

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”**

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E GLOBAIS: UMA ANÁLISE DO PAPEL
DO SER HUMANO E DAS RESPOSTAS EVOLUTIVAS DA
BIODIVERSIDADE**

LUCAS ARANTES GARCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”,
Universidade de São Paulo, para obtenção do título de
Bacharel em Gestão Ambiental.

**Piracicaba
2016**

LUCAS ARANTES GARCIA
Graduando em Gestão Ambiental

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E GLOBAIS: UMA ANÁLISE DO PAPEL DO SER
HUMANO E DAS RESPOSTAS EVOLUTIVAS DA BIODIVERSIDADE**

Orientadora:
Prof.^a. Dr.^a **SILVIA MARIA GUERRA MOLINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Bacharel em Gestão Ambiental.

Piracicaba
2016

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Dr.^a Silvia M.G. Molina, pela dedicação e confiança. Por ser exemplo como professora e pessoa, inspirando graduandas e graduandos a serem melhores versões de si.

À Flávia e Joyce, amigas de coração para a vida. Por tornarem os desafios mais suaves e os momentos de alegria mais verdadeiros.

Ao PET-GAEA e os incontáveis amigxs que o grupo me permitiu conhecer. Assim como por me ensinar os valores do trabalho em equipe, da união e da inteligência emocional

À Ariane, Jackeline, Jéssica, Júlia, Karen, Rebeca e Wesley, por suas inestimáveis amizades que levarei por onde for.

Ao Prof. Dr. Evaristo M. Neves, eterno tutor do PET-GAEA, pelo exemplo como pessoa e profissional.

À Lajy e seus moradores, que me fizeram sentir mais próximo de casa.

À Piazada, que me acompanhou no desafio e sonho do intercâmbio, possibilitando amizades para a vida.

E à minha família, pela compreensão e amor incondicional, sem os quais jamais conseguiria ter concluído a graduação e todos os demais desafios. Pela certeza de que a distância e o tempo só fortalecem o carinho e a gratidão que tenho por vocês.

.

“I wish it need not have happened in my time,” said Frodo.
“So do I,” said Gandalf, “and so do all who live to see such times.
But that is not for them to decide.
All we have to decide is what to do with the time that is given us.”

— J.R.R. Tolkien, *The Fellowship of the Ring*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	2
LISTA DE QUADRO E TABELAS	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUÇÃO	6
2. HIPÓTESES	9
3. OBJETIVOS	10
3.1 OBJETIVOS GERAIS	10
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
4. METODOLOGIA	11
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
5.1 O Universo e o Sistema Terra.....	12
5.1.1 Efeito Estufa.....	12
5.1.2 Terra Primitiva.....	13
5.1.3 Cronogeologia	17
5.1.4 Mudanças Climáticas	27
5.1.5 Extinções	29
5.2 A Biodiversidade	36
5.2.1 O Caso da América do Sul	37
5.2.2 As Extinções e a Biologia Evolutiva	39
5.2.3 Biodiversidade e as Mudanças Climáticas.....	41
5.3 O <i>Homo sapiens</i>	44
5.3.1 O Antropoceno.....	46
5.3.2 O que temos feito	55
5.3.3 O que podemos fazer.....	62
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
Epílogo	77
6. REFERÊNCIAS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – a) Estromatólitos (esquerda); b) Trilobitas (direita).....	20
Figura 2 – Florestas pantanosas características do Carbonífero.	22
Figura 3 – O supercontinente pangeia já em processo de separação.	23
Figura 4 – A competição entre os reptéis e aves voadoras.....	24
Figura 5: concentração média de CO ₂ mensal.....	28
Figura 6 – Influências dos traços individuais na propensão à extinção.	31
Figura 7 – Número de espécies categorizados por peso da África e América do Sul.	38
Figura 8 – Respostas do Sistema da Terra à crescente pressão antrópica: a. fixação de nitrogênio; b. extinções de espécies; c. temperatura da superfície terrestre no Hemisfério Norte; e d. concentração atmosférica de CO ₂	45
Figura 9 – Crescimento populacional dos anos 1000 a 2000 em bilhões de pessoas.	46
Figura 10 - Produto Interno Bruto Real do mundo (em 100 bilhões de dólares), refletindo o aumento do consumo característico do estilo de vida consumista.	46
Figura 11 – Percentual de extinções cumulativas de vertebrados do percentual de espécies avaliados pela IUCN, sendo A sob análise altamente conservadora e B conservadora.....	53
Figura 12 – Interações entre as atividades humanas e diferentes esferas do Sistema Terra.	55
Figura 13 – Metodologias conservacionistas conforme nível de modificação ambiental.	57
Figura 14 – Escala de tempo com os anos de destaque para as Negociações do Clima.	57
Figura 15 – Motivadores Próximos e Definitivos das transformações humanas na Terra.....	64
Figura 16 – Terra vista de Saturno pela sonda Cassini.	77

LISTA DE QUADRO E TABELAS

Quadro 1 – Principais períodos geológicos baseados no Gráfico Cronoestratigráfico Internacional.	18
Tabela 1 – Características biológicas mencionadas na literatura como responsáveis por aumentar o risco à extinção.	30
Tabela 2 – Duração média estimada das espécies a partir de correspondentes fósseis.	32

RESUMO

Sem dúvida a vida em suas mais diversas formas é algo admirável, não somente pela diversidade proporcionada pela biologia evolutiva, mas por sua raridade. Ainda que improvável que estejamos no único planeta que abriga vida no Universo, até o momento somos os únicos confirmados. Isso ocorre devido aos fatores únicos sob os quais a Terra se encontra, o que possibilitou, sob circunstâncias e tempo certos, o surgimento da vida como conhecemos.

Desse modo, um dos processos essenciais à nossa existência é o Efeito Estufa, responsável por manter o planeta a temperaturas adequadas para a vida. Ainda que eventos extremos como as extinções em massa tenham ocorrido e demonstrando a fragilidade da condição da vida, a magnitude dos processos do Sistema Terra nos dão a impressão de invulnerabilidade. No entanto, à medida que, como espécie, nós humanos buscamos estratégias adaptativas a fim de sobreviver e maximizar nossa qualidade de vida, alcançamos um aumento exponencial de nossa capacidade numérica e, conseqüentemente, do nosso potencial em impactar o Ecossistema.

Às conseqüências de nossas alterações no Sistema Terra denominamos de Mudanças Globais. Globais porque envolvem além das Mudanças Climáticas, também os impactos nos demais sistemas, como a conversão das superfícies terrestres para fins agropastoris e o aumento das taxas de extinção dos seres vivos com os quais compartilhamos o planeta, em 100 a 1000 vezes. Sob essa perspectiva, muitos cientistas defendem o reconhecimento de um novo Período que corresponda à influência humana, o Antropoceno.

Com o intuito de reparar e mitigar os efeitos colaterais de nosso “sucesso evolutivo”, diversas estratégias de gerenciamento têm sido propostas. Nesse sentido, Chefes de Estado vêm gradualmente mostrando reconhecimento das Mudanças Globais e crescente compromisso em propor políticas públicas sustentáveis. No entanto, permanecemos dependentes da vontade dos controladores do poderio econômico, que invariavelmente mudam ao longo dos anos, assim como o posicionamento de seus Estados. Com essa inconstância e fragilidade, resta-nos promover reflexões que busquem repensar nossa postura *carpe diem* em detrimento de um futuro com qualidade de vida. Devemos buscar causas que nos unam como habitantes do planeta Terra enquanto nos comprometemos com pequenas contribuições individuais a nosso alcance. Com isso, poderemos nutrir esperança por um tempo além da Era Moderna, que repense o papel do ser humano e seja sustentada por quatro grandes aspirações: a paz, a liberdade, o bem-estar material e a saúde ambiental.

Palavras-chave: Antropoceno; Mudanças Globais; Mudanças Climáticas; Biologia Evolutiva

ABSTRACT

Without a doubt life in its most diverse forms is something wonderful, not only for the unique diversity provided by evolutionary biology, but for its rarity. Although it is unlikely that we are in the only planet that harbors life in the Universe, until the moment we are the only confirmed ones. This is due to the unique factors that Earth finds itself, which has made possible the emergence of life as we know under the right circumstances and the required time.

Hence, one of the processes essential to our existence is the Greenhouse Effect, responsible for keeping the planet at appropriate temperatures for life. Although extreme events such as mass extinctions have occurred, demonstrating the fragility of life's condition, the magnitude of the Earth System's processes give us the impression of an invulnerability. However, as we sought adaptive strategies to survive and maximize our quality of life, we achieved an exponential increase in our numerical capacity and consequently our potential to impact the Ecosystem.

To the consequences of our changes in the Earth System we call Global Changes. Global because it involves beyond Climate Change, but also impacts on other systems, such as the conversion of land surfaces for agricultural and livestock purposes and the increase in extinction rates from 100 to 1000 times of the living beings that we share the planet. From this perspective, many scientists advocate for a new Era that recognizes human's influence, the Anthropocene.

In order to repair and mitigate the side effects of our "evolutionary success", several management strategies have been proposed. In addition to that, Heads of State have shown gradual recognition of Global Changes and a growing commitment to propose sustainable public policies. However, we remain dependent on the will of the economic power controllers, which invariably change over the years, as well as what their States stand for. No entanto, permanecemos dependentes da vontade dos controladores do poderio econômico, que invariavelmente mudam ao longo dos anos, assim como o posicionamento de seus Estados. With this inconstancy and fragility, we need to promote reflections that seek to rethink our *carpe diem* posture to the detriment of a future with quality of life. We must seek causes that unite us as inhabitants of planet Earth as we commit ourselves to small individual contributions within our reach. With this, we can nurture hope for a time beyond the Modern Era, which rethinks the role of the human being and is sustained by four great aspirations: peace, freedom, material well-being and environmental health.

Keywords: Anthropocene; Global Change; Climate Change; Evolutionary Biology

1. INTRODUÇÃO

O Efeito Estufa (EE) refere-se a um fenômeno natural essencial para o surgimento da vida em nosso planeta há 3,5 bilhões de anos e sua sobrevivência desde então (Schopf, 2001 apud; Bada, 2004). Segundo a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), sendo o terceiro planeta no Sistema Solar, na ausência do Efeito Estufa, a temperatura média da Terra seria próxima de -18°C . Isso tornaria o surgimento e a perpetuação dos primeiros seres vivos como conhecemos improvável. Já com o aquecimento proporcionado pelo mesmo fenômeno, a temperatura média da Terra é aproximadamente 15°C (Ma, 1998; Grinspoon, 2016).

No entanto, mesmo um fenômeno essencial à vida como este, quando em proporções extremas, torna-se catastrófico à muitas das formas de vida como conhecemos, incluindo nós mesmos. Um exemplo desse efeito ocorre em Vênus. Tido como o “irmão da Terra”, o planeta possui características similares como massa, densidade e até mesmo o material de origem. No entanto, enquanto o “planeta azul” possui uma atmosfera com concentração de CO_2 de 0,05%, em Vênus esse valor é de 96,5%, o que explica a temperatura média na superfície do planeta ser de aproximadamente 470°C (Walker, 1975; Williams, 2016). No entanto, para chegar a essa temperatura, um processo lento e complexo ocorreu, promovido pela proximidade relativa com o Sol. Esse fato levou ao fenômeno chamado efeito estufa de escape (*runaway greenhouse effect*), um *loop* de retroalimentação positiva¹ que resultou na densa atmosfera atual de Vênus (Walker, 1975). Milhares de anos teriam que se passar para que o Sol promovesse efeito similar na Terra. No entanto, tratando-se de fenômenos com potencial de causar significativos impactos na qualidade de vida humana e de outras espécies, as atividades antrópicas têm sido suficientes para alterar os ciclos naturais da Terra de tal maneira e extensão que estudiosos temem um futuro incerto e problemático nesse sentido (Grinspoon, 2016; Zolnerkevic, 2016).

Neste contexto, cientistas têm debatido a possibilidade do estabelecimento de uma nova Era geológica, o Antropoceno. Essa proposta surge ao assumir os seres humanos como força geológica capaz de causar Mudanças Globais. Mais especificamente, de alterar o funcionamento dos ecossistemas com magnitude o suficiente para deixar registros históricos nos testemunhos de gelo (*ice cores*), entre as camadas de rocha estratificada, entre outros (Zolnerkevic, 2016).

¹ *Loops* de retroalimentação (*feedback*): “Uma estrutura de feedback existe dentro de um Sistema quando uma determinada ação ou mudança de valor de uma variável é, mais tarde, influenciada pelas consequências desta mesma ação ou mudança. [...] O comportamento do Sistema está determinado pela estrutura de loops de feedback entre seus componentes”. *Loops* retroalimentação positivas amplificam o impulso inicial potencialmente puxando o processo de auto reforço em qualquer direção. *Loops* de retroalimentação negativas exercem influência de balanceamento ou neutralizadores de desvios no Sistema (Folledo, 2000).

Independentemente se os geólogos decretarão a existência do Antropoceno, como ser vivo *sapiens*, é evidente a necessidade de se preocupar com as consequências que as atividades antrópicas têm gerado no Sistema Terrestre ao aumentar a concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, ao converter a cobertura de imensas extensões de terras e assim não só comprometer nossa permanência no planeta, como de muitas outras formas de vida atuais.

Também chamado de Aquecimento Global, as Mudanças Climáticas (MC) caracterizam-se como uma das consequências à forma como os seres humanos têm utilizado os recursos naturais do planeta. Mais especificamente no que diz respeito à aceleração da ciclagem lenta dos reservatórios de Carbono. Alguns cientistas afirmam que as primeiras práticas de origem antrópica com capacidade de alterar o funcionamento do Efeito Estufa no longo prazo ocorreram com a “descoberta” do fogo no Paleolítico. Para outros, foi com o início do desmatamento e agricultura na China há cerca de 4000 anos ou ainda, após a I Revolução Industrial, 1720-1840 (Grinspoon, 2016). Independentemente de sua origem, a 21ª Conferência das Partes (COP 21) destaca-se como o ponto de inflexão mais recente em que as Nações aparentemente reconheceram as MC com a devida seriedade e firmaram importantes compromissos por meio do Acordo de Paris (ONU, 2015). Essa demora no comprometimento dos Estados se deve, principalmente, à predominância de indicadores econômicos em detrimento de critérios como qualidade de vida e ambiental. Pela ótica econômica, impactos que ocorrem em países insulares ou em grupos pertencentes a classes sociais “economicamente irrelevantes” são subvalorizados. Isso ocasiona um distanciamento da relação entre poluição pelas grandes economias mundiais e as consequências ocasionadas pelas Mudanças Globais.

Além de problemas éticos, utilizar majoritariamente indicadores econômicos como indicadores para implementar soluções eficazes é preocupante, pois nessa perspectiva desconsidera-se uma série de outros fatores de benefício indireto, como os serviços ecossistêmicos². O problema torna-se mais grave quando assumimos que não temos a capacidade de compreender a magnitude desses impactos no Sistema Terrestre, visto que, principalmente nos trópicos, pouco conhecemos da biodiversidade existente, especialmente determinados grupos como os invertebrados (Mckinney, 1997). Portanto, mesmo estimativas de perda de biodiversidade conservadoras estão baseadas em incertezas ocasionadas pela

² Serviços ecossistêmicos: benefícios que as pessoas obtêm da natureza de maneira direta ou indireta, por meio dos ecossistemas. Podem ser Serviços de Provisão (e.g. alimentos, água, madeira); Serviços de Regulação (e.g. controle do clima, polinização de plantas); Serviços Culturais (intangíveis, obtidos de maneira recreativa, educacional etc); Serviços de Suporte (e.g. ciclagem de nutrientes, dispersão de sementes) (Assessment, 2007).

complexidade do funcionamento desse Sistema (Corlett; Johansson e Dieckmann, 2009; Ceballos *et al.*, 2015).

Em síntese, as dimensões com que as relações ecológicas têm sofrido alterações ocorrem em tamanha magnitude que é preciso avaliar como a biodiversidade, e os próprios seres humanos, têm sido afetados pelas Mudanças Globais. Para isso, é preciso assumir o papel dos seres humanos como causa dessa problemática na busca pela compreensão de como esses processos têm ocorrido e identificar possíveis soluções para a questão.

2. HIPÓTESES

Sabemos pouco sobre a biodiversidade e o papel dos mecanismos evolutivos no contexto das Mudanças Climáticas. No que concerne às Mudanças Globais e o papel do ser humano, felizmente avanços têm ocorrido e refletido na adoção de compromissos na redução da emissão de GEE, por exemplo. Entretanto, é preciso garantir que os compromissos assumidos em eventos como a Convenção das Partes (COP) sejam legalmente vinculantes e passíveis de medidas punitivas em caso de descumprimentos. Da parte dos cidadãos, precisamos dar nossa contribuição ao comprometer em adotar medidas mais sustentáveis e, mais importante, trazer essas discussões para a agenda política dos representantes dos Estados, principalmente em épocas de campanha eleitoral.

Deste modo, como hipótese do presente trabalho, tem-se que é possível reverter a tendência de destruição da viabilidade da vida no planeta mediante adoção de medidas emergenciais de controle no nível governamental e conscientização de cidadãos e governantes.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho de conclusão de curso (TCC) tem por objetivo analisar o estado da arte das duas principais áreas de estudo escolhidas, mudanças globais e Biologia Evolutiva. Desse modo, pretende-se obter embasamento para responder às perguntas propostas, conforme listado nos objetivos específicos. O trabalho também possui o intuito de possibilitar ao autor embasamento nas áreas mencionadas para um futuro mestrado.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Analisar, ainda que de forma parcial, a magnitude dos impactos das Mudanças Globais sobre a biodiversidade e os seres humanos;
- Identificar algumas das relações ecológicas e mecanismos evolutivos que a biodiversidade utiliza como resposta às modificações em seu ambiente;
- Caracterizar o papel dos seres humanos como agente causador das Mudanças Climáticas;
- Avaliar as possíveis intervenções e políticas que almejam conservar, restaurar ou mitigar os impactos oriundos das atividades antrópicas no contexto das Mudanças Globais;

4. METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos realizou-se pesquisa bibliográfica e documental por meio do estudo das principais referências conhecidas pela comunidade científica, assim como artigos mais recentes tanto na área de Biologia Evolutiva quanto de Mudanças Globais, confrontando as informações obtidas com as questões apresentadas na introdução do presente trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 O UNIVERSO E O SISTEMA TERRA

*“We have a genetic kinship with all life on earth,
an atomic kinship to all matter in the cosmos.
So when I look at the universe, I feel large,
because I remind myself that not only are we living in this universe,
the universe is living within us.”*

— Neil DeGrasse Tyson

5.1.1 Efeito Estufa

Para melhor avaliarmos os processos que têm levado às mudanças climáticas na Terra, é preciso considerarmos em que consiste o Efeito Estufa e a dimensão que as atividades antrópicas têm atingido ao ponto de influenciarem tal fenômeno.

Na Terra, o EE atua da seguinte forma, os raios solares atravessam a atmosfera e alcançam a superfície da Terra, parte da radiação é absorvida pela vegetação, pelo solo e pelas superfícies líquidas, convertendo-se em energia térmica. O calor resultante desse processo é irradiado de volta ao espaço como radiação infravermelha de baixa intensidade. Assim como acontece na entrada desses raios, após a reflexão ocorrida na superfície, GEE presentes na atmosfera com capacidade de absorção do infravermelho (e.g. vapor de água e dióxido de carbono) reduzem a velocidade com que o calor é dissipado, permitindo aquecimento do planeta em maiores proporções e por um período de tempo mais longo (Rickfles, 2003).

Walker (1975) aponta que os planetas Terra e Vênus são muito similares em características como massa, densidade média, posição no sistema solar e até mesmo em seus respectivos materiais de origem. No entanto, ainda que o EE atue da mesma forma em ambos, a história evolutiva dos dois planetas foi fundamentalmente diferente, principalmente no que concerne à atmosfera. A de Vênus é significativamente mais densa e impede a saída do calor proveniente dos raios solares que penetram a superfície do planeta e não conseguem sair de forma eficiente (Walker, 1975). Na Terra, esse mesmo fenômeno é fundamental para manter a vida como a conhecemos, pois caso contrário a temperatura média em nosso planeta seria aproximadamente -18°C (Ma, 1998). Segundo Walker (1975), a alta temperatura encontrada em Vênus ocasionada pelo “super efeito estufa” não permite que determinadas reações aconteçam e que elementos importantes para a vida na Terra sejam encontrados no mesmo estado físico em Vênus.

Existem duas teorias principais que Walker (1975) destaca para explicar a história evolutiva do segundo planeta de nosso sistema solar. A primeira delas estabelece que a liberação

dos gases ocorreu “de forma instantânea”, elevando a temperatura a níveis altíssimos e de forma muito rápida. A segunda teoria propõe que o fenômeno mencionado, chamado de desgaseificação não ocorreu de forma tão rápida como na primeira teoria, mas que a proximidade relativa com o Sol já exerceu influência o suficiente para que impedisse a condensação de certos elementos fundamentais à vida, como o vapor de água. De qualquer maneira, o autor defende que ambas as teorias consideram a proximidade com o Sol como gatilho para que o efeito estufa de escape acontecesse e levasse o planeta Vênus em direção a seu estado atual, onde a vida nas formas orgânicas como conhecemos é impossível.

5.1.2 Terra Primitiva

De acordo com Bada (2004), após o período de acreção³ ocorrido na Terra, próximo da época de formação da Lua (aproximadamente 4,5 bilhões de anos atrás), o planeta era recoberto por um oceano de rocha líquida ou magma. No entanto, 100-200 milhões de anos após esse período, a temperatura do planeta já havia decrescido o suficiente para que água líquida fosse encontrada na superfície terrestre. Três fatores influenciaram para que a temperatura do planeta estivesse em torno de -40°C: o primeiro deles consistiu no fato da luminosidade provinda pelo Sol era cerca de 30% menor do que a atual; acrescido a isso, não havia um efeito estufa significativo o bastante para aumentar a temperatura terrestre para níveis próximos aos atuais; por fim, os dois fatores mencionados anteriormente resultaram em uma retroalimentação positiva que aumentou o albedo planetário⁴ para níveis que contribuíram para reduzir a temperatura terrestre na época. O conjunto desses fatores foi denominado como o Paradoxo do Sol Jovem e Fraco (*Faint Young Sun Paradox*).

Alguns cientistas sugerem que a razão pela qual a temperatura terrestre aumentou para níveis que permitissem sustentar a vida se deve aos elevados níveis de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. No entanto, teorias recentes contestam que, devido à relativa inatividade da ciclagem de sedimentos, a maior parte do carbono estaria “armazenada” na crosta e manto como carbonato de cálcio. Portanto, os níveis de carbono entre 2,45 a 2,22 milhões de anos atrás não eram suficientes para prevenir a continuidade da glaciação global. No entanto, argumenta-se que

³ Processo que deu origem à Terra e a outros planetas do Sistema Solar. Ocorre quando há colisões de diversos materiais dispersos pelo espaço. A colisão desses corpos celestes provoca acumulação de poeiras e gases que, à medida que aumentam de quantidade, adquire força gravitacional capaz de atrair mais matéria e assim por diante.

⁴ Razão entre a quantidade de luz difundida pela atmosfera ou superfície de um corpo celeste, p.ex. um planeta, e a quantidade de luz incidente sobre o mesmo.

fatores como o calor emitido por fontes geotérmicas e as propriedades únicas da água não permitiram com que todo o oceano fosse congelado, possibilitando que alguns redutos de vida sobrevivessem às condições adversas da época. Por fim, uma vez que a ciclagem de matéria entre o manto e a crosta se iniciou, foi só uma questão de tempo para que os ingredientes necessários à vida se acumulassem em condições propícias.

Uma discussão anterior a esta é quanto à origem de todo o volume de água atualmente existente na Terra. Alguns cientistas afirmam que isso se deveu exclusivamente ao fenômeno de desgaseificação de minerais hidratados presentes no manto. Outros defendem que sua origem foi externa ao planeta, trazido principalmente por cometas que se chocaram com a superfície terrestre. No entanto, assim como ocorre em muitos outros pontos a serem apresentados, o mais provável é que a resposta para a origem da água no planeta Terra seja uma combinação de ambas as teorias citadas.

Para Bada (2004), existem dois fatores fundamentais à vida na forma como a conhecemos: a presença de água líquida e de polímeros orgânicos. Basicamente, a água oferece condições ideais para que reações químicas aconteçam e os polímeros são necessários para que as principais funções biológicas de duplicação e catálise ocorram.

Para melhor compreendermos a origem da vida em nosso planeta podemos segmentar esse período em diversas fases: a fase de transição para química biótica primitiva – período Pré-Biótico ou Mundo Pré-RNA (*pre-RNA World*); o início do Mundo RNA, quando surgiram as moléculas capazes de autoduplicação; e a evolução para o Mundo DNA/Proteína (*DNA/Protein World*), ponto inicial para toda a vida moderna na Terra (BADA, 2004).

Dentre esses períodos, o ponto principal da história de origem encontra-se na transição de compostos orgânicos abióticos para moléculas autônomas de autoduplicação e de evolução por seleção natural. Para explicar esse processo, existem duas principais teorias que Bada (2004) apresenta:

- Teoria da Sopa Pré-biótica (*Prebiotic Soup Theory*) – a partir de uma variedade de compostos orgânicos simples presentes nos oceanos primitivos, macromoléculas complexas foram produzidas até que, eventualmente, surgiram aquelas capazes de catalisar, ainda que de modo imperfeito, sua própria duplicação. O fato dessa teoria fundamentalmente se baseia no acaso probabilístico desses processos ocorrerem é um ponto questionado pela comunidade científica como não sendo científico. No

entanto, Bada (2004) ressalta que foi justamente por eventos movidos pelo acaso que diversos acontecimentos na história evolutiva tornaram-se realidade.

- Teoria do Metabolismo (*Metabolist Theory*) – a teoria metabólica afirma que a origem da vida consistiu em nada mais do que uma cadeia contínua de minerais sulfuretos catalisadas por reações químicas autossustentáveis sem necessidade de informações genéticas. Alguns cientistas se referem a essa teoria como “vida como não a conhecemos”, uma vez que como a conhecemos, fundamentalmente baseia-se na química e informações genéticas.

Ainda que Bada (2004) ressalte sua preferência pela primeira teoria, o mesmo destaca que a segunda, baseada em reações auto catalíticas, não deve ser subestimada. Isso devido, principalmente, ao provável papel que tal processo deve ter tido no enriquecimento da Sopa Pré-Biótica, tornando as moléculas presentes naquele período aptas para as reações vindouras que o acaso possibilitaria.

Período Pré-Biótico

Foi nesse período que ocorreu a transição para a Química Biótica Primitiva (*Primitive Biotic Chemistry*) ou Mundo Pré-RNA. Porém, as explicações para que isso tenha ocorrido são variadas. A principal delas, defendida por Bada (2004), sugere que a emissão de gases reduzidos por erupções vulcânicas acompanhada de descargas atmosféricas constantes, foram responsáveis pela geração dos ingredientes que posteriormente teriam papel fundamental na síntese de moléculas orgânicas.

Uma teoria alternativa afirma que esses compostos orgânicos presentes na Síntese Inicial tiveram origem extraterrestres por meio de Partículas de Poeira Interplanetárias (IDPs em inglês), cometas e asteroides. Por mais díspar que essa teoria possa parecer, já é de conhecimento comum que alguns desses corpos celestes contêm uma ampla variedade de compostos orgânicos como aminoácidos e nucleobases. Entretanto, o ponto frágil dessa teoria consiste na capacidade que essas moléculas teriam em perdurar em face das intempéries a que foram submetidas ao entrar na atmosfera e ao conseqüente impacto na superfície. Atualmente aceita-se que essas duas teorias podem se complementar, propiciando o acúmulo de material de origem para as subsequentes reações que culminariam no Mundo RNA (Bada, 2004).

Transição para a Bioquímica Primitiva

Com o tempo, Bada (2004) sugere que moléculas polimerizadas aumentaram em comprimento e complexidade. Isso permitiu que algumas se dobrassem em configurações que permitiram interagir com outras moléculas e promover determinadas reações necessárias à vida posterior. À medida que inúmeras combinações poliméricas foram aleatoriamente criadas, alguns desses polímeros adquiriram habilidades em catalisar sua própria duplicação. A partir daí, deu-se a origem não somente à vida, como também à evolução. O autor afirma ainda que essas “entidades moleculares” devem ter tido, no mínimo, as seguintes propriedades: capacidade de se automultiplicar; habilidade de “ativar” moléculas necessárias para a duplicação e de utilizar superfícies minerais para promovê-la. Por fim, deveriam perdurar por tempo suficiente para garantir a próxima geração. Dessas características, destaca-se a imperfeição na capacidade de duplicação, que possibilitou maior variabilidade genética passível de Seleção Natural, eliminando grupos com mutações deletérias e selecionando aquelas que eram benéficas.

Uma vez que os ingredientes estavam disponíveis, Bada (2004) afirma que restava transcorrer o devido tempo para que o acaso probabilístico atuasse. De fato, o autor sugere que as “entidades moleculares” capazes de auto-duplicação primitiva podem ter surgido diversas vezes, “aguardando” o período em que as condições de sobrevivência fossem ideais.

Transição para a Bioquímica Moderna

Segundo Bada (2004), o próximo passo na evolução biológica em direção à Bioquímica Moderna foi a transição para o já mencionado Mundo RNA. O Ácido Ribonucleico ou RNA possui não somente a capacidade de armazenar informação, como também de catalisar reações. Para que essas moléculas surgissem foram necessárias algumas modificações evolutivas como a síntese de proteína e o encapsulamento dos mecanismos responsáveis pela duplicação. Ainda assim, a instabilidade do RNA representou o ponto frágil dessas moléculas até ocorrer a transição para o Mundo DNA/Proteína, que permitiu a estabilidade de moléculas mais longas e aprimoramento da capacidade de armazenamento de informações para as gerações posteriores. Nesse “novo mundo”, o RNA seria “rebaixado” para o papel de mensageiro/transcritor de informações necessárias na biossíntese de proteínas (além de outras funções mais recentemente caracterizadas).

Ainda que o DNA apresentasse maior estabilidade que o RNA, Bada (2004) afirma que a temperatura deve ter sido o principal impedimento para a prevalência das moléculas de RNA e DNA, visto que essas são rapidamente degradadas em altas temperaturas.

Por fim, Bada (2004) afirma que, embora a compreensão dos processos envolvidos com o surgimento da vida na Terra esteja bem estabelecida, permanecem muitos detalhes que precisam ser elucidados. Uma das formas de encontrarmos respostas para essas dúvidas pode ocorrer, segundo o autor, por meio da exploração espacial. Dada a imensidão do Universo, é estatisticamente provável que existam outros planetas com vida e caso tenhamos a oportunidade em encontrá-los, poderemos buscar reconhecer e compreender os processos que lá ocorrem a fim de entender como os mesmos se desenvolvem na Terra.

Por fim, ainda que muitas das etapas mencionadas dependam excessivamente do acaso e, portanto, seja possível questionar suas respectivas autenticidades científicas, cabe trazer uma reflexão de Stephen Jay Gould sobre o tempo, que será fundamentalmente importante para a avaliação dos objetivos propostos por esse trabalho.

“Milhares de passos, cada um exigindo o anterior, cada um improvável em si mesmo. Só a imensidão do tempo garantiu o resultado, pois o tempo converte o improvável no inevitável [...] o impossível torna-se possível, o possível provável e o provável virtualmente certo [...]. O tempo opera milagres” (Gould *et al.*, 2004).

5.1.3 Cronogeologia

Por meio do que foi abordado nos tópicos anteriores, pudemos refletir sobre quão estreitas são as possibilidades para o surgimento da vida e o quanto fenômenos extraplanetários foram e são essenciais para a sobrevivência dos seres vivos. Vimos também que esses mesmos fenômenos essenciais, como o Efeito Estufa, são passíveis de alteração em virtude da magnitude com que as atividades antrópicas os têm atingido. Foi apresentado também que, por mais improvável que seja o surgimento da vida nas condições inóspitas da Terra Primitiva, com o devido tempo, o acaso entra em ação e torna possível o impossível (Gould *et al.*, 2004).

Fica evidente, portanto, a importância e magnitude das escalas temporais envolvidas nos processos abordados até o momento. Assim, faz-se necessária uma breve explanação sobre as Eras Geológicas e algumas de suas principais características a fim de, dentre outros aspectos, melhor compreender a ordem de grandeza dos processos ocorridos desde os tempos pré-históricos e que resultaram no Sistema Terra atual. Isso também é necessário porque não somos evolutivamente habituados a considerar escalas de tempo geológicas ou com o fato de que a

noção de que decisões tomadas no presente podem repercutir décadas ou séculos no futuro, dada a natureza cumulativa do Sistema Terra.

De acordo com Cohen *et al.* (2013), a Cronoestratigrafia divide o tempo geológico da Terra nos seguintes termos, cada um com amplitude de duração menor do que o próximo: Éon, Era, Período, Época e Idade. Neste Trabalho serão abordados os principais Éons, Eras e Períodos geológicos conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais períodos geológicos baseados no Gráfico Cronoestratigráfico Internacional.

Fanerozoico	Cenozoico	Quaternário
		Neógeno
		Paleógeno
	Mesozoico	Cretáceo
		Jurássico
		Triássico
	Paleozoico	Permiano
		Carbonífero
		Devoniano
		Siluriano
		Ordoviciano
		Cambriano
	Pré-Cambriano	

Fonte: elaborado pelo autor (2016).

As descrições dos Períodos e algumas de suas principais características são baseadas em artigos da National Geographic (2016).

Pré-Cambriano

Iniciaremos com o Pré-Cambriano, o Éon que corresponde a grande parte do tempo geológico terrestre. Abrange desde a formação dos planetas no Sistema Solar, há cerca de 4,5 bilhões de anos, até seu término com o surgimento das primeiras formas de vida multicelulares, quatro bilhões de anos depois.

A Terra tinha mais de 600 milhões de anos quando as primeiras formas de vida surgiram e, com o passar do tempo, bactérias primitivas tornaram-se capazes de formar os primeiros ecossistemas microbianos, conhecidos como estromatólitos (Figura 1a) (De Castro *et al.*, 2016). Neste Período, um dos passos evolutivos de maior importância ocorreu quando surgiram os primeiros organismos capazes de obter energia da luz solar por um processo bioquímico denominado fotossíntese. O subproduto desse processo é o oxigênio (O_2), que viria a se tornar fundamental para as formas de vida vindouras. De fato, a atmosfera da Terra, até 2,4 bilhões de anos atrás, não possuía oxigênio, mas atingiu a concentração atual (21%) 800 milhões de anos depois. Outra consequência importante em virtude do surgimento do O_2 é a formação da camada de ozônio (O_3), protegendo a superfície terrestre e seus organismos da radiação solar. O Pré-Cambriano termina com uma longa era do gelo em nível global, resultando no primeiro grande evento de Extinção em Massa.

Cambriano

Entramos agora no Éon chamado de Fanerozoico, que se subdivide em Eras e Períodos a serem tratados posteriormente. Destes, a primeira Era é o Paleozoico que, por sua vez, compreende diversos Períodos, sendo o primeiro deles o Cambriano. Esse Período é destaque por ser o primeiro momento que houve uma grande diversificação das formas de vida, conhecida como a Explosão do Cambriano. Dentre esses seres vivos, encontravam-se os primeiros cordados, grupo de animais com vértebras ao qual os seres humanos pertencem. Dentre outras características, graças ao ambiente relativamente hospitaleiro proporcionado pelo aquecimento do clima, destaca-se o papel da emissão de oxigênio resultante da fotossíntese por algumas bactérias, cianobactérias e algas. Outro destaque cabe ao surgimento dos primeiros animais de “corpo duro” como os moluscos de concha dura que tiveram papel evolutivo fundamental não só por possibilitar uma defesa contra predadores, como também por dar suporte evolutivo a seres vivos de corpos maiores.

O fim do Cambriano é marcado por uma série de Extinções em Massa que impactaram significativamente até mesmo grupos numerosos e bem estabelecidos, como os trilobitas – animais icônicos desse Período (Figura 1b).



Figura 1 – a) Estromatólitos (esquerda); b) Trilobitas (direita).

Fonte: BBC (2014).

Ordoviciano

O segundo Período do Fanerozoico é o Ordoviciano, quando a vida marinha vivenciou um *boom* de diversidade, plantas primitivas iniciaram seu processo de colonização no ambiente terrestre e os ancestrais tanto dos peixes atuais como dos artrópodes surgiram. Em termos geológicos, havia dois supercontinentes na Terra, Gondwana no hemisfério sul e Laurásia no hemisfério norte. À medida que as placas tectônicas se deslocavam, o clima do planeta ia se alterando. Inicialmente o nível dos mares era de até 600m maior do que o atual. Quando Gondwana atingiu o polo sul e parte de sua superfície congelou, o nível dos mares abaixou e iniciou-se uma nova era do gelo.

Siluriano

O próximo Período é o Siluriano, quando os animais e plantas de fato emergiram na Terra. No mar, os peixes continuaram a se diversificar com destaque para as primeiras espécies com mandíbula, o que possibilitou grande diversificação dos alimentos. Ao mesmo tempo, os artrópodes terrestres tiveram expressivo aumento populacional e as primeiras plantas vasculares surgiram, ainda que tivessem menos de 50cm e eram desprovidas de raízes e folhas. O clima permaneceu quente e estável durante o Siluriano (cerca de 17 °C) e boa parte do gelo presente na Gondwana derreteu. Novamente, o fim desse Período é marcado por uma série de Extinções em Massa. No entanto, não foram tão extensas quanto nos Períodos anteriores.

Devoniano

Iniciado há 410 milhões de anos, o Devoniano é o quarto Período do Paleozoico e destaca-se pela maior explosão da diversidade de peixes até aquele momento. Isso levou alguns

cientistas a chamar esse Período de a “Era dos Peixes”. No entanto, poucos representantes desses grupos sobreviveram, com destaque para aqueles que deram origem aos tubarões e raias (cartilagosos) e os peixes ósseos, ancestrais dos demais peixes. Dentre esses últimos, destaca-se também a presença de peixes com barbatanas diferenciadas com uma grande quantidade de músculos e ossos, ancestrais dos anfíbios que surgiriam ainda naquele Período. Posteriormente, dariam origem a outros animais como aos mamíferos e dinossauros. Outro grupo bem-sucedido foram plantas, que conseguiram perder a dependência por áreas inundáveis ou *wetlands* e, até o fim do Devoniano já possuíam estruturas lenhosas capazes de sustentar árvores de até 30 metros. O fim desse Período também foi marcado por grandes extinções, mas as principais vítimas foram as criaturas marinhas, onde 70% dessas foram extintas. As razões para esses fenômenos são diversas e envolvem consequências advindas desde o re-congelamento de Gondwana à baixa concentração de GEE absorvidos pelas florestas e um possível impacto de asteroide.

Carbonífero

O Período do Carbonífero é famoso pelas formações carboníferas localizadas principalmente na Europa, América do Norte e Ásia, continentes que naquele período estavam sob influência de climas predominantemente tropicais. Essas formações têm origem nas vastas florestas pantanosas que, ao passar de milhões de anos, resultaram nos primeiros grandes depósitos de carvão. O grande crescimento das florestas nesse Período (Figura 2) resultou no sequestro de gás carbônico em proporções inéditas até o momento e, conseqüentemente no lançamento de oxigênio em volume suficiente para alterar sua concentração na atmosfera de 21% para 35%. Essa modificação na composição da atmosfera possibilitou, dentre outras coisas, que insetos chegassem a tamanhos sem precedentes devido à sua relação direta entre tamanho do corpo e concentração de O₂ na atmosfera. Havia, por exemplo, centopeias venenosas de até 2m de comprimento e libélulas com comprimento asa-asa de até 0,75m.

Destaca-se também o aumento da diversidade dos anfíbios por duas principais adaptações evolutivas alcançadas: a primeira delas consistiu em modificações na espessura e composição do tecido epitelial, o que os tornou capazes de ficar mais tempo afastados da água e a segunda foi o surgimento do ovo amniótico, que permitiu a troca de ar com o ambiente externo enquanto protege o embrião. Houve também o aparecimento dos primeiros répteis, ainda frágeis e pequenos demais se comparados com o que se tornariam no Permiano. O fim desse Período é marcado pelo deslocamento dos continentes, que posteriormente formaram o supercontinente Pangeia.



Figura 2 – Florestas pantanosas características do Carbonífero.
Fonte: Ludek Pesel – BBC (2014).

Permiano

O Permiano iniciou-se há 299 milhões de anos, quando o supercontinente Pangeia se formou, o que influenciou significativamente os mecanismos climáticos do Sistema Terra dada sua extensão sem precedentes. O sul do supercontinente era caracterizado por um clima frio e seco. Já o norte por altas temperaturas e constantes variações climáticas entre úmido e seco. Com isso, as florestas características do Carbonífero foram gradualmente sendo substituídas por coníferas e outros grupos resistentes a períodos de estiagem.

Estas condições favoreceram um grupo que, até então, permanecia tímido em sua representatividade. Com tecido epitelial espesso e capaz de reter umidade de forma eficiente, os répteis foram o grupo que melhor se adaptou às condições do Permiano. O único desafio que enfrentavam até o momento advinha da estratégia peclotérmica que adotavam frente às variações de temperatura que ocorriam entre o dia e a noite. Entretanto, com o passar do tempo, os terapsídeos, répteis semelhantes a mamíferos, contornaram esse desafio ao tornarem-se capazes de manter o calor gerado pela digestão da comida. Em outros termos, converteram-se a animais de “sangue quente”. Com isso, os répteis se tornaram o grupo dominante em meados do Permiano, alcançando dimensões de até uma tonelada e posteriormente dando origem aos primeiros ancestrais dos mamíferos.

O fim do Permiano é simultâneo ao término da Era Paleozoica, marcados pelo evento de Extinção em Massa de maior magnitude já identificado. Diversas teorias buscam explicar fenômeno de tamanha magnitude. O mais provável é que uma combinação de fenômenos tenha sido responsável pela Extinção. Mais detalhes serão abordados no tópico 5.1.5., mas o que importa aqui é que, apesar de quase extinguir a vida na Terra, essa Extinção deixou diversos

nichos vagos, propiciando que fossem ocupados posteriormente por grupos que até então não conseguiam prosperar. Dentre esses grupos que passariam por grande diversificação estão os dinossauros.

Triássico

O primeiro Período da Era Mesozoica é o Triássico, que ficou marcado pelo início em um ambiente desolado onde mais de 90% das espécies na Terra haviam sido extintas. Esse fato possibilitou um aumento de diversificação nos nichos vacantes, período no qual surgiram pequenos mamíferos roedores, assim como os primeiros dinossauros. Foi nesse Período também que o supercontinente Pangeia se formou por completo (Figura 3). No entanto, até o fim do Triássico, cerca de 199 milhões de anos atrás, as placas tectônicas já se movimentavam de forma a novamente separar o supercontinente em Laurasia (norte) e Gondwana (sul). Quanto à fauna e flora, os primeiros recifes de coral apareceram, répteis marinhos gigantes prosperavam nos mares e a base da cadeia trófica no meio marinho era composta pelos fitoplânctons. Além desses grupos, sapos, salamandras, crocodilos, tartarugas e serpentes deslocavam-se pela superfície; pterossauros ganhavam os céus; nos solos, musgos e samambaias dominavam logo abaixo das coníferas; artrópodes como aranhas, escorpiões, milípedes e centípedes também prosperavam; mas talvez a maior mudança tenha surgido com a evolução dos dinossauros e dos primeiros mamíferos no fim do Triássico. Como em outros casos, o fim do Triássico também terminou com um evento de Extinção em Massa, porém sob circunstâncias ainda incertas. Sabe-se, entretanto, que os dinossauros sobreviveram a esse evento e viriam a dominar em definitivo o Jurássico.

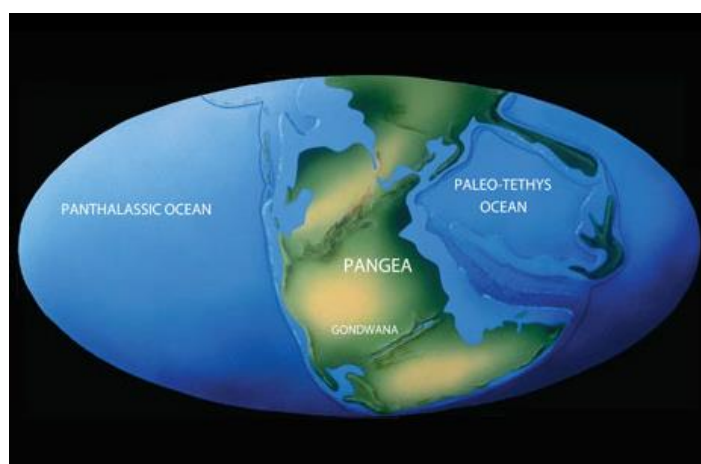


Figura 3 – O supercontinente pangeia já em processo de separação.
Fonte: BBC (2014).

Jurássico

No Jurássico, a separação dos continentes continuou. Da Laurasia surge a América do Norte e Eurásia; da Gondwana separam-se Antártida, Madagascar, Índia e Austrália para o leste e América do Sul e África para o oeste. À medida que o oceano invadia os espaços entre esses continentes, regiões que permaneceram quentes e secas por muito tempo tornaram-se úmidas ou semiúmidas. Essa mudança proporcionou com que as águas mornas e úmidas formassem locais ideais para o florescimento de novas espécies. Na terra, os dinossauros dominavam com representantes como os saurópodes Braquisossauros, que atingiam até 16 metros de altura, 26 metros de comprimento e mais de 80 toneladas. Outro ponto importante desse Período foi o aparecimento da primeira ave que, no entanto, naquele período ainda tinha que competir com os répteis (Figura 4). Portanto, assim como os mamíferos roedores, as aves também “aguardavam” uma oportunidade na “corrida armamentista evolucionária” (Dawkins (2010).



Figura 4 – A competição entre os répteis e aves voadoras.
Fonte: Charles R. Knight – BBC (2014).

Cretáceo

O Período do Cretáceo marca o fim da Era Mesozoica e indica o início da disseminação das “plantas floridas” por todos os continentes que, por sua vez, já possuíam formato muito semelhante ao atual. No entanto, a dispersão das angiospermas só foi possível pelo papel fundamental de outro grupo que muito se diversificou nessa época, os artrópodes como vespas, abelhas, formigas e besouros. Dada a localização da Terra no Sistema Solar, assim como à configuração dos continentes, houve um súbito resfriamento e aumento da umidade em virtude da extensão das regiões costeiras “abertas” à entrada de massas de ar oceânicas úmidas. Ainda que os dinossauros permanecessem dominando a biosfera, pressões seletivas, como as mudanças

climáticas, proporcionavam alterações entre os principais grupos dominantes, impulsionando de forma constante a biodiversidade. No fim do Período, há 65 milhões de anos, boa parte da diversidade foi eliminada pelo impacto de um asteroide e suas consequências imediatas foram tão catastróficas quanto o próprio impacto do corpo celeste, compondo uma série de teorias complementares à Extinção em Massa do Cretáceo.

Paleógeno

O Paleógeno é o primeiro Período do Cenozoico, marcado pela explosão de diversidade dos mamíferos ao se encontrarem num mundo com diversos nichos vagos, que anteriormente eram ocupados pelos dinossauros. Além desse fator, a combinação de outras questões também contribuiu para esse *boom* de diversidade. O primeiro deles foi o constante afastamento entre os continentes que, no longo prazo, resultou em mudanças climáticas como temperaturas mais baixas com eventuais picos de aquecimento e baixa umidade do ar. As MC originadas do afastamento dos continentes foram particularmente drásticas no hemisfério norte, onde florestas deram lugar a grandes extensões de pastagens naturais. À medida que animais com hábito de pastar surgiram e prosperaram, a extensão desses ambientes aumentou mais ainda, num clássico *loop* de retroalimentação positiva. Nos mares o destaque ocorreu pela prosperidade dos peixes e tubarões diante da ausência dos grandes predadores do Cretáceo. Por fim, outro dos passos evolutivos de grande evidência foi o retorno dos mamíferos aos mares com o surgimento das baleias e outras espécies.

Neógeno

No Neógeno, ao mesmo tempo em que os continentes continuavam a distanciar-se entre si, houve também alguns choques entre massas continentais. Esses eventos deram origem a grande parte das cordilheiras montanhosas do mundo. À medida que a configuração das placas tectônicas se alterava, algumas consequências aconteciam: no Ártico o gelo aumentou de extensão e volume. Somado a isso, a neve no topo das cadeias montanhosas fez com que parte da água evaporada e precipitada não retornasse aos oceanos. Com isso, o nível dos oceanos rebaixou, expondo “pontes de terra” entre importantes continentes como África - Europa e Eurásia - América do Norte. Com isso, o livre deslocamento entre a fauna e flora entre habitats previamente isolados um do outro trouxe consequências evolutivas essenciais à compreensão de como a biosfera se encontra atualmente. Os autores citam algumas dessas transições:

“Elefantes e macacos vagaram da África para a Eurásia. Coelhos, porcos, tigres dente-de-sabre e rinocerontes foram para a África. Elefantes e rinocerontes continuaram pelo Estreito de Bering até a América do Norte. Cavalos foram para o outro lado. Preguiças terrestres migraram da América do Sul para a América do Norte; Guaxinins correram para o sul. Mesmo os roedores podem ter saltado ilhas do Pacífico em rota para a Austrália a partir do Sudeste Asiático”.⁵

Outro fenômeno simultâneo a esses eventos foi a transformação de florestas para campos que se iniciou com maior evidência no Paleógeno. Com isso, a crescente disponibilidade de gramíneas como fonte de alimento possibilitou que novos grupos ocupassem esse nicho, os animais de pastagem. No entanto, a nova dieta forçou com que os herbívoros se adaptassem a fim de retirar o máximo de nutrição possível do capim. A melhor adaptação a essa necessidade foi, dentre outras coisas, o desenvolvimento de dentes mais resistentes, como nos atuais cavalos; a criação de estômagos compartimentalizados, no caso dos ruminantes; e a conseqüente adaptação ao hábito de pastar. Viver em grandes manadas passou a ser uma importante estratégia evolutiva ao habitar grandes extensões de campo aberto. Nos mares, os tubarões prosperaram, alcançando seu ápice com o Megalodon, que podia atingir até 15 metros de comprimento. Enquanto isso, macacos asiáticos e africanos divergiram, aproximando do ponto em que, vários milhões de anos mais tarde, deram origem aos hominídeos, nossos ancestrais.

Quaternário

O Quaternário é o último dos Períodos e corresponde àquele no qual estamos vivendo. Nesse Período os continentes já estavam da forma como se encontram atualmente e é marcado principalmente pelas constantes mudanças climáticas naturais. Isso ocorre porque à medida em que a Terra realiza seu movimento de translação, a distância relativa do Sol resulta em variações na quantidade de energia recebida na Terra. Esses ciclos planetários estão diretamente relacionados com os períodos de glaciação e interglaciação. Cada período de glaciação costuma durar 100.000 anos e as interglaciações entre 10.000 e 15.000 anos. Nos períodos mais frios do Quaternário, espécies como mamutes, rinocerontes e bisões atingiram imensos tamanhos. No entanto, à medida que o clima foi aquecendo há cerca de 10.000 anos, muitos dos representantes

⁵ Tradução adaptada de National Geographic (2016): “Elephants and apes wandered from Africa to Eurasia. Rabbits, pigs, saber-toothed cats, and rhinos went to Africa. Elephants and rhinos continued across the Bering Strait to North America. Horses went the other way. Ground sloths migrated from South America to North America; raccoons scurried south. Even rodents may have hopped Pacific islands en route to Australia from Southeast Asia”.

do grupo chamado de megafauna foram extintos. Além da questão climática, a participação humana nessas extinções é alvo de constante discussão no meio científico e será melhor discutida no tópico 5.3 (De Vivo e Carmignotto, 2004).

Sem dúvidas, um dos acontecimentos que mais viriam a impactar o Sistema Terra posteriormente iniciou-se com a saída do *Homo erectus* da África, no início do Quaternário. Com o tempo, à medida que migravam entre os continentes e seus cérebros/inteligência expandiam, o *Homo sapiens* foi aumentando gradativamente sua influência sobre o Sistema. Atualmente, indicadores de nossa presença estão presentes em todas as esferas do Sistema Terra. Presentes inclusive nas Mudanças Climáticas, fenômeno que até pouquíssimo tempo (ínfimo para a escala geológica) era tido como exclusivamente natural, conseguiu ser alvo indireto da atuação dos seres humanos. Colocando sob essa perspectiva, as MC podem até parecer uma conquista digna do pensamento antropocêntrico. Mas, basta considerarmos a fugacidade do Efeito Estufa na história geológica já apresentada até aqui para repensarmos nosso *modus operandi* até então.

5.1.4 Mudanças Climáticas

*“I’m often asked whether I believe in global warming.
I now just reply with the question: Do you believe in gravity?”*

— Neil DeGrasse Tyson

De acordo com Ma (1998), Mudanças Climáticas ou Aquecimento Global consiste no processo em que há um constante aumento da concentração de gases na atmosfera oriundos de atividades antrópicas. Esses gases são denominados de Gases do Efeito Estufa (GEE) devido à característica em permitir a entrada da radiação solar através da atmosfera e ao mesmo tempo prevenir que esses mesmos raios, após serem refletidos na superfície, se dispersem por completo no Espaço. Assim, a permanência ou atraso na saída dessa energia possibilita maior aquecimento da temperatura global. Alguns desses gases são: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, clorofluorcarbono e o vapor de água.

Ma (1998) destaca que a concentração dos GEEs têm variado naturalmente ao longo da história geológica da Terra, o que se refletiu, como já apontado, nos períodos de glaciação e interglaciação ocorridos ao longo das Eras. Ainda que os mecanismos por trás dessas variações não sejam conhecidos com toda certeza, é sabido que a velocidade com que esses gases têm aumentado de concentração está singularmente elevada. Ao menos essa questão específica é

atribuída às atividades antrópicas, principalmente à queima de combustíveis fósseis e ao desflorestamento. Mais especificamente, a concentração de dióxido de carbono aumentou em quase 50% se considerarmos os 270 ppm em 1850 (pré revolução industrial) e os 400 ppm em 2015 (Ma, 1998; Dlugokencky e Tans, 2016). E nesse ponto há um agravante, a marca histórica dos 400 ppm já havia sido atingida num momento de pico ocorrido em maio de 2013. No entanto, em 2015 esse valor atingiu tamanha concentração que não mais se trata de uma variação inesperada, mas na atual média global (Figura 5).

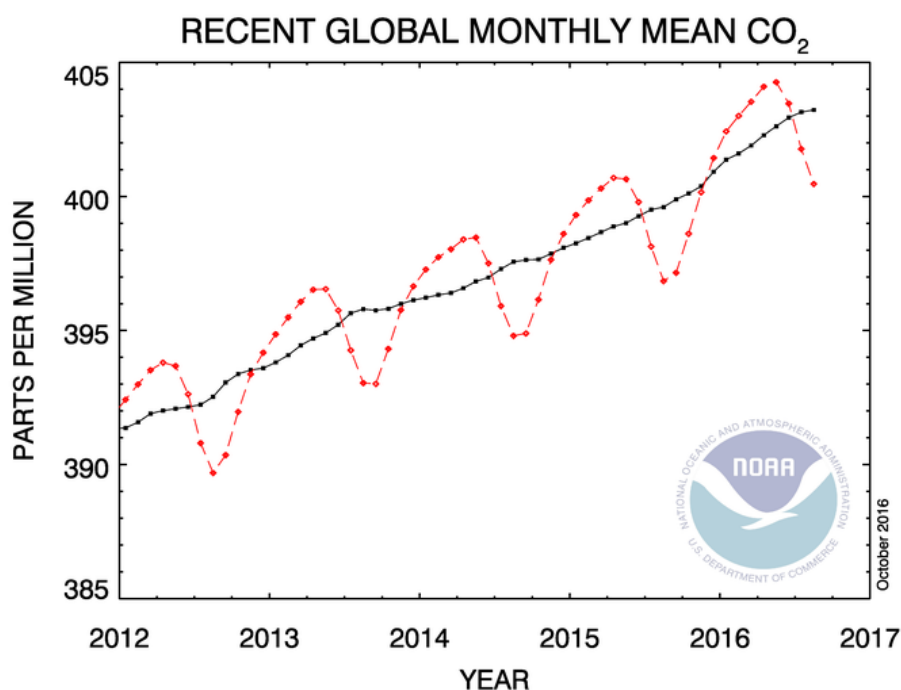


Figura 5 - concentração média de CO₂ mensal.

Obs: ambos os valores aos quais a linha vermelha e a preta se referem são das médias mensais, porém a última possui uma correção pelo ciclo sazonal médio.

Fonte: (Dlugokencky e Tans, 2016).

Como esperado, dada a complexidade e implicações em reconhecer a existência das MC, alguns cientistas são céticos quanto ao fenômeno. Ainda que descobertas científicas continuem demonstrando a irrefutabilidade das MC, esse restrito grupo acaba chamando atenção nas grandes mídias por destoarem da maioria de cientistas. Dessa forma, a publicidade que acabam gerando transmite a imagem errônea de que representam uma parcela maior do que de fato são. No entanto, basta a análise isolada dos componentes que têm agravado o EE para identificarmos o quão injustificado são os argumentos dos céticos.

Primeiramente, é sabido por meio de diversos experimentos (Steffen *et al.*, 2004) que há uma relação direta entre concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e variações de temperatura em escala global. Um exemplo clássico são os períodos de glaciação e interglaciação, e mais importante, os GEEs tiveram participação fundamental nesses períodos a despeito de fenômenos naturais como tempestades solares, erupções vulcânicas etc. Uma vez compreendido o papel dos GEEs no clima global, basta reconhecermos que as emissões geradas pelos seres humanos estão ocorrendo a um ritmo muito maior do que o natural. Portanto, é intuitivo concluir que consequências de tais alterações deveriam ser esperadas.

O maior agravante é que, conforme Steffen *et al.* (2004) destacam, o Sistema Terra possui natureza cumulativa. Isso implica que há pouca ou nenhuma reação imediata por muitos anos até que eventos extremos ocorram. O agravante aqui é que, com o tempo, a esporadicidade desses eventos pode não mais ser a regra, tornando—se cada vez mais frequentes. Uma analogia interessante pode ser feita com relação a eventos sísmicos em falhas geológicas próximas a grandes centros urbanos, como a Falha de São Francisco, na Califórnia. Nesses casos, prefere-se que terremotos de menores proporções ocorram em padrões previsíveis, do que um acúmulo de tensão liberada abruptamente com efeitos catastróficos.

Ainda que as MC seja somente um dos componentes das Mudanças Globais, a qual abordarei melhor no item 5.4, Steffen *et al.* (2004) afirma que o clima terá papel fundamental como uma das primeiras consequências para a forma como temos utilizado os recursos naturais na Terra. Nesse contexto, uma solução tecnológica, ao contrário do que historicamente tem ocorrido, provavelmente não trará uma solução imediata dadas as dimensões e complexidade do Sistema Terra.

5.1.5 Extinções

Antes de tratar dos cinco eventos de Extinção em Massa, é importante considerar alguns pontos relativos às extinções de fundo (*background extinctions*) para compreendermos a magnitude das Cinco Grandes. Além da diferença numérica e extensão entre esses dois tipos de fenômenos, há particularidades quanto aos tipos de táxons afetados em ambos (Jablonski, 1989). Mckinney (1997) ressalta que as extinções raramente são aleatórias. As características particulares de cada grupo conferem a eles maior ou menor propensão/vulnerabilidade a eventos como a Extinção Seletiva (*Extinction Selectivity*) ou vulnerabilidade relativa (*Relative Vulnerability*).

Nesse contexto, avaliando essa questão por uma perspectiva da conservação das espécies, é interessante que consideremos essas características como possível indicador de vulnerabilidade. Assim, seria possível direcionar os esforços conservacionistas a espécies naturalmente mais propensas à extinção. No entanto, assim como destacado anteriormente e será discutido nos próximos tópicos, a complexidade do Sistema Terra torna a identificação precisa desses indicadores de vulnerabilidade altamente improvável.

Mckinney (1997) pôde encontrar algumas das principais características que contribuem para a pré-disposição à extinção ao analisar dados sobre as extinções modernas e registros fósseis (Tabela 1). Segundo o autor, essas particularidades individuais podem influenciar na propensão à extinção de determinados grupos pela probabilidade de morte intrínseca a esses indivíduos e pela quantidade total dos representantes do táxon existentes (Figura 6). No entanto, ainda que a vulnerabilidade de determinada população seja um bom indicador para uma possível vulnerabilidade ao nível de espécie (Ceballos *et al.*, 2015), essa não é uma regra universal, visto que é preciso considerar a localização em que a mesma está inserida, assim como o cômputo em que as demais pressões seletivas têm agido sobre o grupo, como também, a capacidade de suporte do ambiente (Mckinney, 1997).

Tabela 1 – Características mencionadas na literatura como responsáveis por aumentar o risco à extinção.

	Extinções Modernas	Extinções pré- históricas
<u>Características Individuais</u>		
Especialização	++	++
Estenotermia	++	++
Dieta especializada	++	++
Nível trófico alto	++	++
Simbiose	++	+
Tamanho de corpo grande	++	++
Baixa fecundade	++	+
Alta longevidade	++	+
Crescimento/ desenvolvimento lento	++	+
Morfologia complexa	+	++
Comportamento complexo	+	+
Mobilidade limitada	++	-
Migração	++	-

Fonte: adaptado de Mckinney (1997).

Símbolos: ++ muitas citações identificadas; + ao menos uma citação; - nenhum identificada até o momento.

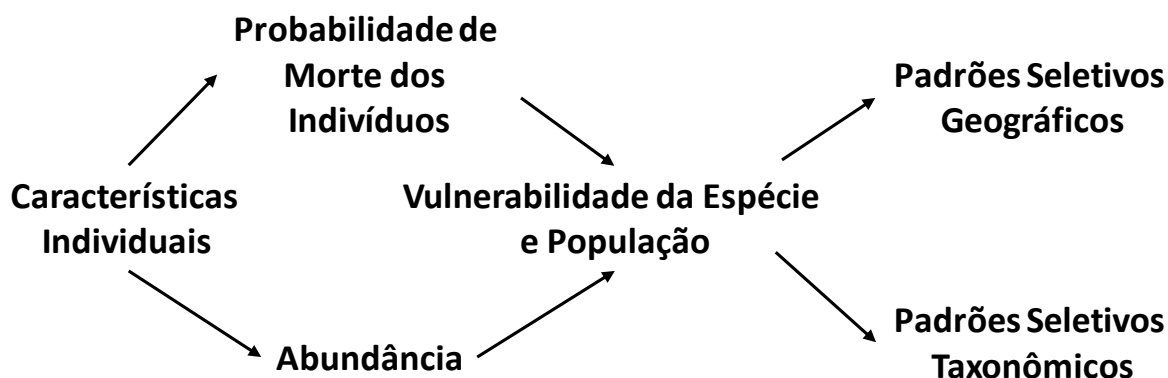


Figura 6 – Influências dos traços individuais na propensão à extinção.
 Fonte: adaptado de Mckinney (1997).

Conforme pode ser observado na Tabela 1, Mckinney (1997) destaca que muitas das características estão intimamente relacionadas a grupos com estratégias evolutivas de especialistas, demonstrando forte relação com a vulnerabilidade dos mesmos à extinção. De fato, a estratégia oposta, generalista, é enfatizada por muitos como característica de espécies resistentes às extinções tanto “de fundo” quanto “em massa”. Isso ocorre porque espécies abundantes normalmente são generalistas e, portanto, possuem uma gama de recursos disponíveis maior. Já as mais raras usualmente são especialistas e possuem distribuição restrita.

Ainda analisando as estratégias adaptativas (generalista e especialista) dos grupos taxonômicos, a Tabela 2 reforça a teoria de que especialistas são mais propensos à extinção. Para fins comparativos, consideremos alguns dos grupos “mais próximos” a nós humanos em ordem decrescente de especialização: os primatas, os mamíferos e os insetos. Assim, segundo a teoria apresentada por Mckinney (1997), estão em ordem também decrescente em relação ao fator de vulnerabilidade à extinção. A Tabela 2 aborda esse raciocínio a partir de estimativas de anos de existência que espécies de determinados grupos normalmente possuem até serem extintos.

Tabela 2 – Duração média estimada das espécies a partir de correspondentes fósseis.

Táxons	Duração das Espécies Milhões de anos
Recifes de coral	25
Bivalves	23
Formas bentônicas	21
Gastrópodes	10
Formas plantônicas	10
Equinóides	7
Crinóides	6,7
<i>Não marinhos</i>	
Plantas monocotiledôneas	4
Cavalos	4
Plantas dicotiledôneas	3
Peixes	3
Aves	2,5
Mamíferos	1,7
Pimatas	1
Insetos	1,5

Obs.: com exceção dos insetos, informações sobre invertebrados referem-se a animais marinhos.

Fonte: adaptado de (Mckinney, 1997).

O mesmo ocorre quando consideramos grupos dentro de grupos. Por exemplo, os roedores são mais generalistas do que grandes mamíferos de um modo geral, e mais ainda do que os primatas. Portanto, nessa mesma linha de raciocínio, os roedores são os que estão menos propensos à extinção. No entanto, conforme já ressaltado, essas características devem ser consideradas com precaução devido à complexidade das relações e forças evolutivas envolvidas. Mckinney (1997) destaca algumas dessas características e suas particularidades:

- Tamanho do corpo – como colocado na Tabela 1, tal característica é considerada como uma especialização. No entanto, não representa uma regra para todos os grupos. Segundo Mckinney (1997), o tamanho do corpo é um bom exemplo de como algumas das características não necessariamente tornam o grupo propenso à extinção. Segundo o autor, o aspecto em questão possui maior relação com a distribuição e a abundância de determinadas espécies que, por sua vez, não necessariamente representam um bom indicador de vulnerabilidade.
- Abundância - ao contrário do tamanho do corpo, Mckinney (1997) sugere que a abundância ou raridade é um importante indicador da vulnerabilidade da grande maioria dos grupos. No entanto, assim como em outros casos, essa regra nem

sempre prevalece, pois há casos de espécies com grande abundância que ainda assim podem não resistir a determinadas pressões seletivas e/ou a distúrbios. Outro interessante ponto no que diz respeito à raridade e que o autor afirma que não recebe a devida atenção é a “raridade artificial”. Esse fenômeno ocorre quando uma espécie originalmente abundante é sobre-explorada. Nesses casos, por não ser evolutivamente adaptada à condição de baixa abundância, tornam-se especialmente propensos a se extinguirem.

De fato, Mckinney (1997) afirma que muitas das extinções modernas são versões intensificadas daquilo que é esperado das extinções de fundo. No entanto, nem sempre essas expectativas prevalecem, principalmente sob a influência de atividades antrópicas ou outros fatores que levem a uma mudança ambiental fora do comum. Nesses casos, ainda que determinadas características não sejam determinantes sob pressões seletivas naturais, sob um novo cenário outros traços evolutivos podem ser mais importantes na sobrevivência de uma espécie. Especificamente no caso dos gêneros considerados por Jablonski (1989) na Extinção do fim do Cretáceo, ao contrário do que ocorre nas extinções de fundo, a distribuição geográfica e a diversidade de espécies não foram tão significativas na sobrevivência dos grupos estudados.

O fato de alguns táxons possuírem maior propensão à extinção não é uma teoria recente. Pelo contrário, Mckinney (1997) sugere que Lamarck, Charles Lyell e Darwin dedicaram parte de suas pesquisas ao assunto. No entanto, Jablonski (1989) ressalta que essa não-aleatoriedade não implica que a seleção natural no nível de indivíduo (essencial na “seleção de fundo”) seja ineficaz em Extinções em Massa. Um exemplo que o autor relata é o caso das diatomáceas planctônicas, que tiveram altas taxas de sobrevivência na última Grande Extinção por estarem evolutivamente habituadas às condições anormais relacionadas à Extinção.

Ainda assim, de fato há uma relação que sugere que clados mais antigos têm uma tendência maior a serem intensamente afetados e extintos em eventos de Extinção em Massa. Mckinney (1997), explica que esses casos não aleatórios ocorrem principalmente por duas razões. Primeiramente, porque as mesmas características que são deletérias em um cenário com novas pressões seletivas, normalmente são geneticamente compartilhadas por outras espécies do grupo. O segundo consiste em que, ainda que possível, é improvável que as características que possibilitaram a sobrevivência e subsequente diversificação de um clado antigo o suficiente para ter sobrevivido a uma Extinção em Massa anterior continue evolutivamente preparado para as pressões de outra Grande Extinção. Pelo contrário, conforme será apresentado no tópico seguinte, historicamente as causas e consequências para as Cinco Grandes Extinções, de um

modo geral, diferiam entre si e, portanto, também as características favorecidas pelas pressões seletivas em cada um desses eventos (Nature, 2014; Richter, 2016).

Além da não-aleatoriedade advinda de particularidades de determinados grupos e a intensidade com que as pressões seletivas atuam sobre essas características, outro fator a ser considerado são os habitats em que esses grupos vivem. Mckinney (1997) sugere que há três grandes categorias de habitats: terrestre/marinho; insular/continental e tropical/não tropical. Dentre esses, há uma tendência dos habitats terrestres, insulares e tropicais possuírem as maiores taxas de extinção. Isso ocorre, principalmente, pela combinação de dois fatores. Primeiramente, deve-se considerar que a intensidade dos impactos sofridos por esses ambientes está associada à proximidade em que se encontram de determinado evento não habitual à espécie. Somando-se a isso, existem características intrínsecas a esses habitats que os tornam mais ou menos propensos a serem impactados. Por exemplo, o habitat marinho permite que as espécies tenham uma terceira dimensão para se deslocarem, a profundidade. Adicionado a isso, há também o fator do tamponamento (“*buffering*”) natural mudanças climáticas súbitas.

Nesse contexto, historicamente sabe-se que espécies marinhas, especialmente aquelas localizadas em grandes profundidades, têm sobrevivido com maior frequência às últimas extinções em massa como no fim do Devoniano e Permiano. No caso das ilhas, as aves têm sido o grupo particularmente impactado, dadas as suas altas taxas de endemismo e devido ao fato de que seus ovos são vulneráveis a predadores, principalmente a espécies invasoras como gatos e ratos (Mckinney, 1997). No caso dos ratos, sabe-se que os seres humanos foram os responsáveis pela introdução dessa espécie, ainda que involuntário. Já em outras situações, a relação foi direta, como no caso da sobre-exploração do arau gigante no hemisfério norte (Kolbert, 2015).

Segundo a autora, o arau gigante podia passar de 80 centímetros de altura e acredita-se que as populações desta ave chegavam a milhões de indivíduos. No entanto, evolutivamente adaptado a outros tipos de pressões seletivas, os araus eram demasiadamente lentos para a ameaça dos humanos que os encontravam. Relatos da época das grandes navegações descrevem a relação que se estabeleceu: capturavam “a centenas de cada vez, como se Deus tivesse transformado a inocência daquelas pobres criaturas num admirável instrumento de sustento para o Homem” (Kolbert, 2015). Além de alimento, os araus gigantes eram utilizados como isca de peixe, fonte de plumas e na falta de madeira, até como combustível. Outra medida que demonstra a abundância que a espécie possuía foi que, apesar dos constantes relatos de sobre-exploração, os araus gigantes “sobreviveram a mais de dois séculos de devastação” (Kolbert, 2015).

As Cinco Grandes Extinções em Massa

Além dos mecanismos seletivos que atuam nas extinções de fundo, eventos catastróficos são responsáveis por causar grande parte das Extinções em Massa. Adicionado a isso, tais eventos têm o agravante de impactarem mesmo grupos que até aquele momento estavam “perfeitamente adaptados” às pressões naturais de seu tempo. Segundo a BBC Nature (2014), Extinções em Massa são definidas como períodos em que um número anormalmente alto de espécies é extinto de forma simultânea ou num curto período de tempo. A seguir serão apresentadas as Cinco Grandes Extinções e suas possíveis causas de acordo com Richter (2016) e BBC Nature (2014).

A primeira das Extinções em Massa ocorreu há 444 milhões de anos, no Ordoviciano-Siluriano entre picos de extinção separados por centenas de milhares de anos entre si. Por fim, estima-se que 86% das espécies foram extintas. Sugere-se que as causas para esse evento podem ter origem numa severa era do gelo iniciada pela redução do nível dos oceanos seguido da exposição de certas rochas (silicatos). A partir do momento que os silicatos entraram em contato com o ar da atmosfera, iniciou-se um processo de reação que envolvia a absorção de dióxido de carbono da atmosfera. Conforme já discutido, o papel do efeito estufa é fundamental para manter a temperatura do planeta em níveis toleráveis pelos seres vivos. Caso a concentração de um importante GEE como o CO₂ seja significativamente retirado da atmosfera, a temperatura do planeta é eventualmente reduzida e se alcançado certos níveis, provocam eventos como a primeira Grande Extinção.

O próximo evento ocorreu no fim do Devoniano, 375 milhões de anos atrás, quando 75% das espécies foram perdidas ao longo de uma série de “pequenas extinções” por milhões de anos. Um dos grupos quase extintos após essa Extinção e que já havia sobrevivido à última Grande Extinção, foram os trilobitas (Figura 1b). Sugere-se que a principal causa para esse evento foi o grande número de árvores que prosperaram no Devoniano e que, por meio de suas raízes, lançaram nutrientes em excesso nos oceanos. Como consequência, houve um aumento do número de algas que absorveram o oxigênio nos mares e sufocaram os demais seres vivos que lá habitavam. Há também teorias que sugerem a presença do impacto de um asteroide como a principal causa para essa Extinção.

A terceira Grande Extinção ocorreu no Permiano, 251 milhões de anos atrás distribuídos entre pelo menos dois eventos que ocorreram entre milhares de anos um do outro. Tido como a pior Extinção em Massa da história da Terra, teve origem em alguns eventos catastróficos. Inicialmente, uma série de erupções vulcânicas localizadas na região da atual Sibéria liberaram

um enorme volume de CO₂ na atmosfera. Com isso, bactérias metanogênicas proliferaram e nesse processo, liberaram grande quantidade de metano, outro potente GEE. Assim, enquanto a temperatura do planeta aumentava, os oceanos acidificaram e liberaram sulfeto de hidrogênio, um potente gás tóxico. A combinação desses fatores foi responsável pela extinção de 96% das espécies, quase extinguindo a vida em si.

O fim do Triássico para o início do Jurássico, há 200 milhões de anos, foi palco da quarta Grande Extinção. Segundo os autores, de todas as extinções, a que os cientistas definem como mais enigmática é essa, pois, ainda que tenha sido responsável pela extinção de 80% das espécies, nenhuma causa específica foi apontada até o momento.

A última das Extinções em Massa, talvez a mais famosa delas, ocorreu no Cretáceo-Terciário, 66 milhões de anos atrás, extinguindo 76% das espécies. Foi responsável pela extinção de dois grandes grupos que dominavam ambos os meios terrestre e marinho, os dinossauros e os amonites. Estima-se que as constantes mudanças climáticas ocorridas nesse período vinham colocando sob grande pressão seletiva a fauna e a flora do Período. Mas, foi o impacto do asteroide que determinou a última das Grandes Extinções por causas naturais.

5.2 A BIODIVERSIDADE

A importância da biodiversidade no funcionamento do Sistema Terrestre tem sido cada vez mais objeto de estudo das principais publicações científicas. Essa importância se expressa por meio de fenômenos essenciais não só ao resto da biodiversidade como para os seres humanos. Alguns exemplos são a regulação da concentração de CO₂ e O₂ na atmosfera, assim como na manutenção do fluxo dos estoques de carbono e água do solo para a atmosfera, influenciando diretamente na produtividade e estabilidade dos ecossistemas.

Steffen *et al.* (2004) sugerem que a análise da função, influência e da própria existência da biodiversidade deve ocorrer por meio de algumas perguntas norteadoras. São elas: “quão importante é a diversidade biológica para o funcionamento do planeta? [...] Quanto de diversidade e complexidade dos sistemas ecológicos podem ser perdidos antes que funções críticas do Sistema Terra sejam prejudicadas? [...] será que a biosfera possui capacidade de influenciar o ambiente abiótico a fim de beneficiar a biosfera? Será que a

biosfera pode exercer uma influência global estabilizadora sobre a dinâmica do Sistema Terrestre? ”⁶.

5.2.1 O Caso da América do Sul

Um curioso caso na história evolutiva da biodiversidade, frente a influências tanto naturais quanto antrópicas, ocorreu na América do Sul. A análise desse caso é particularmente interessante porque, conforme Dawkins (2010) cita, o continente sul americano é um dos cinco “continentes insulares” que se separou da África e possibilitou um isolamento geográfico que resultou num grande aumento de diversidade em ambos os continentes. Os demais “continentes insulares” dos quais alguns serão mencionados nos próximos tópicos, ainda que indiretamente foram: Madagascar, Laurásia, África e Austrália.

Conforme Dawkins (2010), grande parte dos mamíferos que viviam no continente Sul-Americano não eram placentários, mas sim marsupiais. O curioso aqui é esse grupo taxonômico é conhecido como habitantes quase que exclusivos da Austrália e Nova Guiné. De fato, o autor sugere que a atual diversidade desse grupo nesses locais teve sua origem a partir de ancestrais da América do Sul que alcançaram a “Australiné” por meio da Antártida.

Entretanto, em contraste com a diversificação que se passou na Oceania, em sua terra de origem os marsupiais praticamente foram extintos ao ponto de que, atualmente, $\frac{3}{4}$ deles encontram-se na “Australiné”. Os motivos para isso, segundo Dawkins (2010), se iniciaram com o Istmo do Panamá e o Grande Intercâmbio Americano há 3 milhões de anos. Da “fauna veterana”, ou seja, prévia ao Grande Intercâmbio, somente os gambás, as cuícas-musaranhos e os “monito-del-monte” sobreviveram em todo o continente sul americano. De modo geral, além desse grupo, Dawkins (2010) relata que “a fauna Sul-Americana tendeu a assumir formas vultosas semelhantes aos rinocerontes”, ainda que grande parte deles acabaram extintos assim como os marsupiais. Entretanto, a atual semelhança com a fauna africana se restringe praticamente ao tamanho vultoso, pois, conforme De Vivo e Carmignotto (2004) destacam, se considerarmos outros traços evolutivos como a composição taxonômica, o número de espécies de médio e grande porte e as características ecológicas e comportamentais, a fauna Sul-Americana difere, em grande medida, de seus ancestrais Africanos. Mais precisamente,

⁶ Tradução adaptada de Steffen *et al.* (2004): “How important is biological diversity to the functioning of the Earth System? [...] How much and what types of biological diversity/complexity can be lost before Earth System functioning is impaired? [...] does the biosphere work in ways that influence the abiotic environment in directions of benefit to the biosphere? Does the biosphere provide an overall stabilizing influence on the dynamics of the planetary machinery?”

conforme pode ser observado na Figura 7, ainda que a fauna de pequeno porte (5 - 25kg) também seja significativamente numerosa na África, a diferença entre os dois continentes se destaca na quase inexistência dos táxons de grande porte na América do Sul, principalmente aqueles acima de 300kg. Tratando especificamente dos mamíferos, a “África apresenta mais espécies em todas as categorias acima de 5kg, enquanto a América do Sul é mais rica na categoria abaixo de 5kg”⁷.

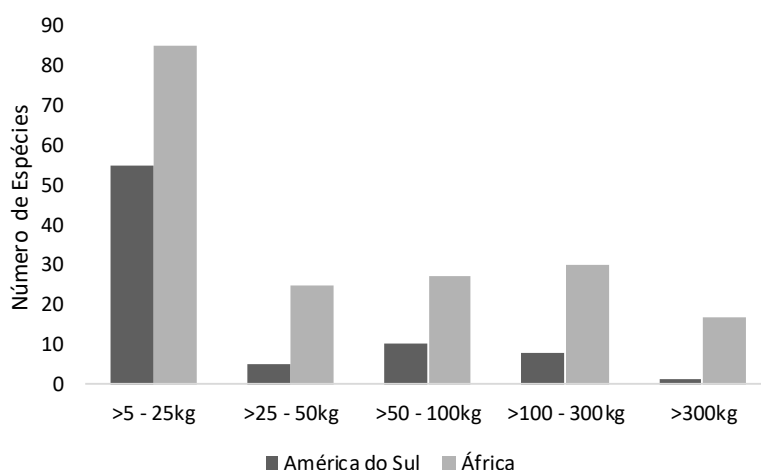


Figura 7 – Número de espécies categorizados por peso da África e América do Sul.
Fonte: De Vivo e Carmignotto (2004).

Estas diferenças são explicadas por um conjunto de fatores que exerceram diferentes pressões seletivas na fauna e flora dos dois continentes. Dentre eles, destacam-se o papel dos seres humanos, os diferentes regimes climáticos e o já citado Grande Intercâmbio Americano (De Vivo e Carmignotto, 2004). Segundo o modelo criado pelos autores, enquanto os eventos climáticos daquele período levaram a uma diversificação da fauna savânica na África, ocasionaram resultados bem diferentes na América do Sul. Dentre essas alterações, destaca-se a extinção da Megafauna americana. Nesse sentido, a teoria de maior destaque que busca explicar esse fenômeno é baseada na atuação dos seres humanos, que ao chegarem no continente Sul-Americano supostamente teriam encontrado animais “inocentes à predação humana”. No entanto, De Vivo e Carmignotto (2004) sugerem que as mudanças climáticas ocorridas naquele período tiveram importância relativa muito maior do que os seres humanos, ainda que esses tenham sua devida participação no processo.

Nessa época haviam alguns pequenos mamíferos, que teoricamente não eram vulneráveis aos seres humanos, e ainda assim estavam desaparecendo da mesma forma que a

⁷ Tradução adaptada de De Vivo e Carmignotto (2004): “Africa is richer in number of species for any category above 5 kg; only in the weight category below 5 kg is South America richer than Africa”.

megafauna. De fato, os autores sugerem que muitos dos representantes desses grupos já estavam extintos ou em vertiginoso declínio antes da chegada dos seres humanos. A fauna de ambos os continentes foi muito semelhante até pouco tempo (meio do Holoceno), quando um conjunto de fatores passaram a exercer diferentes pressões seletivas entre os continentes, impactando os seres vivos que lá viviam de forma distinta. Isso ocorreu, segundo os autores, porque o continente africano possuía “válvulas de escape” como os desertos que, frente às mudanças climáticas, acabaram sendo “savanizados”. Fenômeno inverso à desertificação, que tem sido comum em algumas regiões do mundo. Já na América do Sul, principalmente devido à ausência das manadas de herbívoros que pastam características da África, as mudanças climáticas acabaram favorecendo florestas tropicais (De Vivo e Carmignotto, 2004).

O caso da América do Sul exemplifica como mesmo grupos taxonômicos dominantes como os marsupiais e imponentes como a megafauna estão sujeitos a pressões seletivas determinantes que podem levar ao seu inesperado fim. Ao mesmo tempo, vimos como “continentes irmãos”, diante de mudanças climáticas simultâneas podem resultar em biomas significativamente diferentes e, ainda que com os mesmos ancestrais, dado o devido tempo, sempre encontram respostas evolutivas às adversidades do Sistema Terra. No entanto, numa perspectiva não tão otimista, o caso sinaliza também a irreversibilidade dos resultados dessas respostas evolutivas.

5.2.2 As Extinções e a Biologia Evolutiva

É sabido que o desaparecimento de determinada espécie, no curto prazo, pode ocasionar extinções em cascata e modificar fundamentalmente as comunidades em que estão inseridas (Johansson e Dieckmann, 2009). No entanto, as consequências de longo prazo são imprevisíveis em virtude da diversidade e complexidade das relações que essas mesmas espécies exercem em seu ecossistema. Os resultados dependerão, por exemplo, de fatores como função, singularidade e significância que a espécie exerce em seu nicho, se é que podemos determinar esses parâmetros com alguma precisão.

Nesse contexto, um importante conceito relacionado à busca em determinar a amplitude das consequências na eventual extinção de uma espécie é a definição de espécies chave. Presumindo que se sabe com certeza que certa espécie pertence a essa categoria, independentemente do tamanho da população e/ou abundância, uma vez extinta, o impacto será alto e potencialmente irreversível no curto prazo. No entanto, enquadrar uma espécie nesse conceito é especialmente difícil, senão impossível, requerendo profunda dedicação

ao estudo não só da espécie em análise, como de seu nicho como um todo (Simberloff, 2003).

Em uma perspectiva otimista, passado o tempo devido, essas mesmas extinções podem criar oportunidades para que mecanismos evolutivos remodelem a paisagem adaptativa. Jablonski (1989) sugere que, com o passar das eras geológicas, certas características geneticamente compartilhadas por grandes grupos são evolutivamente selecionadas pela extinção de fundo. Por fim, esses grupos passam a dominar diversos nichos, como no caso dos dinossauros no Jurássico e Cretáceo. Nesse contexto, o autor cita que as extinções em massa teriam importante papel ao criar “oportunidades” evolutivas por “remover” o grupo taxonômico que até então era predominante, permitindo assim, que outros táxons diversifiquem e ocupem os nichos vacantes. Exemplos de grupos nessa situação incluem a “substituição dos terapsídeos (répteis semelhantes a mamíferos) pelos dinossauros, os dinossauros pelos mamíferos e, posteriormente, os mamíferos carnívoros arcaicos pela Ordem moderna de carnívoros”⁸. Ou mesmo o sucesso evolutivo dos mamíferos após a extinção dos grandes sauros (Nature, 2014; Geographic, 2016).

Essa “oportunidade” criada pelas Extinções em Massa de certos grupos pode ocorrer da seguinte forma. Cria-se um isolamento reprodutivo que resulta em um processo de Ramificação Evolutiva, gerando o aumento de biodiversidade já mencionado (Johansson e Dieckmann, 2009). Todavia, contar com que esta “restauração evolutiva” ocorra, principalmente no contexto altamente impreciso que envolve tal evento, aparenta ser uma perspectiva demasiadamente otimista e arriscada. Uma das possíveis conclusões indesejadas desse processo poderia ser o preenchimento desses nichos por grupos faunísticos generalistas já existentes na região, possivelmente sinantrópicos⁹.

Outro mecanismo evolutivo que deve ser considerado é destacado por Parvinen (2005) como Suicídio Evolutivo. Segundo o autor, existem casos em que determinada espécie poderia perdurar com as estratégias evolutivas que historicamente adota sob variações naturais em seu ambiente. No entanto, há sempre a possibilidade que a Seleção Natural leve esse grupo a fazer certas “escolhas evolutivas” que resultem na sua extinção.

⁸ Tradução adaptada de Jablonski (1989): “[...] the replacement of therapsids (‘mammal like reptiles’) by dinosaurs, dinosaurs by mammals, and archaic carnivorous mammals by the modern order of Carnivora”.

⁹ Sinantropia: relação ecológica estabelecida por espécies de animais e plantas que se beneficiam das modificações ocasionadas pela urbanização, prosperando nesses ambientes à despeito da vontade humana.

A cauda do pavão é um bom exemplo desse fenômeno. Por meio de seleção sexual, machos com apêndices cada vez mais exuberantes e chamativos foram selecionados. Por fim, a espécie acabou fadada a uma característica que, sob determinadas pressões como a predação, pode ser evidentemente deletéria à espécie. O autor destaca também uma versão mais sutil do fenômeno denominado por Suicídio Evolutivo Demograficamente Estocástico ou Extinção Darwiniana Gradual, em que a seleção natural leva a população a atingir tamanhos populacionais tão pequenos via especialização que a extinção da espécie se torna uma possibilidade, mesmo que ao acaso.

5.2.3 Biodiversidade e as Mudanças Climáticas

Um dos fatores que mais dificulta a proposta de medidas que busquem conservar a biodiversidade é a amplitude desse objetivo. Por mais que tenhamos ciência da importância da questão, é comum termos dificuldade em justificar um projeto conservacionista sob a ótica estritamente econômica. Isso ocorre dada à dificuldade em mensurar os efeitos diretos e, principalmente indiretos, que a biodiversidade exerce na qualidade de vida dos seres humanos.

Para iniciarmos a discussão sobre o possível papel estabilizador da biodiversidade, precisamos tratar do conceito de Resiliência. Segundo Walker *et al.* (2004), a definição para esse fenômeno é “a capacidade de um sistema em absorver distúrbios e se reorganizar enquanto sofre alterações a fim de manter essencialmente a mesma função, estrutura, identidade e retroalimentação”¹⁰. Ou ainda, para Holling (1973), “resiliência é uma medida da persistência de sistemas e de suas habilidades em absorver mudanças e distúrbios e ainda manter as mesmas relações entre as variáveis populacionais e seu meio”¹¹. Tendo isso em mente e sabendo da alta diversidade que os trópicos possuem, espera-se que, florestas como a Amazônica, sejam altamente resilientes. Para testar essa hipótese em escala regional e temporal, Sakschewski *et al.* (2016) utilizaram de um modelo dinâmico de vegetação global que considera a competição entre as árvores e a diversidade de plantas presentes na área de estudo. Mais especificamente, o modelo avaliou como a diversidade das características e,

¹⁰ Tradução adaptada de Walker *et al.* (2004): “Resilience is the capacity of a system to absorb disturbance and reorganize while undergoing change so as to still retain essentially the same function, structure, identity, and feedbacks”.

¹¹ Tradução adaptada de Holling (1973): [...] “resiliência, that is a measure of the persistence of systems and of their ability to absorb change and disturbance and still maintain the same relationships between populations or state variables.”

portanto, das espécies, afeta a resiliência ecológica da floresta sob circunstâncias de mudanças climáticas.

O modelo avaliou uma floresta com alta diversidade e outra com baixa (ambas considerando os padrões tropicais de diversidade) sob dois cenários: o primeiro possui alta concentração de GEEs na atmosfera e o outro encontra-se num estágio intermediário. Conforme esperado, os cenários com alta diversidade apresentaram melhor recuperação, mais especificamente, 63% no modelo intermediário e 33% no de alta concentração de gases. Já nos modelos com baixa diversidade, a recuperação na bacia amazônica ocorreu em somente 5% da floresta no cenário com baixa concentração de GEEs e 8% no cenário de alta concentração. Portanto, ainda que a capacidade de recuperação da floresta dependa significativamente da concentração de CO₂, os resultados demonstram claramente que quanto maior a diversidade da flora, maior é a capacidade do ambiente em exercer a “influência estabilizadora”, ainda que plenamente observada somente no longo prazo.

Sakschewski *et al.* (2016) concluíram que:

“[...] diversidade de espécies de plantas e, portanto, de biodiversidade, deve ser reconhecida como uma estratégia efetiva para mitigar os impactos das mudanças climáticas, desse modo não devemos reduzir sua importância a um mero benefício indireto da conservação da natureza”¹².

Quanto à análise de como as mudanças climáticas têm afetado (e podem afetar) os seres vivos, Pontarp *et al.* (2015) destacam dois importantes cenários. O primeiro ocorre quando essas mudanças influenciam as histórias de vida das espécies, como o período de reprodução. O segundo envolve as respostas dinâmicas das espécies que “optam”, por exemplo, em se deslocar para áreas com maior abundância de recursos. Nesses casos, à medida que o globo se torna mais quente gradualmente a partir do equador, as aves irão migrar cada vez mais para latitudes mais elevadas, buscando ambientes equivalentes àqueles aos quais foram evolutivamente adaptadas. No entanto, ainda que uma “espécie sortuda” sobreviva a essas novas pressões seletivas, a biodiversidade como um todo permanece prejudicada. Isso ocorre devido às diferentes possibilidades que a escolha da espécie pode ocasionar. Ainda no exemplo das aves que migram, mesmo que obtenham

¹² Tradução adaptada de Sakschewski *et al.* (2016): “Plant trait diversity, and therefore biodiversity, should be recognized as an effective means to mitigate climate change in management strategies, rather than reducing it to a co-benefit of ecosystem conservation”.

sucesso em encontrar um local com abundância de recursos, a competição que porventura surja com outras espécies que também se desloquem para aquele local pode culminar em uma evolução convergente e/ou uma exclusão competitiva. Nesses casos, no longo prazo, haveria uma homogeneização da diversidade.

Além do problema de perda de espécies ocasionado pela competição entre grupos que convirjam para um novo local, a própria capacidade de migrar pode gerar consequências indesejáveis. Quando uma espécie migra de seu local evolutivamente habituado em busca de habitats com recursos disponíveis, há sempre um risco de que não encontre um novo habitat apropriado a ela (Pontarp *et al.*, 2015). Numa outra perspectiva, supondo que a espécie “opte” por ou não consiga buscar novos ambientes, mas ainda assim consiga se adaptar às novas condições, os autores afirmam que, no longo prazo, há uma tendência a que esse grupo adote estratégias generalistas, também culminando em uma homogeneização. Assim, caso algum evento imprevisível como aquele ao qual a espécie ancestral sobreviveu ocorra, a população pode não mais contar com diversidade o suficiente para garantir sua resiliência.

Uma vez estabelecidos os riscos envolvidos com a migração como resposta adaptativa, a união das áreas de estudo da Ecologia, Evolução e Desenvolvimento (Eco-Evo-Devo) tem avaliado alternativas evolutivas à problemática das mudanças globais. Nesse contexto, o mecanismo evolutivo destacado por Gilbert *et al.* (2015) é denominado como Plasticidade do Desenvolvimento. Segundo os autores, esse mecanismo consiste na habilidade de um organismo em “reagir a um estímulo do ambiente por meio de uma mudança em sua forma, fisiologia ou comportamento”¹³. Dessa maneira, um único genótipo pode se diferenciar em diferentes fenótipos de acordo com os estímulos externos. Outro importante fator desse mecanismo é a capacidade de facilitar a construção de nichos, o que por si só já é considerável, mas sob a ótica da problemática climática, pode atuar como um mecanismo de tamponamento às alterações do ambiente. Em última instância, os autores ainda destacam a possibilidade das modificações fenológicas induzidas por estímulos ambientais possam ser assimiladas ao genoma, tornando-se hereditárias.

Ainda que comumente subestimado, outro importante resultado da influência das mudanças climáticas na biodiversidade é a especiação. Isso ocorre, principalmente, devido à fragmentação de habitats, ocasionada por barreiras, geográficas ou não, que as flutuações

¹³ Tradução adaptada de Gilbert *et al.* (2015): “[...] to react to environmental input with a change in form, physiology or behavior”.

do clima criam. Dessa forma, as mudanças climáticas não só afetam as espécies de forma indireta, como também pela adaptação divergente oriunda do isolamento reprodutivo entre essas populações (Qvarnström *et al.*, 2016).

Segundo os autores, existem três principais aspectos no que tange às mudanças climáticas e adaptação:

1. “Adaptação climática levando ao isolamento temporal e espacial e/ou seleção extrínseca contra híbridos;
2. Influência climática na divergência de características relacionadas à seleção sexual;
3. Adaptação ao clima e acúmulo de incompatibilidades genéticas”.¹⁴

Mais especificamente com relação ao segundo item, já é sabido o papel que variações de temperatura podem exercer em rituais de acasalamento. Isso ocorre nas complicadas danças de acasalamento das aves, os chamados dos anfíbios e até mesmo alterando a capacidade competitiva do esperma. A amplitude com que uma simples variação de temperatura pode causar sinaliza, segundo o autor, para o potencial de descobertas em relação à seleção natural climática e sua influência na seleção sexual. Segundo os mesmos, raramente a relação entre esse tipo de seleção é considerada no âmbito da seleção natural e isso ocorre porque não se tem o hábito de levar em consideração o sistema sensorial que regula todo o processo de reprodução, alvo constante da seleção natural (Qvarnström *et al.*, 2016).

5.3 O *Homo sapiens*

*“A man who dares to waste one hour of time
has not discovered the value of life.”*

— *Charles Darwin (1888), The Life & Letters of Charles Darwin.*

A fim de considerarmos a amplitude e dimensão do papel do ser humano como agente biológico e cultural capaz de alterações ambientais em nível global, destacarei alguns desses aspectos, conforme exemplificado por Steffen *et al.* (2004) por meio da seguinte frase: “só nos

¹⁴ Tradução adaptada de Qvarnström *et al.* (2016): “Climate adaptation leading to spatial and temporal isolation and/or extrinsic selection against hybrids”. “Climate-driven divergence in sexual display traits and assortative mating”. “Climate adaptation and the build-up of genetic incompatibilities”.

últimos 50 anos, as atividades antrópicas apresentaram aumento considerável em todos os aspectos”¹⁵ (Figura 8).

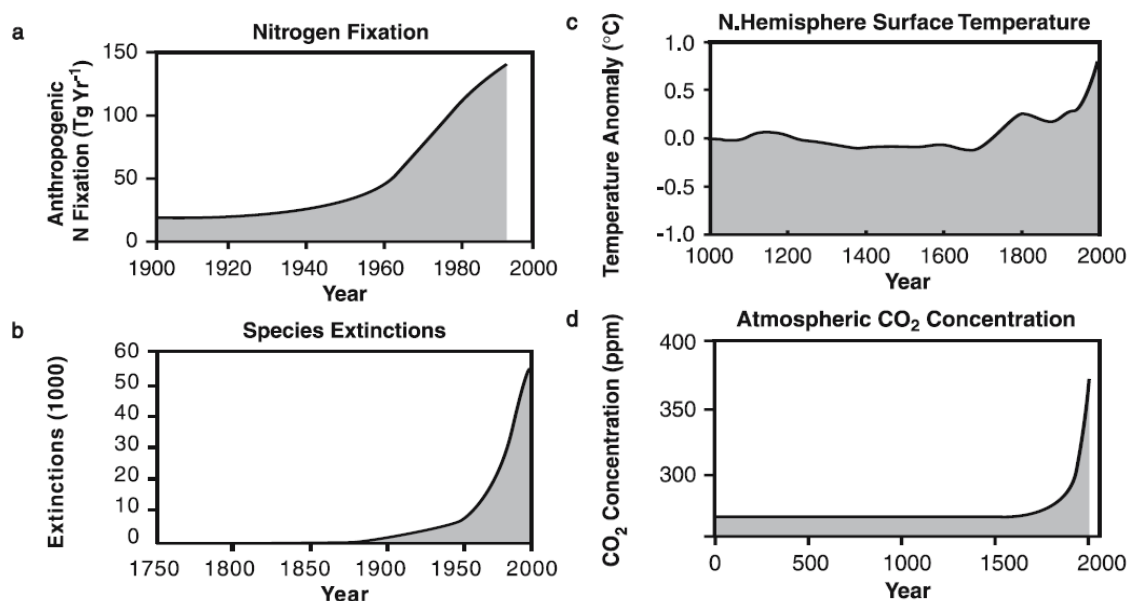


Figura 8 – Respostas do Sistema Terra à crescente pressão antrópica: a. fixação de nitrogênio; b. extinções de espécies; c. temperatura da superfície terrestre no Hemisfério Norte; e d. concentração atmosférica de CO₂.

Fonte: retirado de Steffen et al. (2004).

Em termos populacionais o número de indivíduos no globo se aproxima dos 7,5 bilhões (Worldometers.Info), com estimativa de que atinja 9 bilhões em 2050 (Figura 9). O número de megacidades (10 milhões ou mais de habitantes) saiu de 5 em 1975 para 19 nos anos 2000. Esse crescente nível populacional e meio de vida cada vez mais urbano implica que quase 50% da superfície terrestre já esteja modificada por atividades humanas e mais da metade de toda água doce de fácil acesso tenha sido apropriada para fins antrópicos. Tratando dos recursos biológicos, a biodiversidade de forma geral encontra-se sob severa ameaça. E, ainda que detenha meios pelos quais responda às alterações ocorridas, a velocidade com que têm acontecido não permite com que essas respostas sejam rápidas o bastante para salvaguardar sua diversidade, conforme abordado no tópico 5.3. Mais especificamente sobre a vida marinha, com os dados que se tem noção até o momento, 47-50% desse recurso já é explorado em sua totalidade, 15-18% está sendo sobre-explorado e 9-10% foi extinto ou encontra-se em recuperação.

¹⁵ Tradução adaptada de Steffen *et al.* (2004): “During the last 50 years alone, the increase in virtually every sphere of human activity has been considerable”.

Financeiramente, a economia global aumentou por um fator maior que 15. No entanto, a desigualdade econômica também tem aumentado consideravelmente (Figura 10). Estima-se que as nações mais ricas detêm somente 15% da população, mas geram 50% do PIB mundial. Em termos de energia, o consumo de combustível fóssil, mais especificamente: do petróleo, aumentou em 3,5 desde 1960 (Steffen *et al.*, 2004).

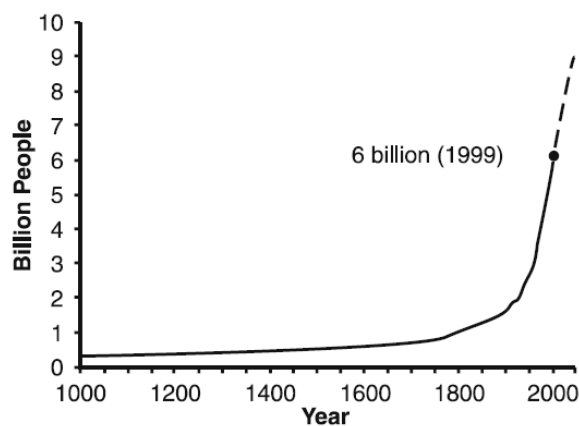


Figura 9 – Crescimento populacional dos anos 1000 a 2000, em bilhões de pessoas.
Fonte: retirado de Steffen *et al.* (2004).

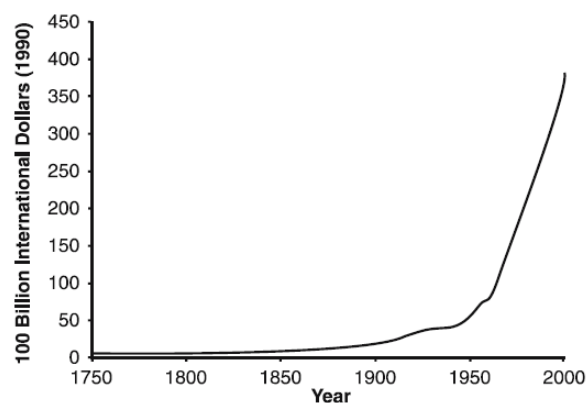


Figura 10 - Produto Interno Bruto Real do mundo (em 100 bilhões de dólares), refletindo o aumento do consumo característico do estilo de vida consumista.
Fonte: retirado de Steffen *et al.* (2004).

5.3.1 O Antropoceno

We are dumping carbon dioxide into the atmosphere at a rate the Earth hasn't seen since the great climate catastrophes of the past. The ones that led to mass extinctions. We just can't seem to break our addiction to the kinds of fuel that will bring back the climate last seen by the dinosaurs [...]. All the while, the glorious sun pours immaculate, free energy down upon us, more than we will ever need. [...] The dinosaurs never saw that asteroid coming. What's our excuse?

— Neil DeGrasse Tyson.

A fim de melhor compreendermos as modificações ocasionadas pelo ser humano na superfície terrestre, baseando-se em Steffen *et al.* (2004), iremos analisar a atuação do ser humano em diferentes esferas: a superfície terrestre, a atmosfera, o ciclo hidrológico, os ecossistemas marinhos e costeiros e a biodiversidade.

A Superfície Terrestre e o Ser Humano

Certamente o meio que sofreu alterações por maior tempo e magnitude, está intimamente relacionado ao aumento populacional e sua conseqüente demanda por terra, alimentos, água e energia. O agravante é que não se espera que essas alterações sejam reduzidas no curto prazo. Acredita-se que as modificações da superfície terrestre por ação humana se iniciaram quando éramos caçadores-coletores, especialmente após a descoberta do fogo e seu controle. Esse teria se caracterizado como o primeiro manejo para fins humanos com impactos ambientais de grande escala. Com isso, as populações humanas que adotaram essa estratégia obtiveram maior facilidade na obtenção de alimento significativamente acima da capacidade que os caçadores normalmente possuíam. Uma das primeiras conseqüências dessa prática foi a criação de pastagens em locais onde previamente não existiam.

A próxima grande inovação tecnológica no manejo de terras ocorreu por meio da domesticação de plantas e animais, há cerca de 10.000 anos, na chamada Revolução Neolítica. À medida que a domesticação e o cultivo de vegetais foram sendo disseminados, desenvolvidos e praticados de forma independente em vários locais do mundo, diferentes formas de transformação do solo foram surgindo a fim de aumentar a área e produtividade das culturas conhecidas até então. Dentre essas estratégias, no entanto, aquelas de maior impacto permanecem sendo as queimadas, o desflorestamento, a aragem e a irrigação. Com o tempo, os locais que tiveram maior sucesso na utilização dessas técnicas se tornaram os primeiros grandes Estados, como as terras ribeirinhas do Oriente Médio, no Norte da África e no Sul da Ásia. Simultaneamente à conversão de terras em áreas agricultáveis, outra transformação de grande impacto que se acredita ter começado naquele tempo foi a criação de pastagens.

No século XVI, a maior parte da Europa já havia sido significativamente alterada, resultando em uma motivação fundamental para a era das Grandes Navegações e subseqüente colonização de diversas partes do mundo. Nesse processo, o *mindset* da forma como os europeus sobre-exploravam a terra foi se disseminando para outras partes do globo. Com isso, além da

alteração da terra em si, houve também uma introdução, intencional ou não, de um grande número de espécies da fauna e flora europeia em outras partes do planeta.

Ainda assim, estima-se que até 1850, a área terrestre que havia sido convertida para fins humanos (e.g. cidades, áreas agricultáveis, pastagens) totalizava somente metade da área que viria a ser alterada até finais do século XX. Sugere-se que cerca de 10.000.000 km² de terras cultivadas foram convertidas unicamente durante o último século.

A seguir, destacarei três aspectos da conversão de terras pelos seres humanos conforme Steffen *et al.* (2004).

I. Terras Convertidas

Estima-se que “aproximadamente 50% de terras não congeladas foram substancialmente modificadas pelos seres humanos”, ou seja, com exceção de ambientes extremamente secos ou frios, as alterações antrópicas têm ocorrido em nível global.

II. Produtividade Primária Líquida Terrestre

Outra interessante abordagem da qual podemos nos utilizar para avaliar a dimensão da influência humana na superfície terrestre consiste na mensuração da quantidade de Produtividade Primária Líquida (PPL) utilizada, coutilizada ou desviada para fins humanos. Segundo os autores, a definição de PPL é:

“Produtividade primária líquida é uma medida da quantidade líquida de carbono assimilado pela vegetação terrestre através da fotossíntese durante um período de tempo e representa o bloco de construção básico para a vida na terra”¹⁶ (Steffen *et al.*, 2004).

A estimativa realizada na década de 90 indicou que cerca de 40% da PPL global é utilizada de alguma forma pelos seres humanos; já uma estimativa mais recente diz que esse valor se encontra em torno de 50%. Ou seja, de toda a PPL gerada por seres fotossintetizantes, 50% é utilizada pelos seres humanos, o que indica quão grande tem sido nossa influência e demanda por recursos.

III. Taxas de Desflorestamento

Apesar de constituir como um fenômeno global marcante na Europa desde a época anterior às Grandes Navegações, atualmente os maiores índices de desflorestamento ocorrem nos trópicos. Nesses locais, a taxa, que alcança 4% ao ano, é fortemente influenciada por

¹⁶ Tradução adaptada de Steffen *et al.* (2004): “Net primary productivity is a measure of the net amount of carbon assimilated by terrestrial vegetation through photosynthesis over a period of time and represents the basic building block for life on land.”

mudanças políticas e a situação econômica local. Essas influências podem funcionar como um incentivo ao desflorestamento, ainda que não planejado. Por exemplo, em certo momento pode compensar desmatar, principalmente em situações de anistia como o ocorrido no Brasil no contexto do Novo Código Florestal (Garcia *et al.*, 2016), até ao abandono de terras que iniciam um processo de regeneração.

Felizmente, em alguns locais como a Europa e a América do Norte esse fenômeno tem sido revertido à medida que as economias de países pertencentes a essas regiões se convertem de uma economia baseada na indústria para serviços. É importante notar, no entanto, que esse fenômeno só é possível porque a economia desses países propicia que os recursos que antes incentivavam o desflorestamento local sejam importados de outros. Esse padrão, portanto, consiste somente na transferência de uma prática ambientalmente nociva para outros locais e que tais medidas de nada adiantarão se não forem acompanhadas de políticas de incentivo à produtividade em detrimento de pura expansão agropecuária (Fearnside, 2009).

A Atmosfera e o Ser humano

Ao longo do tempo geológico, a composição da atmosfera terrestre foi alterada significativamente e essas modificações foram fundamentais para a vida como conhecemos. No contexto da influência humana, Steffen *et al.* (2004) destacam que os seres humanos têm influenciado a atmosfera por quase tanto tempo quanto a superfície terrestre. Segundo o autor, estima-se que as primeiras alterações significativas nesse meio ocorreram com a fundição de metais, constatadas por meio da análise de testemunhos de gelo na Groelândia, que indicou a origem dessa prática na época dos impérios Grego e Romano. Análises semelhantes com resultados similares foram encontradas em sedimentos de lagos e depositados em ambientes de turfa ou *wetlands*.

No entanto, foi somente nos últimos 100 anos que a magnitude das alterações na atmosfera atingiu níveis sem precedentes devido a uma combinação de fatores como:

“a industrialização em larga escala, o crescimento do setor de transportes, e os efeitos da intensificação e expansão da agricultura, que incluem a aplicação de fertilizantes, queima de biomassa, o desmatamento e a transformação de terras para cultivo e pastagem”¹⁷.

¹⁷ Tradução adaptada de Steffen *et al.* (2004): “[...] wide-scale industrialisation, growth of the transport sector, and the effects of intensification and expansion of agriculture, which include the application of fertilisers, biomass burning, deforestation and clearance of land for cropping and grazing.

A seguir, serão abordadas as três principais fontes de alteração atmosférica, segundo Steffen *et al.* (2004).

I. Gases de Efeito Estufa (GEE)

As concentrações dos principais Gases de Efeito Estufa, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), aumentaram significativamente se comparadas com seus valores no período pré-Revolução Industrial. Desflorestamento e a queima de biomassa têm sido as principais fontes para o aumento das concentrações do CO₂, que manteve-se entre 275 a 285 ppm por cerca de um milênio no período anterior ao século XVII (Steffen *et al.*, 2004) e hoje já ultrapassa a marca dos 400 ppm (Dlugokencky e Tans, 2016).

Já no caso do CH₄, o aumento tem sido ainda mais drástico devido à intensidade com que suas principais fontes têm se multiplicado. São elas: processo digestivo de ruminantes, plantações de arroz, incêndios florestais, emissões de aterros, conversão de “áreas úmidas” (*wetlands*) em agricultáveis e a queima de combustíveis fósseis. Além dessas, teme-se que o maior agravante às emissões desse gás se concentram num possível *loop* de retroalimentação positiva que, ao aumentar a temperatura em ambientes como o norte do Canadá e a Sibéria, ocasionam mudanças globais que aumentam as emissões nos ambientes das florestas boreais, mudanças na hidrologia desses locais e principalmente o derretimento do *permafrost*. Estima-se que a concentração de metano tenha aumentado de 670 ppb no período pré-Revolução Industrial para 1770 ppb em 2004 (Steffen *et al.*, 2004).

No caso do N₂O, o aumento ocorre principalmente devido ao uso excessivo de fertilizantes na agricultura, mas também pela utilização de estrume animal. Estima-se que a concentração desse GEE tenha saído de 285 para 310 ppbv desde a era pré-Industrial.

II. Foto-oxidantes

Além dos GEEs, a composição química da atmosfera tem sido alterada de outras maneiras. Um exemplo desses são os foto-oxidantes como aquele relacionado com o aumento da concentração de ozônio (O₃) na troposfera. Esse aumento, ainda que seja benéfico em barrar radiações nocivas na estratosfera, exerce efeito tóxico em altitudes mais baixas. Em termos totais, a concentração desse gás aumentou por um fator de quatro ou mais no último século.

III. Aerossóis

Segundo Steffen *et al.* (2004), aerossóis são “misturas atmosféricas contendo partículas líquidas ou sólidas de vários tamanhos e compostos suspenso em gases transportadores”¹⁸. O principal problema dessas partículas é que elas se acumulam em grandes nuvens que podem ser transportadas por massas de ar a grandes distâncias, dificilmente impactando diretamente a área responsável pela maior parte de sua emissão. Podem ter origem na queima de biomassa e combustíveis fósseis, assim como pela emissão de poeira em atividades como a extração de minerais. Essa última fonte de emissão está intimamente relacionada, portanto, com a conversão de ambientes naturais para fins antrópicos, principalmente quando essa conversão ocorre de maneira imprudente, deixando o solo exposto ao intemperismo que culmina na erosão e lançamento de particulado na atmosfera.

O Ciclo Hidrológico e o Ser Humano

Desde o período em que éramos caçadores-coletores e principalmente com o estabelecimento das primeiras “cidades”, o modo de vida dos seres humanos sempre foi dependente da existência de fontes de água próximas. Para identificarmos a autenticidade dessas informações, basta olharmos a localização das principais cidades antigas, seja no Egito, Mesopotâmia etc. No caso deste último, por exemplo, o próprio nome significa “meio/entre rios”. Portanto, considerando essa proximidade já mencionada e a forma como temos utilizado os recursos naturais, a água é um dos recursos mais impactados por nossas atividades.

Steffen *et al.* (2004) estima que, apesar da relação de dependência que temos para com esse recurso, as influências de maior significância relacionadas à água iniciaram-se há cerca de 4000 anos, quando foram inventadas as primeiras formas de engenharia hidráulica para atender às demandas da agricultura. Desde então, barragens e reservatórios têm alterado os cursos dos rios, principalmente nos últimos 75 anos, quando esses empreendimentos atingiram números e proporções como nunca vistos. Os autores exemplificam tamanha influência citando que, no hemisfério norte, dos 139 maiores rios, somente 23% não são afetados diretamente pela influência humana. A extensão com que essas alterações têm ocorrido atingem o Ciclo Hidrológico como um todo ao, por exemplo, causar afundamento do nível do solo por sobre-exploração de aquíferos ou como ocorre em zonas costeiras, onde há contaminação do aquífero por meio da intrusão de água salina. Isso acontece porque a capacidade de recarga desses

¹⁸ Tradução adaptada de Steffen *et al.* (2004): “[...] atmospheric mixtures containing liquid or solid particulates of various sizes and compositions suspended in carrier gases.”

aquíferos não é considerada ao se dimensionar a exploração dos mesmos, comprometendo não só a estrutura física da região, como também a capacidade de garantir fornecimento de água no longo prazo. No caso de grandes represas, o próprio regime de chuvas local pode ser alterado devido ao aumento da concentração de água evaporada na região.

Diversidade Biológica e o Ser Humano

Alguns dos pontos aqui mencionados já foram tratados nos itens 5.2 e 5.3, mas vale destacar outros tópicos. As atuais taxas de extinção estão 100 a 1000 vezes mais elevadas do que aquelas do passado, o que enfatiza a existência de um sexto grande evento de extinção em massa (Ceballos *et al.*, 2015). Segundo Caughley G. (1994) *apud* Mckinney (1997), as alterações de origem antrópica são de tamanha intensidade que nos últimos 8000 anos não há casos de extinções documentados que não tenham tido alguma relação direta ou indireta com o ser humano.

Segundo Steffen *et al.* (2004), o histórico da influência do ser humano nesse recurso pode ser dividido em duas etapas. A primeira delas ocorreu quando os humanos modernos começaram a se dispersar por todo o globo há 100.000 anos; já a segunda iniciou-se com a Revolução do Neolítico, estabelecendo um aumento acentuado nas taxas de extinção que ainda viria a se agravar com a Revolução Industrial.

Ainda que existam discussões acerca de uma Sexta Extinção causada pelos seres humanos, não há dúvidas quanto à nossa influência nas extinções de fundo. Nesse contexto, Ceballos *et al.* (2015) avalia que mesmo as estimativas mais conservadoras demonstram que as taxas de extinções de fundo modernas estão anormalmente altas. Um exemplo desse contraste ocorre com os vertebrados, entre os quais se estima que as taxas de extinção históricas eram de 2 E/MSY, isto é, duas extinções por 100 anos em 10.000 espécies. Já as taxas atuais (Figura 11) indicam que esse valor se encontra de nove a 100 vezes maior ou, conforme os autores destacam: “sob uma taxa de fundo de dois E/MSY, nove extinções de vertebrados seriam esperadas a partir de 1900. No entanto, considerando a taxa contemporânea, 468 vertebrados adicionais foram extintos”¹⁹. Em números específicos, das 468 espécies, 69 seriam mamíferos, 80 aves, 24 répteis, 146 anfíbios e 158 peixes.

¹⁹ Tradução adaptada de Ceballos *et al.* (2015): “[...] under the 2 E/MSY background rate, 9 vertebrate extinctions would have been expected since 1900; however, under the conservative rate, 468 more vertebrates have gone extinct [...]”.

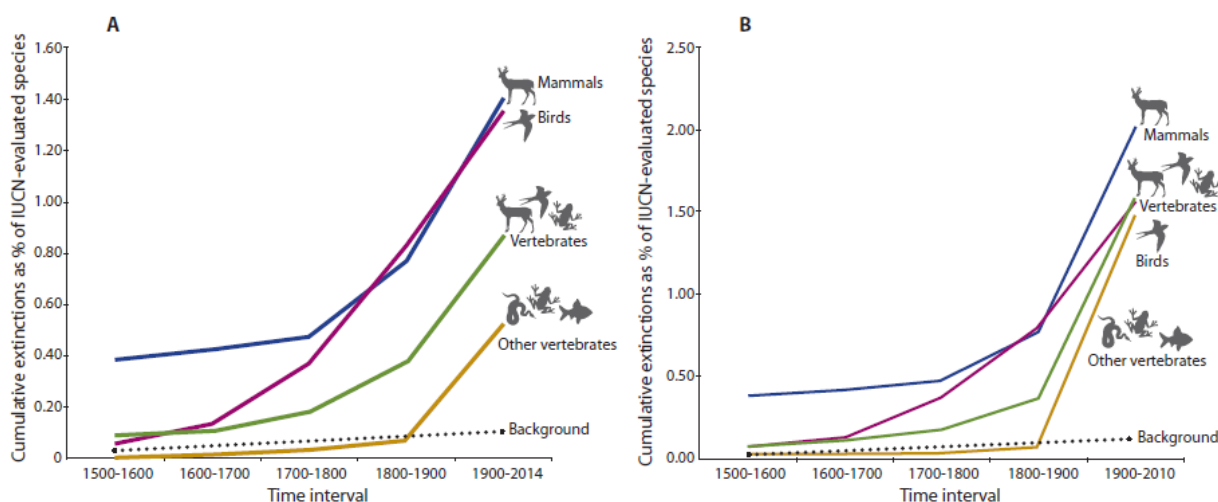


Figura 11 – Percentual de extinções cumulativas de vertebrados do percentual de espécies avaliados pela IUCN, sendo A sob análise altamente conservadora e B conservadora.

Fonte: retirado de Ceballos *et al.* (2015).

Ainda que determinados grupos taxonômicos estejam “garantidos” com um tamanho populacional suficientemente grande para apresentar resiliência em face das pressões seletivas naturais como flutuações genéticas e demográficas, perturbações externas de origem antrópica podem ser determinantes para acionar um processo de *runover* que culmine na extinção desses grupos (Mckinney, 1997). O autor destaca algumas dessas perturbações externas como o “quarteto do mal de Jared Diamond”, que são: perda de habitat, introdução de espécies, extinções em cascata e sobre-exploração (Diamond, 1984).

Diante desse contexto, Steffen *et al.* (2004) afirmam que a mudança de uso da terra ou conversão de terras é a principal causa ou meio pelo qual a biodiversidade é impactada pelas atividades antrópicas. E um dos problemas desse tipo de interferência é que o impacto final nas espécies nem sempre é prontamente percebido, uma vez que há um lapso de tempo natural durante o qual as espécies impactadas resistem por um tempo. Porém, muitas vezes já estão fadadas à extinção por isolamento geográfico aliado à baixa diversidade do *pool* gênico. Já a segunda causa de extinção está relacionada com a introdução de espécies exóticas, seja de forma acidental ou deliberada. Esse fenômeno é particularmente grave em ilhas, onde as consequências podem ser rápidas e catastróficas.

Se as elevadas taxas atuais de extinção continuarem, os seres humanos logo serão privados dos benefícios tanto diretos quanto indiretos da biodiversidade. Conforme Ceballos *et al.* (2015) observaram, na perspectiva humana, essa perda seria permanente, visto que nas outras

Extinções em Massa os seres vivos tiveram centenas de milhares de anos para se recuperarem e “rediversificarem”.

Além do problema mais claro que consiste na perda de biodiversidade, há também a questão das pragas e fauna sinantrópica. Segundo o IBAMA, esse grupo de animais são “populações [...] de espécies silvestres nativas ou exóticas, que utilizam recursos de áreas antrópicas, de forma transitória em seu deslocamento, como via de passagem ou local de descanso; ou permanente, utilizando-as como área de vida” (Barros, 2006). Esse grupo é problemático não só pelo desequilíbrio que causa pela competição com grupos que não são tão bem adaptados nos meios urbanos, como também são nocivos à qualidade de vida humana, refletindo-se sua presença ou deslocamento diretamente em prejuízos econômicos ao Estado. Dentre os motivos que tornam possível a existência e proliferação da fauna sinantrópica, conforme Mckinney (1997) destaca, estão as extinções históricas causadas pelos seres humanos em tempos anteriores à Sexta Extinção (Kolbert, 2015). Isso ocorre porque nós involuntariamente exercemos uma função de filtro, eliminando as espécies especialistas e demais grupos vulneráveis e selecionando aquelas adaptadas e resistentes ao meio urbano.

A figura 12 ilustra, de forma sintetizada, as atividades humanas e suas influências nas diferentes esferas do Sistema da Terra conforme mencionado nos itens anteriores.

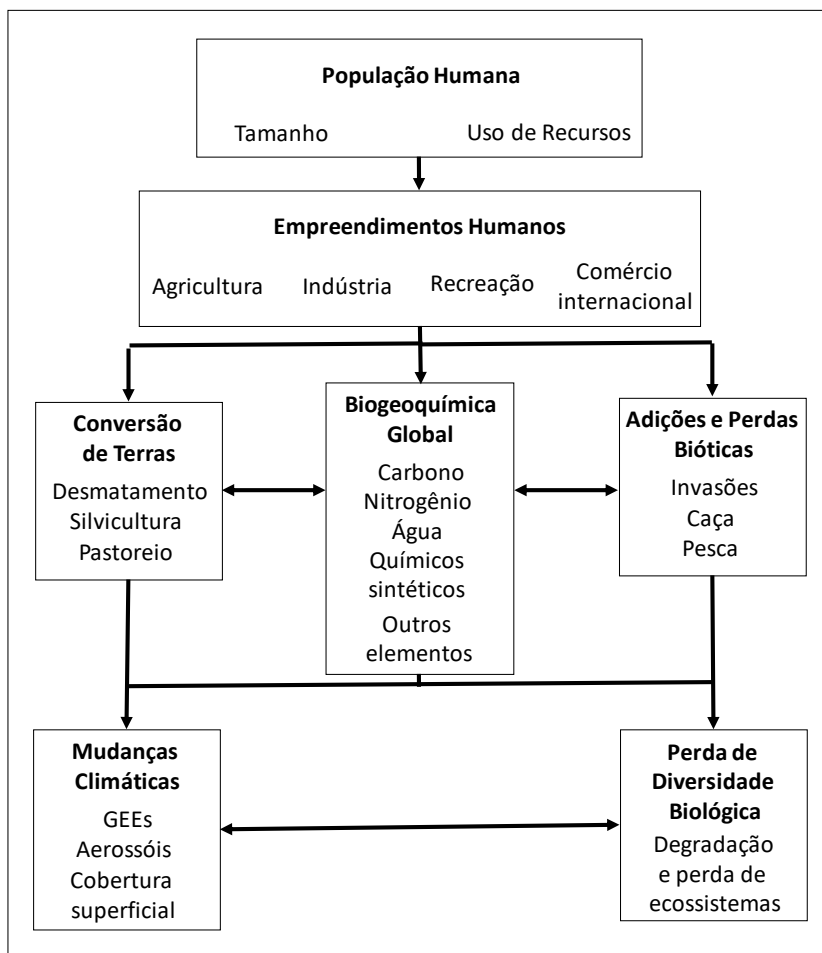


Figura 12 – Interações entre as atividades humanas e diferentes esferas do Sistema Terra.
Fonte: adaptado de Steffen et al. (2004).

5.3.2 O que temos feito

Nesse tópico, serão abordadas algumas iniciativas que visam mitigar ou até eliminar o impacto das atividades antrópicas no curto e longo prazo tanto em termos de pesquisa quanto de políticas públicas.

Biologia da Conservação

Um dos campos que têm se dedicado à mitigação dos impactos antrópicos e proteção da biodiversidade é a Biologia da Conservação. Para isso, pesquisadores dessa área de estudo utilizam uma série de ferramentas e técnicas de estudo ecológico. No entanto, frente à magnitude das alterações ocorridas, a eficácia e a aplicabilidade de algumas dessas técnicas têm sido questionadas, conforme apresentado a seguir.

Restauração, reintrodução e *rewilding* são algumas dessas técnicas utilizadas por especialistas que almejam mitigar ou resolver problemas causados direta ou indiretamente por

ações antrópicas. No entanto, conforme Corlett (2016) destaca, uma característica que todos esses termos têm em comum é o prefixo “re”, que sinaliza a intenção de retornar determinado ecossistema ao seu estado anterior ao distúrbio. Nesse sentido, o objetivo e critério de sucesso para a técnica consiste no quão próximo o estado do ambiente pretendido foi alcançado. No entanto, no contexto das mudanças rápidas e algumas vezes irreversíveis do Antropoceno, utilizar dessa metodologia para estabelecimento de metas e avaliação da eficácia da iniciativa torna-se cada vez mais problemático. A questão então é: essas técnicas devem almejar retornar às condições de quanto tempo no passado. Em outras palavras, quando poderíamos afirmar que determinado local esteve isento de qualquer influência humana? Qual seria o “momento zero”?

Considerando um exemplo específico para avaliarmos a validade das técnicas de conservação já mencionadas, Corlett (2016) destaca o caso das aves migratórias. Para esse grupo, existem técnicas chamadas de Migração Assistida (*Assisted Migration*), que busca mitigar as adversidades que essas espécies passam por meio de um “direcionamento” da migração para regiões mais apropriadas. No entanto, como garantir que todos os demais fatores relacionados à migração estejam “à prova de falhas”? Fatores imprevistos como alterações no período reprodutivo, preferência alimentar, disponibilidade de alimento no trajeto alterado entre outros podem ser decisivos no sucesso dessas estratégias. Diante desses fatores, alternativas conservacionistas têm sido propostas como a De-Extinção (*De-extinction*) que pode atuar como uma solução pontual no longo prazo. Mas, por outro lado sinaliza a que ponto teríamos que recorrer para mitigar os impactos que temos causado.

Assim sendo, Corlett (2016) destaca que apesar de termos sucesso na conscientização sobre a existência dos impactos que temos causado, “a consciência generalizada das mudanças ambientais não tem, no entanto, levado a um consenso sobre como a conservação deve responder a esse contexto”²⁰. Essa decisão, no entanto, é de crucial importância, principalmente em casos específicos em que a velocidade e intensidade das alterações criam uma desconexão entre fenótipo e ambiente, tornando inviável que respostas adaptativas eficazes surjam a tempo.

Nesse contexto, os conservacionistas têm buscado propor metodologias alternativas às constantes alterações antrópicas levando em consideração o nível de modificação ambiental, conforme demonstra o esquema da Figura 13. No entanto, o autor alerta para a necessidade de

²⁰ Tradução adaptada de Corlett (2016): “The widespread awareness of environmental change has not, however, led to widespread agreement on how conservation should respond”.

mudança de um possível paradigma e de passarmos a ter como objetivo não mais um passado inalcançável, mas sim um futuro provável, ainda que incerto.

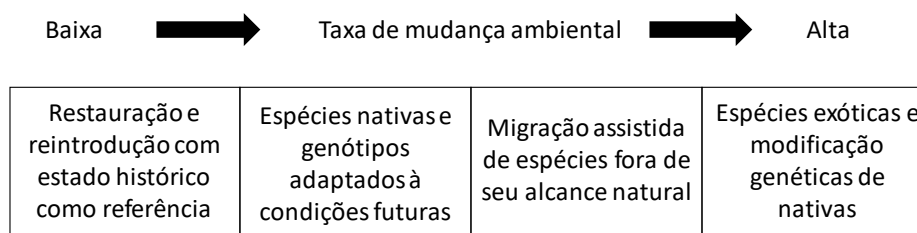


Figura 13 – Metodologias conservacionistas conforme nível de modificação ambiental.
Fonte: adaptado de Corlett (2016).

Políticas Públicas Internacionais

Outra importante dimensão das iniciativas que temos realizado em prol da mitigação das alterações antrópicas acontece por meio de políticas públicas. A seguir serão apresentados de forma breve e em ordem cronológica, os principais acontecimentos globais que almejam à construção de um ambiente mais sustentável para as atuais e futuras gerações.

Primeiramente, para que esses objetivos se concretizem, existem alguns documentos que tornam possível a formalização e ratificação dos acordos negociados por chefes de governo em Atos Internacionais. São eles: Tratados, Convenções, Acordos, Protocolos, Memorandos, Convênios, dentre outros (Dai, 2016).

Ainda que poucas decisões efetivas tenham sido estabelecidas por meio desses Atos, as chamadas Negociações pelo Clima ou pela Sustentabilidade têm ocorrido há algumas décadas. A seguir alguns desses eventos (Figura 14) serão apresentados, seguidos de uma breve descrição das principais contribuições para a Negociação (Nations, 2016).

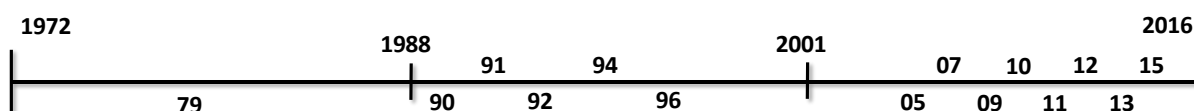


Figura 14 – Escala de tempo com os anos de destaque para as Negociações do Clima.
Fonte: elaborado pelo autor (2016).

-1972

Talvez o primeiro passo em direção à conscientização e comprometimento dos países em prol de um modo de vida mais harmônico com relação ao ambiente tenha sido na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo. Até então, acreditava-se

que os recursos naturais eram inesgotáveis e que a resiliência do Sistema Terra era suficiente para suportar a atitude que os seres humanos mantinham em relação à exploração desses recursos. Nessa Conferência produziu-se dois importantes documentos, a Declaração de Estocolmo com seus 26 princípios e um Plano de Ação para o Meio Ambiente contendo 109 recomendações para políticas ambientais (Unfccc, 2016).

-1979

Após Estocolmo, a primeira Conferência Mundial voltada especificamente para o Clima (*World Climate Conference*) ocorreu em 1979, sem muitas consequências a serem destacadas no contexto do presente trabalho.

-1988

É criado o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*), que a partir de então seria responsável por reunir especialistas na ciência do clima e produzir Relatórios periódicos para subsidiar as decisões das futuras Conferências e dos líderes de Estado (Nations, 2016).

-1990

As primeiras consequências de como as atividades antrópicas têm afetado não só o planeta de forma isolada, mas também a qualidade de vida dos seres humanos passa a ser perceptível e mais difícil de ignorar.

-1991

Ocorre a 2ª Conferência Mundial para o Clima que, com apoio do IPCC, propõe um acordo global para as Mudanças Climáticas. Ao mesmo tempo, a Assembleia Geral das Nações Unidas inicia suas negociações para o estabelecimento das Convenções que resultam na primeira reunião do Comitê Intergovernamental de Negociações em 1991 (Nations, 2016).

-1992

Ano de grande destaque não só por ter sido sediado no Brasil, como também pelas importantes consequências que traria. Na Cúpula da Terra, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*) é assinada, juntamente com a criação da Agenda 21, um plano de ação global que definiu diretrizes que promovessem o desenvolvimento sustentável.

-1994

O UNFCCC organiza a 1ª Conferência das Partes (COP 1) em Berlim, tornando-se a principal referência internacional para a discussão da causa ambiental sob perspectiva das Mudanças Climáticas.

-1996

Em seguida, um dos documentos de maior destaque no assunto surgiu na COP 3 (Japão), intitulado como o Protocolo de Kyoto. Tal documento teve vital importância ao obrigar legalmente que os países buscassem pela redução de suas emissões de GEEs (Nations, 2016).

-2001

O próximo acordo de maior relevância é o Acordo de Marrakesh, que detalhou as regras para implementação do Protocolo de Kyoto. Além disso, o Acordo buscava criar novos instrumentos de financiamento e planejamento para o estabelecimento de um quadro que possibilitasse a transferência de tecnologias sustentáveis entre as Partes signatárias.

-2005

Em Montreal os países signatários discutiram sobre a próxima fase do Protocolo de Kyoto. O resultado dessa discussão seria nomeado em 2006 como o Programa de Trabalho em Adaptação de Nairobi (Nations, 2016).

-2007

O Quarto Relatório de Avaliação do IPCC destacou-se por conseguir alcançar o grande público e tornar a questão das Mudanças Climáticas mais presente na consciência das pessoas. Na COP 13 desse mesmo ano, criou-se o Grupo de Trabalho *Ad-Hoc* sobre Ação Cooperativa a Longo Prazo.

-2009

A COP 15 de Copenhague é destaque por diversos países terem enviado promessas de redução ou mitigação das emissões. No entanto, nenhum acordo firmado teve caráter legalmente vinculante, o que, de certa forma, demonstrava a falta de real compromisso com a causa.

-2010

Assim, foi somente na COP 16, por meio do Acordo de Cancun, que os países tornaram oficiais suas promessas no que ficou conhecido como o maior esforço coletivo no que tange à redução das emissões de GEE até aquele momento (Nations, 2016).

-2011

Já em 2011 novos avanços foram feitos em relação ao reconhecimento e comprometimento quanto às mudanças climáticas por meio da Plataforma de Durban para Ação, elaborada na COP 17. Segundo a ONU, os governos assumiram a necessidade de elaborar um plano jurídico universal para lidar com as alterações climáticas.

-2012

É elaborada uma emenda ao Protocolo de Kyoto intitulada como A Emenda de Doha, que incluiu novos compromissos dos signatários, referente ao período de 2013 a 2020.

-2013

Novos avanços foram feitos na Emenda mencionada e outra das importantes ações ocorridas nesse ano foi a criação de um Fundo para o “Clima Verde”.

-2015

Devido aos poucos resultados advindos das últimas Conferências, grandes expectativas recaíam sobre a COP 21 de Paris. Felizmente, boa parte dessa expectativa foi atendida pelos líderes globais que lá estavam presentes (Focus, 2015). O Acordo de Paris teve vários importantes compromissos legalmente vinculantes para a causa. Alguns deles são: objetivo coletivo de conter o aquecimento global dentro do limite de 2°C; atingir emissão zero de carbono na segunda metade do século XXI; requerimento de que os países se comprometessem individualmente com medidas mitigatórias expressas por meio de “Contribuições Nacionalmente Determinadas” (NDCs) previamente à Conferência; promessa de revisão das NDCs a cada cinco anos; criação de mecanismos que permitam que os países signatários compartilhem de alguns objetivos assim como formas para colaborarem com os demais; mecanismos de transparência que possuam especialistas na análise das metas a serem cumpridas; um objetivo global de aprimoramento das capacidades do Sistema Terra de adaptação, resiliência e redução da vulnerabilidade às alterações climáticas; prover de forma colaborativa a soma de 100 bilhões de dólares até 2025 e aumentar esse valor a partir desse ponto como base para o Fundo do Clima; e um mecanismo de cumprimento não punitivo. Complementando todas essas importantes promessas, a participação e compromisso dos dois maiores emissores de carbono, Estados Unidos e China, teve grande impacto e proveu credibilidade aos esforços dos demais signatários (Focus, 2015).

-2016

Em contraste com este sucesso relativo obtido na COP 21, a COP 22 de Marrakesh aconteceu sob grande desapontamento e temor. Isso ocorreu porque enquanto a Conferência se iniciou no dia 10 de novembro de 2016, um dia antes o republicano Donald Trump foi eleito o novo presidente dos Estados Unidos. Conhecido por visão descrente quanto às Mudanças Climáticas, fontes próximas a Trump sugerem que indicadores da postura do presidente-eleito podem começar com a indicação de Myron Ebell para a Agência de Proteção Ambiental conhecido pelo seu ceticismo. Indicações semelhantes são esperadas no Departamento de Energia e Interior, sinalizando claramente uma mudança de postura do Governo estadunidense quanto à questão climática (Bravender, 2016). Tem-se especulado até mesmo se o presidente-eleito poderia retirar seu compromisso com o Acordo de Paris, conforme comentou durante sua campanha. De acordo com Chemnick (2016) isso é possível, pois o Senado estadunidense ainda não ratificou o acordo, a despeito da tentativa do Presidente Obama em evitar que tal retrocesso ocorra ao forçar a entrada em vigor do mesmo ainda em 2016. Assim, caso se inicie um processo de revogação do Acordo, os requisitos do Direito Internacional exigiriam que tal processo leve cerca de quatro anos para se concretizar, sob pena de violar o Direito Internacional. Nesse contexto, a única alternativa seria que o país se retirasse das UNFCCC, o que encurtaria o processo para um ano, mas traria implicações econômicas indesejáveis por parte dos demais signatários (Chemnick, 2016).

IPCC

Conforme já comentado, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas é o Órgão Oficial responsável por realizar a pesquisa das Mudanças Climáticas. Foi criado em 1988 pela Organização Mundial Meteorológica (WMO) e pelo Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP) para subsidiar os tomadores de decisão com informações científicas dos impactos e riscos advindos das MC, assim como as opções para adaptação e mitigação dos efeitos das mesmas. Por meio de diferentes ações mitigadoras em cenários díspares, os cientistas por trás do desenvolvimento dos Relatórios não dizem quais decisões devem ser tomadas, apenas as consequências que adotar (ou não) cada uma das medidas teria. A composição do Painel é feita por centenas de cientistas indicados pelos Estados que se voluntariam a diferentes papéis em três grandes grupos: I) Ciências Físicas; II) Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade; III) Mitigação das Mudanças Climáticas (Ipcc, 2013).

Segundo o IPCC, o Painel é “comprometido a preparar relatórios que busquem pelos padrões mais altos de excelência científica, neutralidade e clareza” (Ipcc, 2013). Para isso, antes do lançamento da versão final dos Relatórios há um processo de revisão amplamente aberto e criterioso que conta com a participação de centenas de especialistas revisores tanto da comunidade científica quanto dos Estados, resultando em dezenas de milhares de comentários posteriormente considerados pelos autores (Ipcc, 2015).

Por outro lado, o comprometimento do Painel para que os Relatórios sejam representativos, transparentes e colaborativos trazem consigo alguns problemas que podem prejudicar o funcionamento do Painel. O problema mais evidente advindo da composição e funcionamento do Painel consiste no tempo necessário para que todas as Partes concluem o processo de revisão, tornando o lançamento dos Relatórios demasiadamente demorado e possivelmente comprometendo a atualidade das informações científicas neles contidas. Segundo reportagem do The Guardian, constantes críticas quanto aos Relatórios têm sido feitas em virtude das distorções em benefício dos interesses políticos dos Governos envolvidos. Isso porque todo o conteúdo do Relatório deve ser submetido à comunidade, quando emendas são feitas, até que o documento como um todo reflita, de forma unânime, as posições de todas as Partes (Ahmed, 2014).

Com essa politização do IPCC sugere-se que tem-se priorizado a “credibilidade política em detrimento de integridade científica” (Ahmed, 2014). Alguns dos depoimentos concedidos à reportagem do The Guardian ainda enfatizam que algumas alterações são tão drásticas que certos pontos apresentados nos Relatórios acabam ficando sem conteúdo capaz de sustentar os resultados, prejudicando a imagem e credibilidade do Painel e seus Relatórios (Scherer, 2012; Ahmed, 2014).

5.3.3 O que podemos fazer

Buscar soluções para a problemática apresentada dependerá da postura com que iremos nos colocar frente à questão. Precisamos assumir nossa responsabilidade como força geológica capaz de alterar o funcionamento da Terra em amplitude global e não temos aplicado essa capacidade em uma direção saudável. Não estamos nos colocando como causa de um problema analogamente jamais presenciado na história terrestre. Se quisermos manter uma qualidade de vida confortável em um futuro próximo, precisamos corrigir nosso posicionamento perante o meio. Deixando de ser a causa para os problemas ambientais globais para solucionadores dos mesmos.

Nesse contexto, uma das informações essenciais à proposta de estratégias que visem mitigar os impactos das Mudanças Globais é compreender como a não-aleatoriedade que envolve os processos de extinção ocorre. Ou seja, identificar quais grupos taxonômicos estão mais vulneráveis.

Caso o processo fosse exclusivamente aleatório, restariam poucas possibilidades de propor estratégias que fossem eficazes com objetivos pontuais claros e alcançáveis. No entanto, em se tratando de processos não aleatórios, cria-se uma oportunidade de grande potencial que consiste na compreensão dos motivos para que esse viés nos processos de extinção ocorra. “Para a Biologia da Conservação, a importância em compreender a propensão à extinção é de fornecer subsídios para uma conservação pró-ativa, ao contrário das abordagens atuais que em sua grande maioria podem ser classificadas como reativas e fragmentadas”²¹. Conforme apresentado no item 5.2, estudos têm buscado abordar essa questão. No entanto, a complexidade das variáveis que atuam na determinação da propensão à extinção de uma espécie dificulta a pesquisa, o que é agravado pelas particularidades que cada grupo taxonômico e seu respectivo habitat possuem.

Uma vez estabelecido que a abordagem pontual baseada em informações como a propensão à extinção das espécies ainda está longe de ser compreendida e aplicada em sua plenitude, resta-nos permanecer com as abordagens clássicas com objetivos mais abrangentes. Assim, Ceballos *et al.* (2015) destacam que as prioridades para evitar a Sexta Grande Extinção devem ocorrer por meio da intensificação das medidas de conservação, principalmente objetivando a perda de habitat, sobre-exploração em virtude de ganho econômico e as mudanças climáticas.

Para iniciarmos a análise dessas propostas é preciso compreendermos o contexto de produção e consumo que têm ditado as regras de nosso convívio com o meio. Nesse sentido, dois dos conceitos importantes são:

- Motivadores Próximos (*Proximate Drivers*) – que são constituídos pelas atividades humanas que causam as mudanças ambientais de forma direta;
- Motivadores Definitivos (*Ultimate Drivers*) – constituídos pelas demandas humanas que acabam por definir os padrões de produção e consumo.

²¹ Tradução adaptada de Mckinney (1997): “or conservation biology, the importance of understanding extinction proneness is to ‘provide a basis for proactive conservation, ’instead of current approaches that are largely ‘reactive and piecemeal’”.

Nesse cenário, a simplificação de situações complexas por meio de uma relação de causa e efeito auxilia na escolha da melhor abordagem mitigadora. Nesses casos, pressões populacionais e a situação econômica dos cidadãos envolvidos têm sido destacados como as principais causas para tal motivação. No entanto, utilizando os dois conceitos apresentados torna-se possível encontrar outros importantes motivadores como falhas de política e mercado que tornam a “floresta no chão” mais rentável do que preservada (Figura 15).

Ciclo natural alterado	Motivadores próximos	Motivadores definitivos
Superfície terrestre	Desmatamento (corte e queima), práticas agrícolas (lavoura, fertilização, irrigação, controle de pragas, culturas de alto rendimento etc), abandono de terra.	Demanda por alimentos (e preferências dietéticas), recreação, outros bens e serviços do ecossistema.
Atmosfera	Queima de combustíveis fósseis, mudança de uso da terra (práticas agrícolas), queima de biomassa, tecnologia industrial.	Demanda por mobilidade, produtos, alimentação.
Água	Barragens, represas, sistemas de reticulação, técnicas de eliminação de resíduos, práticas de gestão.	Demanda por água (uso humano direto), alimentos (irrigação), produtos de consumo (uso de água em processos
Costas/Marinho	Conversão da cobertura de terra, remoção de água subterrânea, intensidade e técnica de pesca, padrões de construção costeira, tecnologia de tratamento de esgotos, urbanização.	Demanda de recreação, estilo de vida, alimentação, emprego.
Biodiversidade	Desmatamento de ecossistemas naturais; Introdução de espécies exóticas.	Demanda de alimentos, segurança, conforto, amenidade paisagem.

Figura 15 – Motivadores Próximos e Definitivos das transformações humanas na Terra.

Fonte: adaptado de Steffen et al. (2004).

Continuando nossa análise de impacto a partir dos meios de produção e consumo, Steffen *et al.* (2004) propõem que consideremos os desafios globais para a sustentabilidade firmados pelo documento *Our Common Future* em 1987 pela Comissão de Brundtland. Nesse relatório, alguns setores em especial são destacados como chave para abordarmos a principal fonte/causa dos impactos globais, são eles: energia, agricultura, sistemas urbanos, recursos bióticos e a população humana. Desde 1987, iniciativas e mudanças de padrões ocorreram de maneira positiva à causa como: redução do consumo e reuso de matéria prima, diminuição da geração de resíduos, aumento da eficiência na geração de energia, busca por alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis, novas tecnologias sustentáveis, aumento de produtividade e melhorias na distribuição de produtos agrícolas, dentre outras.

No entanto, muitos dos problemas levantados pela Comissão de Brundtland permanecem. A situação crítica em que alguns dos recursos naturais essenciais às atividades

humanas se encontram coloca em destaque a proposta de considerar a atuação desses setores de forma conjunta e não mais segmentada por compromissos de melhorias individuais. O reconhecimento dessa sobreposição de influências e impactos em nível global tem levado ao desenvolvimento e planejamento de importantes estratégias integradas. Entretanto, dado o desafio que tal abordagem propõe, é necessário abandonarmos a visão de que as atividades de diferentes setores são isoladas umas das outras devido às suas atividades fins. Pelo contrário, deve ser substituída por uma busca do gerenciamento do Sistema Terra como um todo.

Por mais utópica que essa proposta possa ser, Steffen *et al.* (2004) destacam que nós já gerenciamos os processos desses setores numa escala global, ainda que de modo segmentado e voltado a atender demandas e interesses de grupos específicos. Como resultado dessa visão ultrapassada, o Sistema Terra tem sido forçado em direções que vão além de seu alcance natural à medida que a cultura de consumo ocidental se espalha por outros países e regiões.

Para que tal gerenciamento seja ao menos parcialmente realizável, é preciso diferenciar duas abordagens. A primeira propõe o gerenciamento do **funcionamento** do Sistema, já a segunda não busca manejar o Sistema em si, mas as **atividades humanas** em escala global. Independentemente dos meios pelos quais as duas abordagens se propõem, Steffen *et al.* (2004) ressaltam que o desafio, conforme estabelecido pela Teoria de Sistemas, permanece o mesmo. De acordo com essa Teoria, sistemas complexos como o terrestre não são passíveis de manejo e a única alternativa para aprofundar a compreensão sobre os mesmos, é observar as consequências de decisões/ações já tomadas. A seguir serão apresentadas algumas estratégias de gerenciamento conforme propostas pelo autor (Steffen *et al.*, 2004).

“Business-As-Usual”

Segundo Steffen *et al.* (2004), esta estratégia “é baseada na ideia de que nenhuma medida específica precisa ser tomada com relação às Mudanças Globais, seja para reduzir a velocidade, prevenir ou adaptar a tal fenômeno”²². Para isso, uma série de premissas devem ser consideradas: i) ameaças ao ambiente global são superestimadas ou mal

²² Tradução adaptada de Steffen *et al.* (2004): “[...] built around the belief that no explicit measures need to be taken with respect to global change, either to attempt to slow or prevent it or to adapt to it.”

interpretadas; ii) o Sistema Terra é mais resiliente do que se espera; iii) o funcionamento do mercado atual será capaz de resolver qualquer problema ambiental, ainda que em escalas globais; iv) há problemas mais urgentes que devem receber os recursos necessários para combater as Mudanças Globais.

Como pode ser observado, tais premissas demonstram o quão perigosamente conservadora a estratégia em questão se coloca. Dessa forma, os autores afirmam que a presente estratégia não é apropriada para lidar com os desafios que as mudanças globais representam.

Adaptação

Essa estratégia baseia-se em dois fundamentos: i) as mudanças globais serão moderadas e lentas o suficiente para que os seres humanos tenha tempo e recursos suficientes para se adaptar sem que tenhamos que agir diretamente sobre as Mudanças; ii) o aprendizado sobre a natureza e seu funcionamento é rápido o suficiente para implementarmos medidas adaptativas em tempo hábil de evitar maiores prejuízos.

Outro método um pouco diferente da abordagem clássica de **Adaptação** é a **Resiliência**. Nessa abordagem, assume-se que há muitas incertezas quanto às mudanças globais, tornando mais viável a busca pela compreensão e melhorias na resiliência do Sistema. Nesse contexto, procura-se aprender quais características conferem maior resiliência e as melhores maneiras para replicá-las ou aprimorá-las.

Por mais que ambas as abordagens de **Adaptação** sejam atrativas, o ponto que as tornam falhas, segundo os autores, é a falta de capacidade em prevenir mudanças indesejáveis quando certos limites são ultrapassados. Um exemplo de como essa situação pode ocorrer seria por meio da absorção excessiva pelos oceanos de dióxido de carbono disponível na atmosfera, resultando em acidificação das águas e consequente impactos na biota, principalmente para os corais. Nesse caso, não há nenhuma medida que possa fortalecer a resiliência desses corais, uma vez que a acidificação é uma fragilidade intrínseca a essa forma de vida e o CO₂ já se encontra na atmosfera para ser absorvido.

Ainda que classificada como altamente controversa pelos autores (Steffen *et al.*, 2004), uma terceira forma de Adaptação utiliza de **Soluções Tecnológicas** em nível global. Exemplos desse método variam de planos mirabolantes até outros mais executáveis como o lançamento de espelhos gigantes na órbita ao redor da Terra, injeção de aerossóis na

atmosfera como contramedida aos GEEs, fertilização de plânctons a fim de estimular a absorção de gás carbônico, projetos de reflorestamentos massivos etc. Um dos problemas dessa abordagem está relacionado ao risco em implementar soluções tecnológicas dessa dimensão baseando-se em simples relações causais que dificilmente refletirão a realidade complexa e não-linear do Sistema Terra.

Mitigação

Os métodos apresentados até o momento se caracterizam como técnicas *end-of-pipe*. Ou seja, não focam seus esforços na origem da poluição, mas reagem aos impactos ocasionados pela mesma. Já a **Mitigação** objetiva o oposto do que foi apresentado até então ao buscar diminuir ou eliminar a causa do problema. Em outras palavras, busca gerenciar as atividades antrópicas e não o funcionamento do Sistema. Para isso, utiliza-se de novas tecnologias e formas de produção como melhorias dos modos de transporte, eficiência na produção e consumo energético e a intensificação da desmaterialização da produção e do consumo. Esse último fenômeno sinaliza uma tendência que busca preservar o crescimento dos valores e atividades econômicas, mas sem que a quantidade de material que circula nesse processo também aumente. O grande diferencial aqui é que, apesar de também se apoiar em novas tecnologias e técnicas modernas de manejo, a motivação principal é mitigar ou eliminar as principais forças que movimentam o restante do problema.

Em contrapartida, Steffen *et al.* (2004) ressaltam que somente avanços tecnológicos não serão suficientes para atingir o objetivo ao qual a metodologia de Mitigação se propõe. Será preciso que alguns valores e comportamentos individuais, principalmente do modo ocidental de vida sejam repensados, particularmente os hábitos de consumo.

Novos Paradigmas para a Sustentabilidade Global

Um ponto a se considerar das estratégias apresentadas até então são sua aplicabilidade em escala local. Ou seja, ainda que possam ser replicadas globalmente, sua abrangência continua sendo restrita. Assim, “é necessário uma estratégia geral, abrangente e consistente internamente para a gestão do Sistema Terra”²³(Steffen *et al.*, 2004).

²³ Tradução adaptada de Steffen *et al.* (2015): “an overall, comprehensive, internally consistent strategy for management of the Earth System is required.”

Nesse contexto, os autores sugerem que uma das abordagens mais apropriadas para a questão foi proposta por Schellnhuber em 1998. Segundo esse método, o primeiro passo é questionar alguns pontos fundamentais como: “em que tipo de mundo vivemos agora? [...] Em que tipo de mundo queremos viver? O que devemos fazer para chegar lá? ”.

Nesse contexto, os autores propõem a utilização de indicadores de sustentabilidade, similares aos que já aplicamos para a qualidade do ar, por exemplo. Assim, estabeleceríamos valores máximos e mínimos que não devem ser ultrapassados e todos os valores dentro desse limite estariam adequados para as condições de vida e qualidade ambiental “ideais”. Outro importante ponto na utilização desses indicadores é a possibilidade de realizar monitoramento e medidas punitivas quando necessárias. O único problema dessa metodologia chamada de **Padronização** (*Standardization*) é que os limites/padrões de qualidade estabelecidos estão ligados a certos horizontes de tempo que certamente não permanecerão iguais para sempre.

Otimização (*Optimisation*) baseia-se, basicamente, na maximização da utilidade num contexto mais amplo do que aquele comumente utilizado em economia. No entanto, para atingir o sucesso de tal metodologia seria necessário que alguns *trade-offs* fossem feitos, o que poderia implicar em maximização da qualidade de vida de alguns em detrimento de outros.

Outra abordagem levantada pelo autor é a **Pessimização** (*Pessimisation*). Neste caso, assume-se a premissa de que eventos catastróficos acontecerão e, portanto, o objetivo da abordagem precisa ser o de prevenir que o pior aconteça. Essa abordagem surge com o fato de que eventos catastróficos têm se tornado, já nas últimas décadas, muito mais frequentes, uma preocupação de crescente atenção na grande mídia.

Uma metodologia mais prática da aplicação do princípio da precaução consiste em assumir que o objetivo principal é prevenir que ocorram quaisquer eventos que culminem em mudanças abruptas e irreversíveis. Para isso, deve-se realizar constantes avaliações dos três pilares sustentáveis: econômico, social e ambiental. Nesse contexto, assumindo que somente o pior deve ser evitado, os três aspectos já mencionados são avaliados e, por exemplo, caso o aspecto ambiental seja o de maior importância frente a determinado problema, os outros dois podem ser desconsiderados seja quais implicações decorram dessa decisão. No entanto, utilizar essa abordagem num mundo com crescente desigualdade entre

países não parece justo, uma vez que as consequências para o “bem maior” podem ser muito mais extremas para os grupos mais vulneráveis.

Um dos pontos em comum de todas essas abordagens mencionadas e que fomenta a divergência na aplicação do melhor método de gerenciamento do Sistema consiste em discussões de três grandes grupos com seus respectivos objetivos. O primeiro deles procura a preservação de um convívio no ambiente global entre seres humanos e ambiente conforme idealizado. O segundo busca a restauração de ambientes modificados ao seu estado anterior às alterações ocorridas. E o último deles defende a criação de limites entre ambientes naturais protegidos e isolados da população humana e aqueles em que as atividades antrópicas podem ocorrer.

Em última análise, todos os grupos buscam a estabilização e convívio harmônico no Sistema. No entanto, nenhuma dessas abordagens poderia ser aplicada em sua “forma pura”. Isso ocorre porque deve-se considerar a dimensão temporal do ambiente, que força o entendimento de que dificilmente o Sistema está ou alcançará um estado estável e equilibrado. Portanto, um consenso entre as propostas desses três grupos deve ser o melhor caminho para a sonhada “estabilidade”.

Manejo Adaptativo

Steffen *et al.* (2004) definem essa abordagem como um processo interativo de aprendizado no fazer e no fazer sustentado pelo aprendizado (*an interactive process of learning by doing and of doing based on learning*). Ou seja, admite-se que as decisões de gerenciamento no que concerne à natureza têm se baseado em informações incompletas e que por isso deve-se buscar constantemente por atualizações científicas. Isso ocorre por alguns motivos, mas principalmente devido à complexidade do Sistema desenvolvida através de bilhões de anos de processos evolutivos. Nesse sentido, a noção de que o ser humano tem ou terá o conhecimento necessário para compreender em sua plenitude ou o suficiente do funcionamento da Terra é, no mínimo, ilusória. Além disso, a escala temporal com que muitos dos processos terrestres ocorrem, fazem com que as retroalimentações necessárias ao aprendizado de decisões tomadas sejam demasiadamente longas para que sejam eficazes. Finalmente, além das complexidades mencionadas, a interconexão com que o Sistema funciona significa que decisões tomadas localmente podem ter consequências

para muito além da região planejada, influenciando negativamente na retroalimentação esperada e causando efeitos colaterais indesejáveis.

Por fim, Steffen *et al.* (2004) concluem com uma reflexão a qual devemos/podemos ter como guia para a aplicação das abordagens citadas nesse tópico e para aquelas que eventualmente surjam. Por mais incertos e sem esperanças que a complexidade do Sistema nos faça sentir, o importante é sempre manter a busca por melhores abordagens sem nos esquecer da característica cumulativa intrínseca ao Sistema. Isso porque ao mesmo tempo que resulta em fenômenos catastróficos imprevistos, também propicia que a aplicação constante de pequenas mudanças mitigadoras reflitam-se positivamente no Sistema como um todo. Devemos, portanto, nos questionar:

“Como um grande grupo de nações independentes, com diferentes culturas, valores, riquezas, organização social e visões do mundo, podem se unir para administrar um Sistema Vivo de maneira coerente e eficaz? ”²⁴ (Steffen *et al.*, 2004).

²⁴ Tradução adaptada de Steffen *et al.* (2004): “How can a large group of independent nations with differing cultures, values, wealth, social organisation and world views come together to manage their own single, connected life support system in a coherent and effective way?”

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

*“When different experiments give you the same result,
it is no longer subject to your opinion.
That’s the good thing about science.
It’s true whether or not you believe in it.
That’s why it works.*

— Neil DeGrasse Tyson

A abordagem utilizada nesse estudo buscou apresentar alguns dos processos que permitiram o surgimento da vida na Terra, assim como sua manutenção por meio dos mecanismos evolutivos responsáveis pela biodiversidade. Os seres humanos são parte resultante desses processos e são apresentados como espécie possuidora de características singulares na história geológica. Entretanto, o modo como essa espécie tem se relacionado com seu meio vem comprometendo o funcionamento do Sistema e seus processos de forma tão ímpar quanto a origem e ascensão que a espécie representa.

O primeiro destes processos apresentados possui âmbito Universal, o Efeito Estufa. Essencial à vida na Terra, atua em dimensões tão amplas que se torna presumível a concepção de que seu funcionamento seria isento da possibilidade de qualquer alteração de origem biológica. Por meio da história da Terra primitiva foi possível ter uma noção dos diversos processos originados do acaso e que resultaram no surgimento do ancestral em comum de todas as outras espécies que habitam o planeta. Diversas teorias buscam explicar a forma como esse processo se deu. Mas, o importante para o raciocínio desenvolvido aqui é que foram necessários 600 milhões de anos para que as circunstâncias tornassem possível o surgimento da vida. Essa reflexão nos permite enxergar quão especiais são todas as formas de vida com as quais compartilhamos o planeta, independente de fatores como nossa origem, credo ou classe social.

A partir do momento em que a Seleção Natural pôde atuar, a biodiversidade tornou-se apta a prosperar em suas mais diversas formas com um aparente simples intuito: sobreviver e reproduzir-se, em outras palavras, gerar descendentes férteis. A partir de então, os seres vivos passaram por inúmeras especiações, sempre buscando habitats que obtivessem a maior quantidade e qualidade de recursos disponíveis para consolidar o próprio princípio norteador de sua existência. Por mais egoísta que possa parecer a luta diária de uma espécie pelo simples intuito de gerar descendentes, sob uma perspectiva mais ampla, as espécies buscam continuar existindo, tornar constante o milagre que a vida representou, em outras palavras, viver. Desde

então, diversos desafios existiram no percurso da história evolutiva, desde desastres relativamente recorrentes como impactos de asteroides e erupções vulcânicas, quanto aqueles fomentados pela própria biodiversidade. Um importante exemplo de evento de extinção com origem biológica ocorreu com o surgimento dos primeiros seres vivos capazes de realizar fotossíntese, liberando oxigênio, substância essencial à maioria das formas de vida atual, mas naquele momento tóxico às formas de vida anaeróbicas pré-existentes.

Apesar da natureza prodigiosa da biodiversidade, as Grandes Extinções em Massa mostraram o quanto a vida permanece frágil quando as condições climáticas estão instáveis. Ainda assim, à medida que o tempo passava, os seres vivos se dispersaram por todo o globo a ponto de adquirir a capacidade de influenciar um ao outro (meio-seres vivos), de forma semelhante às relações ecológicas de mutualismo entre as espécies. Dessa forma, assim como mudanças na estabilidade climática afetam diretamente na prosperidade dos seres vivos, a representatividade da biodiversidade em escala global também lhe conferiu a mesma capacidade. Isso significa não só a ocorrência de efeitos em cascata que culminem em extinções, mas também uma relação de estabilização do Sistema. Essa conexão pode demonstrar uma estreita dependência que destaca a importância de preservarmos a biodiversidade dada a falta de informação relativa aos pontos limites em que os impactos sofridos rompem a resiliência do ecossistema, por conseguinte implicando em consequências potencialmente graves e irreversíveis.

Por outra perspectiva, o caso a divergência da América do Sul em relação à África, ilustra a capacidade da biodiversidade em adaptar-se a condições adversas desde que as mesmas aconteçam a uma velocidade lenta o suficiente para que a Seleção Natural atue. Ainda que a biodiversidade tenha mudado significativamente, considerando o início da separação dos continentes até o período atual, o importante a se notar é que não houve uma homogeneização da biota. Todavia, por mais que o devido tempo seja dado, é inegável que as extinções fazem parte da dinâmica da biosfera e, portanto, acontecem de forma natural, muitas vezes possibilitando uma ramificação evolutiva que resulte no aumento da biodiversidade. Assim sendo, as extinções devem ser objeto de estudo na busca pela compreensão do funcionamento do Sistema Terra.

Nesse contexto, um importante campo do estudo da evolução é a capacidade em prevermos quais grupos ou espécies são mais propensos ou vulneráveis a extinção. No contexto das Mudanças Climáticas, a busca por maneiras de identificar essa vulnerabilidade da biota

torna-se mais importante à medida que desejamos salvaguardar os importantes serviços ecossistêmicos restantes. Todavia, assim como a aplicação do conceito de espécie-chave, determinar características universais para a identificação desses grupos é dificultosa, senão impossível dada a variedade de fatores abióticos e bióticos que podem influenciar nesse processo.

Uma vez identificada a dificuldade em aplicar medidas mitigadoras para a biodiversidade no contexto das MC, precisamos considerar a espécie que se encontra na origem dessa problemática do Sistema. Para isso, além de identificarmos como os seres humanos evoluíram até atingir o estágio em que se encontram atualmente, é preciso avaliar de que forma e com qual intensidade essa influência aconteceu nas diferentes esferas do Sistema: a superfície terrestre, a atmosfera, o ciclo hidrológico e a biodiversidade.

Ainda com o ser humano como objeto central da análise, precisamos considerar o que temos feito até o momento como tentativa na busca em amenizar os impactos que temos causado ao planeta. Para esse fim, optou-se por apresentar dois campos de atuação diferentes em sua abordagem, mas semelhantes em sua causa: a biologia da conservação e as políticas públicas internacionais. Nesse sentido pudemos avaliar os desafios enfrentados por parte da comunidade científica e organizações ambientalistas para assumirmos a natureza de nossa interação com o meio como causa das Mudanças Climáticas e em última análise, das Mudanças Globais. Observamos que a conscientização e comprometimento com a causa ambiental têm sido lentos e graduais. Isso significa que o compromisso dos países tem aumentado, mas se têm evoluído a uma velocidade suficiente é algo que não sabemos afirmar com precisão. No entanto, refletindo nossa natureza inconstante e movida por interesses diversos, há uma grave fragilidade nos compromissos assumidos pelos países, bastando a mudar o Chefe de Estado de alguns dos principais tomadores de decisão mundiais para que conquistas e evoluções na causa ambiental sejam colocadas em questionamento.

A despeito dessas dificuldades, diferentes metodologias têm sido propostas com o intuito de eliminar e mitigar as consequências das MC. Entretanto, essas metodologias não são unânimes em sua natureza justamente pelo mesmo problema descrito no âmbito das decisões políticas; há diferentes interesses, mesmo entre os ambientalistas, interferindo diretamente na escolha de metodologias a serem aplicadas.

Por mais que a complexidade do Sistema represente uma barreira para diversos estudos e abordagens mitigadoras, precisamos assumir a premissa de que um consenso unânime baseado em descobertas precisas e decisivas dificilmente aparecerá num tempo hábil aos seres humanos. Nesse sentido, contestações como não sabermos com precisão o número de espécies existentes na Terra ou as consequências em longo prazo da emissão sem precedentes de GEE não devem ser usadas como justificativas para a falta de comprometimento com a causa. Principalmente quando se sabe empiricamente que, sejam quantas espécies existam, é evidente que temos acelerado as taxas de extinções e que os GEE influenciam na intensidade do Efeito Estufa à medida que sua presença na atmosfera aumenta.

Conforme Steffen *et al.* (2004) evidenciam, a resiliência do Sistema Terra não conseguirá continuar passando pelas alterações antrópicas de forma indefinida. Apesar de não conseguirmos afirmar com precisão as consequências de nossas atividades, sugere-se que três resultados podem surgir. O primeiro deles pode ser a estabilização do Sistema em um novo patamar, de forma que mecanismos próprios a esse novo período realizem a regulação. Em um segundo cenário as modificações antrópicas poderiam levar ao estágio anterior às alterações. E o terceiro prediz o aumento na frequência de eventos catastróficos de modo a tornar inviável a vida da maioria dos seres vivos, somente ocorrendo estabilização muito tempo depois.

O que estes três cenários nos permitem ponderar é que o diferencial desse evento com relação a outros do passado é sua velocidade em atuar num cenário global. Atividades humanas ocorridas em qualquer local afetam muitos outros lugares por meio da ação sistêmica. Portanto, dificilmente conseguiremos compreender em sua plenitude as características e consequências de um evento da proporção do Antropoceno enquanto estamos vivendo nele. Resta-nos, portanto, continuar na constante busca por melhor conhecimento do funcionamento do Sistema Terra, aplicar metodologias como essas aqui apresentadas como potenciais mitigadoras das modificações antrópicas e manter um processo de retroalimentação com as iniciativas já aplicadas.

Numa perspectiva otimista, Steffen *et al.* (2004) afirmam que a solução para a problemática ocasionada pelos seres humanos encontra-se na união de três fatores: tecnologias mais eficientes, gerenciamento de recursos mais efetivo e uma mudança de pensamento em direção ao aumento da aprendizagem social e da interconectividade global. Caso isso aconteça, podemos esperar um futuro auspicioso graças a uma grande transição

para uma sociedade global mais sustentável e que objetive as quatro grandes aspirações humanas: paz, liberdade, bem-estar material e saúde ambiental. “De fato, tal transição - para a chamada fase planetária da existência humana - seria a quarta grande era histórica, precedida pela idade da pedra, pela civilização primitiva e pela era moderna²⁵” (Steffen *et al.*, 2004).

Apesar de parecer utópico, acredito que algumas reflexões podem tornar esse destino não tão distante. Para isso devemos considerar a seguinte perspectiva, historicamente somos conhecidos por grandes feitos advindos de ideias disruptivas. Exemplos históricos são as “invenções” do fogo e da agricultura, a revolução industrial e a mais recentemente revolução tecnológica. Sugere-se que, caso retrocedamos meros 50 anos no passado e olhemos para como a tecnologia se desenvolveu em tão pouco tempo, certamente ficaríamos abismados com o que fomos capazes nesse período de tempo. No entanto, essas grandes transformações ocorrem de forma mais rápida quando existem problemas visíveis e iminentes na sociedade, como no temor generalizado pela capacidade de alimentar a todos, as grandes epidemias, e de certa forma, as duas guerras mundiais. Desse modo, como típico de roteiros de Hollywood, é sabido que um “Inimigo” em comum é motivo para modificar nossa atitude, formar alianças e colocar as diferenças de lado.

No caso das Mudanças Climáticas e Globais, ao invés de um “Inimigo” em comum, temos uma Causa em comum, o que a meu ver é de maior benefício à humanidade, pois estaríamos motivados e unidos pela simples causa de todos os demais seres vivos, sobreviver. O problema desse pensamento é a dependência da existência de impactos que sejam perceptíveis, principalmente se refletirem economicamente no dia-a-dia das pessoas. Assim como mencionado no início do tópico sobre o Universo, acredito que sentimento de união semelhante àquele que precisaríamos para enfrentar as mudanças climáticas é aquele proporcionado pela perspectiva cósmica. Tratarei melhor dessa reflexão no epílogo, mas o ponto principal é que sob essa visão, todos os nossos credos, objetivos e rancores são ínfimos ao considerarmos que a Terra é nosso único lar e que simplesmente o compartilhamos não só com os outros seres humanos, como também com todas as demais formas de vida num intrincado Sistema interdependente que potencializa a vida e sua diversidade, mas também nos empodera da responsabilidade de cuidar de nosso lar. É verdade que Extinções em Massa sem retorno já foram causadas por organismos vivos,

²⁵ Tradução adaptada de Steffen *et al.* (2004): “In effect, such a transition – to the so-called planetary phase of human existence – would be the fourth major historical era, following the stone age, early civilization and the modern era”.

ainda que fossem pequeníssimas formas primitivas dos seres fotossintetizantes. Mas, o ponto chave aqui é que nós temos a capacidade e possibilidade de discutir sobre os problemas que temos causado e assumir uma posição resolutiva.

Com essa perspectiva, resta-nos esperar pela transição para a nova era da humanidade e buscarmos oferecer nossa contribuição, por mais restrita que seja, em prol de uma Terra utópica em que as Mudanças Climáticas se tornem, de fato, somente um barulho de alarmistas.

Epílogo

No espírito de união mencionado nas considerações finais, a astronomia é um dos pontos de destaque com grande potencial para fomentar união entre nós. Exemplos de tal capacidade ocorreram, por exemplo, quando a Apollo 11 e Neil Armstrong pousaram na lua enquanto milhões acompanhavam o desfecho do empreendimento. Ao visualizar a dimensão de todo o planeta azul na perspectiva do Universo, o astronauta disse “[...] *one small step for a man, one giant leap for mankind*”. Mais recentemente, efeito similar ocorreu pela campanha de publicidade feita pela equipe responsável pela sonda Cassini. Nessa campanha foi amplamente divulgado que uma foto única tirada de nosso planeta pela sonda que se localizava em Saturno (Figura 18).

Por fim, trago uma transcrição da reflexão feita por Carl Sagan no documentário Cosmos (Malone, 1980) utilizando de uma imagem da Terra vista do espaço a uma distância aproximada de 6 bilhões de quilômetros pela Voyager 1. Pela questão de resolução, iremos considerar a mesma imagem tirada por Cassini em 2013 (Figura 16). Alguns diriam que essa reflexão incute um sentimento de sermos ínfimos, mas a meu ver ocorre o contrário, é transmitido um sentimento de grandeza e união, de esperança.



Figura 16 – Terra vista de Saturno pela sonda Cassini.
Fonte: (National Aeronautics and Space Administration, 2013).

Look again at that dot. That's here. That's home. That's us. On it everyone you love, everyone you know, everyone you ever heard of, every human being who ever was, lived out their lives. The aggregate of our joy and suffering, thousands of confident religions, ideologies, and economic doctrines, every hunter and forager, every hero and coward, every creator and destroyer of civilization, every king and peasant, every young couple in love, every mother and father, hopeful child, inventor and explorer, every teacher of morals, every corrupt politician, every "superstar," every "supreme leader," every saint and sinner in the history of our species lived there - on a mote of dust suspended in a sunbeam.

The Earth is a very small stage in a vast cosmic arena. Think of the rivers of blood spilled by all those generals and emperors so that, in glory and triumph, they could become the momentary masters of a fraction of a dot. Think of the endless cruelties visited by the inhabitants of one corner of this pixel on the scarcely distinguishable inhabitants of some other corner, how frequent their misunderstandings, how eager they are to kill one another, how fervent their hatreds.

Our posturings, our imagined self-importance, the delusion that we have some privileged position in the Universe, are challenged by this point of pale light. Our planet is a lonely speck in the great enveloping cosmic dark. In our obscurity, in all this vastness, there is no hint that help will come from elsewhere to save us from ourselves.

The Earth is the only world known so far to harbor life. There is nowhere else, at least in the near future, to which our species could migrate. Visit, yes. Settle, not yet. Like it or not, for the moment the Earth is where we make our stand.

It has been said that astronomy is a humbling and character-building experience. There is perhaps no better demonstration of the folly of human conceits than this distant image of our tiny world. To me, it underscores our responsibility to deal more kindly with one another, and to preserve and cherish the pale blue dot, the only home we've ever known."

— Carl Sagan, *Pale Blue Dot*, 1994

6. REFERÊNCIAS

- AHMED, N. **IPCC reports 'diluted' under 'political pressure' to protect fossil fuel interests.** The Guardian 2014.
- ASSESSMENT, M. **Millennium Ecosystem Assessment. A toolkit for understanding and action. Protecting Nature's services. Protecting ourselves:** Island Press. Washington. www.islandpress.com/matoolkit/MAToolkit.pdf 2007.
- BADA, J. L. How life began on Earth: a status report. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 226, n. 1, p. 1-15, 2004. ISSN 0012-821X.
- BARROS, M. L. B. **Instrução Normativa. n. 141.** IBAMA. Brasil 2006.
- BRAVENDER, R. **Trump Picks Top Climate Skeptic to Lead EPA Transition.** Climate Wire. Scientific American 2016.
- CEBALLOS, G. et al. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. **Science advances**, v. 1, n. 5, p. e1400253, 2015. ISSN 2375-2548.
- CHEMNICK, J. **Could Trump Simply Withdraw U.S. from Paris Climate Agreement?** Climate Wire. Scientific American 2016.
- COHEN, K.; FINNEY, S.; GIBBARD, P. International chronostratigraphic chart: International Commission on Stratigraphy. **Online at <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2013-01.pdf> last accessed on March**, v. 10, p. 2014, 2013.
- CORLETT, R. T. Restoration, Reintroduction, and Rewilding in a Changing World. **Trends in Ecology & Evolution**, ISSN 0169-5347. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169534716000628> >.
- _____. Restoration, Reintroduction, and Rewilding in a Changing World. **Trends in ecology & evolution**, v. 31, n. 6, p. 453-462, 2016. ISSN 0169-5347.
- DAI, D. D. A. I.-. Tipos de Atos Internacionais. Sistema Consular Integrado, 2016. Disponível em: < <http://dai-mre.serpro.gov.br/apresentacao/tipos-de-atos-internacionais/> >.
- DARWIN, C.; DARWIN, F. E. The life and letters of Charles Darwin. 1888.
- DAWKINS, R.; WONG, Y. **The ancestor's tale: A pilgrimage to the dawn of life.** Hachette UK, 2010. ISBN 0297865412.
- DE CASTRO, B. V. M. et al. Cianobactérias: dos Primórdios da Vida à Formação de um Substrato Atual, o Minério de Ferro. **Geologia**, v. 29, n. 1, 2016. ISSN 0103-2410.
- DE VIVO, M.; CARMIGNOTTO, A. P. Holocene vegetation change and the mammal faunas of South America and Africa. **Journal of Biogeography**, v. 31, n. 6, p. 943-957, 2004. ISSN 1365-2699.
- DIAMOND, J. " Normal" extinctions of isolated populations. 1984.
- DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. **Recent Global CO2.** CO2, R. G. M. Earth System Research Laboratory: National Oceanic & Atmospheric Administration 2016.

FEARNSIDE, P. M. Global warming in Amazonia: impacts and mitigation. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 4, p. 1003-1011, 2009. ISSN 0044-5967.

FOCUS, C. The Paris Agreement Summary. **Briefing Note**, Web page, 2015. Disponível em: < <http://www.climatefocus.com/sites/default/files/20151228%20COP%2021%20briefing%20FIN.pdf> >.

FOLLEDO, M. Raciocínio sistêmico: uma boa forma de se pensar o meio ambiente. **Ambiente & Sociedade, Campinas, ano III**, n. 6, p. 105-143, 2000.

GARCIA, L. C. et al. **Análise científica e jurídica das mudanças no Código Florestal, a recente Lei de Proteção da Vegetação Nativa** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Ciência Ecológica e Conservação (ABECO) 2016. 43.

GEOGRAPHIC, N. Prehistoric Time Line. National Geographic website, 2016. Disponível em: < <http://science.nationalgeographic.com/science/prehistoric-world/prehistoric-time-line/> >.

GILBERT, S. F.; BOSCH, T. C.; LEDÓN-RETTIG, C. Eco-Evo-Devo: developmental symbiosis and developmental plasticity as evolutionary agents. **Nature Reviews Genetics**, v. 16, n. 10, p. 611-622, 2015. ISSN 1471-0056.

GOULD, S. J.; BRITO, C.; BRANCO, J. **O polegar do panda: reflexões sobre história natural**. Martins Fontes, 2004. ISBN 8533619634.

GRINSPOON, D. **Human Impact on Earth with Dr. FunkySpoon**: StarTalk Radio 2016.

HOLLING, C. S. Resilience and stability of ecological systems. **Annual review of ecology and systematics**, p. 1-23, 1973. ISSN 0066-4162.

IPCC, I. P. O. C. C.-. **IPCC Facsheet: What is the IPCC?** IPCC website. 2013

_____. **IPCC Facsheet: How does the IPCC review process work?** . IPCC website. 2015

JABLONSKI, D. The biology of mass extinction: a palaeontological view. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 325, n. 1228, p. 357-368, 1989. ISSN 0962-8436.

JOHANSSON, J.; DIECKMANN, U. Evolutionary responses of communities to extinctions. **Evolutionary Ecology Research**, v. 11, n. 4, p. 561-588, 2009. ISSN 1522-0613.

KOLBERT, E. **A sexta extinção: Uma história não natural**. Editora Intrínseca, 2015. ISBN 8580578051.

MA, Q. Greenhouse Gases: Refining the Role of Carbon Dioxide. **NASA Goddard Institute for Space Studies**. <http://www.giss.nasa.gov/research/intro/ma>, v. 1, 1998.

MALONE, A. **Cosmos** 1980.

MCKINNEY, M. L. Extinction vulnerability and selectivity: combining ecological and paleontological views. **Annual Review of Ecology and Systematics**, p. 495-516, 1997. ISSN 0066-4162.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, N. NASA Releases Images of Earth by Distant Spacecraft. Jet Propulsion Laboratory Website, 2013. Disponível em: < <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2013-229> >.

NATIONS, U. Climate Negotiations Timeline. United Nations website, 2016. Disponível em: < <http://www.un.org/sustainabledevelopment/climate-negotiations-timeline/> >.

NATURE, B. Big Five Mass Extinctions Events. **Prehistoric Life**, BBC website, 2014. Disponível em: < http://www.bbc.co.uk/nature/extinction_events >.

ONU, U. N. F. C. C. C. Paris Agreement: FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. 2015. Disponível em: < https://unfccc.int/documentation/documents/advanced_search/items/6911.php?preref%400008831 >. Acesso em: 19 Junho.

PARVINEN, K. Evolutionary suicide. **Acta biotheoretica**, v. 53, n. 3, p. 241-264, 2005. ISSN 0001-5342.

PONTARP, M. et al. Adaptation of timing of life history traits and population dynamic responses to climate change in spatially structured populations. **Evolutionary Ecology**, v. 29, n. 4, p. 565-579, 2015. ISSN 0269-7653.

QVARNSTRÖM, A. et al. Climate adaptation and speciation: particular focus on reproductive barriers in Ficedula flycatchers. **Evolutionary applications**, v. 9, n. 1, p. 119-134, 2016. ISSN 1752-4571.

RICHTER, V. The Big Five Mass Extinctions. Cosmos, 2016. Disponível em: < <https://cosmosmagazine.com/palaeontology/big-five-extinctions> >.

RICKFLES, R. E. A economia da natureza. **Rio de Janeiro: Editora Guanabara**, 2003.

SAKSCHIEWSKI, B. et al. Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. **Nature Climate Change**, 2016. ISSN 1758-678X.

SCHERER, G. **Climate Science Predictions Prove Too Conservative**. Scientific American 2012.

SCHOPF, J. W. **Cradle of life: the discovery of earth's earliest fossils**. Princeton University Press, 2001. ISBN 0691088640.

SIMBERLOFF, D. Community and ecosystem impacts of single-species extinctions. **The Importance of Species**, p. 221-234, 2003.

STEFFEN, W. et al. Global change and the earth system: a planet under pressure. **New York**, 2004.

UNFCCC, U. N. F. C. O. C. C.-. A Brief Overview of Decisions. UNFCCC Website, 2016. Disponível em: < <http://unfccc.int/documentation/decisions/items/2964.php> >.

WALKER, B. et al. Resilience, adaptability and transformability in social--ecological systems. **Ecology and society**, v. 9, n. 2, p. 5, 2004. ISSN 1708-3087.

WALKER, J. C. Evolution of the atmosphere of Venus. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 32, n. 6, p. 1248-1256, 1975. ISSN 1520-0469.

WILLIAMS, D. R. Venus Fact Sheets. **Lunar and Planetary Science**, National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2016. Disponível em: < <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html> >. Acesso em: 19 Junho.

WORLDOMETERS.INFO. Dover, Delaware, U.S.A., Acesso em: 28 October, 2016.

ZOLNERKEVIC, I. **A Era Humana**. Pesquisa FAPESP. São Paulo: São Paulo FAPESP: 100 p. 2016.