clouds Over the Amazon", in *Science* 303, 2004, pp. 1.337-42.
- ARTAXO, P. et al. "Atmospheric Aerosols in Amazonia and Land Use Change: from Natural Biogenic to Biomass Burning Conditions", in *Faraday Discussions*, 165, 2013, pp. 203-35.
- ARTAXO, P. et al. "Perspectivas de Pesquisas na Relação entre Clima e o Funcionamento da Floresta Amazônica", in *Ciência e Cultura*, ISSN 2317-6660, v. 66, n. 3, 2014, pp. 41-6.
- BOUCHER, O. et al. "Clouds and Aerosols", in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by T. F. Stocker et al. United Kingdom/New York, Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
- COMPREHENSIVE Assessment of Water Management in Agriculture. *Water for Food, Water for Life: a Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. London, Earthscan and International Water Management Institute, 2007.
- CRUTZEN, P. J. "Geology of Mankind", in *Nature*, 415, 23, 2002.
- FOLEY, J. A. et al. "Global Consequences of Land Use", in *Science* 309, 2005, pp. 570-4.
- FORSTER, P. et al. "Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing", in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by S. Solomon et al. Cambridge, Cambridge University Press, 2007.
- HELMUS, M. R. et al. "Phylogenetic Measures of Biodiversity", in *Am. Nat.*, v. 169, n. 3, 2007, pp. E68-E83.
- IGBP – International Geosphere-Biosphere Programme. Great Acceleration. Disponível em: <http://www.igbp.net/globalchange/greatacceleration.4.1b8ae20512db692f2a680001630.html>. Acesso em: 20/2/2015.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Special report of Working Groups I and II of the IPCC. Edited by C. B. Field et al. Cambridge, Cambridge University Press, 2012.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Prepared by L. Alexander et al. IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland, 2013.
- MACE, G. M. et al. "Approaches to Defining a Planetary Boundary for Biodiversity", in *Glob. Environ. Change*, 28, 2014, pp. 289-97.
- REDMAN, C. L. *Human Impact on Ancient Environments*. Tucson, AZ, University of Arizona Press, 1999, 239 pp.
- RICHARDSON, K. et al. "Synthesis Report. Climate Change: Global Risks, Challenges & Decisions", in *Summary of the Copenhagen Climate Change Congress*, 10-12 March 2009. Copenhagen, University of Copenhagen, 2009.
- ROCKSTRÖM, J. et al. "A Safe Operating Space for Humanity", in *Nature*, 461, 2009, pp. 472-5.
- ROCKSTRÖM, J. et al. "Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity", in *Ecol. Soc.*, 14, 32, 2009.

- RUNNING, S. W. "A Measurable Planetary Boundary for the Biosphere", in *Science*, 337, 2012, pp. 1.458-9.
- SHELLNHUBER, Hans-Joachim et al. *Earth System Analysis for Sustainability*. Dahlem Workshop Report, 2004.
- SCHOLES, R. J.; BIGGS, R. "A Biodiversity Intactness Index", in *Nature*, 434, 2005, pp. 45-9.
- SENA, E. T.; ARTAXO, P.; CORREIA, A. L. "Spatial Variability of the Direct Radiative Forcing of Biomass Burning Aerosols and the Effects of Land Use Change in Amazonia", in *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 2013, pp. 1.261-75.
- STEFFEN, W. et al. *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. The IGBP Book Series, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
- STEFFEN, W.; CRUTZEN, J.; MCNEILL, J. R. "The Anthropocene: Are Humans now Overwhelming the Great Forces of Nature?", in *Ambio*, v. 36, n. 8, 2007, pp. 614-21.
- STEFFEN, W. et al. "Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet", in *Science*, v. 347, 2015a, pp. 736-46.
- STEFFEN, W. et al. "The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration", in *The Anthropocene Review*, 1-18, 2015b.
- WHO – World Health Organization. Burden of Disease from the Joint Effects of Household and Ambient Air Pollution for 2012. [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/databases/AAP\\_BoD\\_results\\_March2014.pdf](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/AAP_BoD_results_March2014.pdf).