

Processos geológicos de fixação de carbono na Terra e aquecimento global

João Cláudio Toniolo

Graduando em Filosofia, Bolsista de Iniciação Científica, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. E-mail: joaotoniolo@gmail.com

Celso Dal Ré Carneiro

Departamento de Geociências Aplicadas ao Ensino, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. E-mail: cedrec@ige.unicamp.br

ABSTRACT *This article describes the natural processes of carbon capture and relates them to the global warming phenomenon. It focuses on the main geological processes of fixation of this element in Earth's crust, discussing whether or not the Earth responds by itself to atmospheric increases of carbon dioxide, CO₂. The aim of this paper is to assess whether or not it is possible for Earth itself to respond to increased concentrations of atmospheric CO₂ released by human activities. There are uncertainties about the relative speeds of these mechanisms. Accordingly, we analyze critically the point of view of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) which argues that anthropogenic-generated CO₂ is one of the major causes of global warming. Finally, the paper highlights some criticisms to the IPCC position, showing that, despite some scientific institutions have a clear position about the phenomenon, it does not reach any consensus among researchers. The degree of environmental awareness of individuals and companies can stimulate the uptake of new knowledge and techniques that warn about the consequences of the current patterns of consumption, but the movement will be ineffective if they do not vigorously think, more and more, on Nature as a complex system, as provided by Earth Sciences.*

KEYWORDS Carbon cycle, geology, sedimentary processes, carbon dioxide, global warming

RESUMO *Os processos naturais de fixação de carbono na Terra acham-se estreitamente relacionados ao fenômeno do aquecimento global, que constitui a etapa contemporânea das incontáveis mudanças climáticas pelas quais passou a Terra. Neste artigo descrevem-se os principais processos geológicos responsáveis pela movimentação e fixação, na crosta terrestre, do dióxido de carbono, um dos gases de efeito estufa presentes na atmosfera. Pretende-se avaliar se é possível ou não à Terra responder, por si mesma, ao aumento da concentração atmosférica de CO₂ gerado por atividades antropogênicas. Existem incertezas quanto às velocidades relativas dos mecanismos. Nesse sentido, analisa-se criticamente a opinião do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) que afirma ser o CO₂ antropogênico a principal causa do aquecimento. Ao final, destacam-se críticas à posição do IPCC, mostrando que, apesar de alguns órgãos científicos terem posição clara a respeito do fenômeno, inexistente consenso entre pesquisadores. O grau de conscientização ambiental das pessoas e sociedades pode estimular o aporte de novos conhecimentos e saberes que alertam sobre as consequências dos padrões atuais de consumo, mas o movimento será ineficaz se não assumir vigorosamente ser preciso, cada vez mais, pensar a Natureza como um sistema complexo, tal como estabelecem as Ciências da Terra.*

PALAVRAS-CHAVE Ciclo do carbono, geologia, processos sedimentares, dióxido de carbono, aquecimento global

*Este artigo deve ser referido como segue:

Toniolo J. C., Carneiro C. D. R. 2010. Processos geológicos de fixação de carbono na terra e aquecimento global. *Terræ Didática*, 6(1):31-56 <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>>

Introdução

O carbono, elemento fundamental para a vida na Terra, tem sido considerado na atualidade uma possível causa de catástrofes ambientais futuras. Trata-se do fenômeno do aquecimento global, cuja causa tem sido atribuída a esse elemento, na forma de dióxido de carbono, notadamente após o quarto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas¹ (IPCC 2007, Cantarino 2007).

De modo cada vez mais acentuado, os meios de comunicação tratam o fenômeno sob a perspectiva de que a humanidade vem sendo a causa do aquecimento global devido às emissões de CO₂ que promove. Nesse sentido, muito se tem debatido a respeito do tema. Considerando-se *hipoteticamente* o carbono como causa do aquecimento global, suscita-se a questão: a natureza é ou não imune às alterações antrópicas? Algumas perguntas que decorrem desse quadro são:

- O que é possível fazer para mudar a situação?
- Devemos parar de emitir CO₂ se somos responsáveis pelo aquecimento irregular do planeta?
- Será possível capturar o CO₂ para diminuir a temperatura?

A presente revisão e sistematização bibliográfica sobre *Processos geológicos de fixação do carbono na Terra* tem o objetivo de avaliar de que modo a Terra responde ao alegado aumento de CO₂, seja ele antropogênico ou não. Ademais, buscamos saber se a resposta dos sistemas naturais aos incrementos de gases estufa na atmosfera pode ser suficiente para alterar o quadro atual, face ao conhecimento disponível. Ao final, sem avançar para tratamento mais aprofundado do tema, que é objeto de outros artigos (Toniolo e Carneiro 2009, Carneiro e Toniolo 2010), expomos críticas à posição científica dominante, para mostrar que não há consenso entre cientistas acerca do aquecimento global, ao contrário da impressão que se obtém dos meios de comunicação.

Na literatura científica, inúmeros trabalhos abordam o ciclo do carbono, ou tratam de processos naturais que fixam carbono dentro do ciclo. Contudo, é difícil encontrar, em particular na literatura científica brasileira, tratamentos sistemá-

ticos e específicos sobre fixação de carbono. Houve empenho, portanto, em recuperar, sistematizar e revisar a bibliografia pertinente.

O fenômeno do aquecimento global

A energia solar é fonte majoritária do aquecimento da superfície da Terra, na forma de radiação. O aquecimento global é entendido, em Climatologia, como um modo de desequilíbrio radiante. Lembremos que *sistema* é qualquer conjunto interrelacionado e ordenado de objetos, coisas, partes, componentes ou seus atributos, distintos do ambiente ao redor, cuja organização e funcionamento se dá como unidades complexas. Um sistema pode ser formado por qualquer número de subsistemas; são, portanto, 'sistemas dentro de sistemas, dentro de sistemas'... O Planeta Terra é considerado sistema fechado (Christofletti 1999, p. 6) pois, embora se mantenha aberto em relação à energia, na medida em que recebe energia solar e a devolve ao espaço exterior na forma de radiação, é fechado com respeito à matéria. De fato, a Terra permite trocas ínfimas, quase insignificantes, de matéria com o espaço exterior, tanto pelo ingresso ocasional de matéria associada a meteoritos, como por alguma perda de gases das porções mais externas da atmosfera.

Na escala de observação anual, e em termos globais, a Terra permanece em equilíbrio radiante: se considerarmos um determinado intervalo de tempo (p.ex. um ano), a quantidade de radiação solar recebida é a mesma devolvida ao espaço (Ayoade 2001). Desse modo, não há, então, acúmulo de calor na forma de radiação, o que configuraria o aquecimento progressivo, nem excesso de perda de calor, o que configuraria resfriamento progressivo.

O aquecimento é um fenômeno natural e, sendo assim, é benéfico ao planeta: se não existisse, a temperatura média da Terra seria de 18° abaixo de zero (Molion 2008, p. 9). Vapor d'água (H₂O) e dióxido de carbono (CO₂), dois dos principais gases causadores do efeito estufa, influenciam a dinâmica do planeta desde muito antes do surgimento da espécie humana (Houghton 1999, p. 12).

Presume-se que as atividades humanas tenham alterado a dinâmica do fenômeno em relação a seu modo natural; em outros termos, presume-se que houve *intensificação* do aquecimento. Esse modo natural é compreendido da seguinte forma:

¹ IPCC (*Intergovernmental Panel of Climatic Change*), órgão da Organização das Nações Unidas.

da radiação solar que chega à Terra, parte é absorvida pela superfície terrestre, parte é absorvida na atmosfera, pelas nuvens e alguns gases, e outra parte é refletida diretamente de volta ao espaço por nuvens, por alguns constituintes da atmosfera e pela própria superfície terrestre. Depois que uma parte da radiação que chega à superfície interage com esta última, a radiação volta ao espaço, porém em comprimento de onda maior do que chegou. As porcentagens aproximadas com que cada parcela da energia incidente participa de fenômenos na atmosfera e superfície terrestres e retorna ao espaço acham-se referidas na Fig. 1, na chamada 'cascata de energia global'. Os efeitos da vegetação, do relevo, dos dias e noites e das estações do ano são ignorados no balanço de radiação.

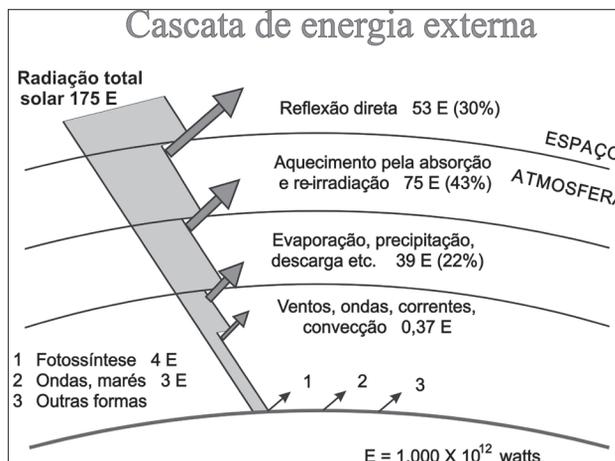


Figura 1 - A "cascata" global de energia. No espectro de ondas eletromagnéticas, a radiação é recebida pela Terra em comprimentos de ondas mais curtas. Depois de passar por uma série de transformações, ondas mais longas são devolvidas ao espaço. A parte da energia que é retida pela Terra devido aos gases-estufa aquece a atmosfera, porém volta a ser devolvida (Modif. de Henderson-Sellers e Robinson 1986, p. 30)

A radiação que anualmente a Terra recebe do Sol atinge 175 E (sendo $E = 1.000 \times 10^{12}$ watts), ou 175×10^{15} watts de energia (Henderson-Sellers e Robinson 1986). Se o valor corresponde a 100% da energia incidente, aproximadamente 20% são refletidos, de volta para o espaço exterior, pelas nuvens e 6% por outros componentes da atmosfera (NASA, Wikipedia 2009); outros 4% são refletidos pela superfície de continentes e oceanos. Portanto, 30% não participam do aquecimento. Restam 70%, dos quais 43% (75E) contribuem para aquecimento

por absorção e re-irradiação e outros 22% (39E) alimentam processos de evaporação, precipitação e descargas na atmosfera (Henderson-Sellers e Robinson 1986). Reduzida parte da energia restante pode ser armazenada (como na fotossíntese p.ex.) ou colocar em operação outros movimentos de circulação de matéria na Terra.

A radiação proveniente do Sol é composta predominantemente (quase 99%) de ondas curtas (de 0,15 a 4,0 μm) (Ayoade 2001, p. 25). Como acabamos de pontuar, a radiação retorna ao espaço modificada, em comprimento de onda na faixa do infravermelho, abaixo da faixa da luz visível ($0,4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,74 \mu\text{m}$), no espectro de radiação eletromagnética. O aquecimento se dá, portanto, pelos gases que primeiro absorvem e depois emitem a radiação infravermelha para a superfície terrestre, fazendo com que a radiação, em vez de voltar ao espaço, retorne à superfície e a aqueça.

A análise das causas do aquecimento global excede os objetivos do presente trabalho, sendo razoável supor, contudo, que um exame mais aprofundado dos fatores envolvidos deve-se estar sempre presente no debate. Molion (2008), dentre outros, fornece descrição pormenorizada dos fatores e causas. O aquecimento é percebido na alteração de diversos aspectos de sistemas físicos e biológicos em diversas partes do planeta (McCarthy 2001, p. 3), os quais indicam que a temperatura global aumentou mais do que naturalmente se esperava.

Albedo

A Terra apresenta albedo médio, ou refletividade natural, da ordem de 0,3, o que significa que 30% da energia solar incidente é refletida para o espaço (Fig. 1), enquanto 70% dessa energia são absorvidos pela Terra e reirradiados na forma de radiação infravermelha. As variações do albedo planetário ocorrem no tempo e no espaço, dentro da média anual de 0,3. Há uma forte variação mensal, dada pela exposição das diferentes regiões da Terra à energia solar, e espacial, porque as superfícies brancas de gelo polar possuem albedo elevado, enquanto os oceanos e as vastas extensões de rochas expostas e terra nua exibem baixo albedo. A contribuição dada por fontes de energia geotérmica e de oscilação das marés é tão pequena que acaba sendo omitida nos cálculos (Wikipedia 2010).

Gases-estufa

Os principais gases causadores do efeito estufa são vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3). São gases transparentes à maior parte da radiação solar; entretanto, quando recebem radiação da superfície terrestre, isto é, o retorno da radiação proveniente do Sol em direção ao espaço, no comprimento de onda do infravermelho, absorvem-na e depois a emitem de volta à superfície (Henderson-Sellers e Robinson 1986), causando aquecimento. Daí o nome de efeito estufa, porque o funcionamento assemelha-se ao de estufas, grandes caixas de vidro em cuja parte interna, após recebida a radiação, ocorre aquecimento das superfícies e dos corpos ali contidos. A frequência da radiação incidente modifica-se e, então, as superfícies aquecidas passam a emitir radiação. Nas estufas, formam-se barreiras para livre circulação do ar. Ocorre retorno parcial para o exterior daquela parcela da radiação que se acha em comprimento de onda menor, enquanto a radiação de comprimento de onda maior incide no vidro e é refletida novamente para o interior da caixa, aquecendo-a. A comparação não é boa, entretanto, pois a atmosfera não é uma barreira física, nem ao menos uniforme. Os gases-estufa mantêm as temperaturas da superfície da Terra em níveis adequados à sobrevivência das espécies: se não existissem, as temperaturas seriam altas durante o dia e baixíssimas à noite.

Os clorofluorcarbonetos (CFCs) também são gases causadores do efeito-estufa. Uma molécula de CFC pode ser de cinco a dez vezes mais eficiente como gás de efeito estufa do que uma molécula de dióxido de carbono (CO_2) (Houghton 1999, p. 37). Entretanto, o principal problema atribuído aos CFCs parece ser o buraco na camada de ozônio, pois o gás exerce papel decisivo na destruição de moléculas de O_3 . A diminuição da quantidade de ozônio na estratosfera possibilita aumento da incidência de raios ultravioleta na superfície da Terra, e pode aumentar a incidência de casos de câncer de pele entre as pessoas. Em função dos efeitos prejudiciais, a utilização industrial dos CFCs foi proibida a partir da década de 1990, depois de acordos entre governos (Houghton 1999, p. 36).

Segundo o quarto relatório de avaliação do GP1² do IPCC, de 2007, os gases dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), nas medições mais recentes de 2005,

[...] aumentaram bastante em consequência das atividades humanas desde 1750 e agora ultrapassam em muito os valores pré-industriais determinados com base em testemunhos de gelo de milhares de anos. Os aumentos globais da concentração de dióxido de carbono se devem principalmente ao uso de combustíveis fósseis e à mudança no uso da terra. Já os aumentos da concentração de metano e óxido nitroso são devidos principalmente à agricultura. [...] (IPCC 2007, p. 2).

Desses gases, o mais importante para o efeito estufa devido à ação antrópica, segundo o IPCC, é o dióxido de carbono (CO_2). Sua concentração atmosférica global aumentou de aproximadamente 280 ppm (partes por milhão), no início da era industrial, para 379 ppm em 2005. Ainda segundo o relatório:

Onze dos últimos doze anos (1995 a 2006) estão entre os 12 anos mais quentes do registro instrumental da temperatura da superfície global (desde 1850). A tendência linear de cem anos atualizada (1906 a 2005), de 0,74 [0,56 a 0,92]°C, é, portanto, mais elevada do que a tendência correspondente para o período de 1901 a 2000 apresentada no TRA, de 0,6 [0,4 a 0,8] °C. A tendência linear de aquecimento ao longo dos últimos 50 anos (0,13 [0,10 a 0,16]°C por década) é quase o dobro da dos últimos 100 anos. O aumento total de temperatura de 1850-1899 a 2001-2005 é de 0,76 [0,57 a 0,95]°C. Os efeitos das ilhas de calor urbano são reais mas locais, exercendo uma influência insignificante nesses valores (menos de 0,006°C por década sobre a terra e zero sobre os oceanos) (IPCC 2007, p. 7).

Além disso, a concentração atmosférica global do dióxido de carbono (CO_2) também foi mais elevada nos últimos dez anos, em comparação com a média de 1960 a 2005 (IPCC 2007, p. 4). A Figura 2 é um gráfico que mostra a elevação da concentração de dióxido de carbono desde 400.000 anos atrás, com destaque, no recorte, para o último milênio (IPCC 2007).

Efeitos do aquecimento do planeta

Na história da Terra houve épocas, antes do aparecimento da espécie humana, em que o planeta esteve submetido a temperaturas muito mais altas ou muito mais baixas que hoje.

² Grupo de Trabalho 1.

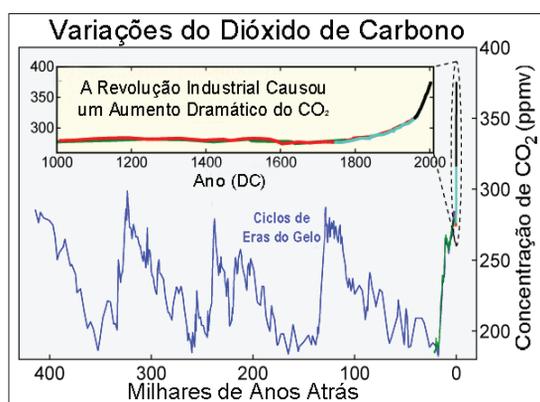


Figura 2 - Gráfico que ilustra o aumento da concentração atmosférica do dióxido de carbono (CO_2) nos últimos milhares de anos, com destaque para o último milênio (Fonte: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1c/Carbon_Dioxide_400kyr.png)

Uma vez estando o sistema fora de equilíbrio, o desequilíbrio pode trazer consequências com as quais a humanidade não está acostumada. Uma barreira é a incerteza em se saber se efetivamente o sistema saiu do equilíbrio, ou se vem ocorrendo flutuação dentro de uma condição estacionária do sistema. O aumento progressivo da temperatura média do planeta, se efetivo, trará em si diversos efeitos (Silva e Paula 2009) que preocupam parte dos cientistas.

A circunstância pela qual não há consciência plena de problemas como esses deve-se ao fato de existir “uma tendência lenta, oculta por grandes e freqüentes variações”, que Diamond (2006) explica do seguinte modo:

[O aquecimento global] não quer dizer que o clima fique exatamente $0,01^\circ \text{C}$ mais quente que o ano anterior. Ao contrário, varia aleatoriamente para cima e para baixo de ano a ano. Certo verão, a temperatura pode estar uns três graus mais alta que no anterior. No ano seguinte, ainda mais dois graus. Depois, o verão pode ficar quatro graus abaixo. Um grau mais frio no próximo, então cinco graus mais quente no outro, etc. Com flutuações tão grandes e imprevisíveis, demorou muito tempo até que a tendência média de aumento de $0,01^\circ$ por ano fosse discernível. (Diamond 2006).

Entre os efeitos tidos como prejudiciais estão: (1) o aumento do nível dos mares; (2) diminuição da disponibilidade de recursos hídricos; (3) impacto na agricultura, com conseqüente defasagem no

fornecimento de alimentos; (4) Impacto no padrão mundial de correntes oceânicas; (5) impacto em ecossistemas naturais; (6) problemas de saúde nos seres humanos. Algumas alterações na dinâmica planetária vêm sendo notadas, como as citadas no relatório de IPCC (2007). Por exemplo, o nível do mar não subiu seis metros, como sugere a simulação da figura 4, porém ocorreram mudanças da ordem de centímetros. É importante destacar que são efeitos possíveis, mas não efetivos, embora a posição assumida pelos dirigentes e apoiadores do Painel Internacional sobre as Mudanças Climáticas seja a de não haver “sombra de dúvida a respeito” (Veiga 2008a) do aquecimento, o que colide com o conteúdo dos documentos produzidos pelo IPCC, nos quais sempre “algum grau de incerteza é reconhecido” (Veiga 2008b).

Apresentam-se aqui os efeitos possíveis, e alterações já observadas por certos estudos. Em seguida, mostrar-se-ão, por outro lado, argumentos daqueles que não acreditam nos efeitos prejudiciais possivelmente causados pelo CO_2 antropogênico e pelo aumento da temperatura, junto com evidências dos benefícios que o aumento dessa substância exerceria sobre o ecossistema terrestre. Os argumentos dessa linha de investigação sugerem que, em lugar de ser o CO_2 um poluidor ou algo maléfico, trata-se de substância essencial na dinâmica biológica do planeta.

1) Aumento do nível dos mares

O aumento do nível dos mares pode trazer consequências significativas às edificações situadas próximas ao mar, comerciais, residenciais, ou de qualquer outro tipo, por uma questão de localização. Com o aumento do nível, seus ocupantes deverão se mudar.

De acordo com observações realizadas desde 1961, a temperatura média do oceano global aumentou, pelo menos de 3.000 m de profundidade até a superfície. O oceano também tem absorvido mais de 80% do calor acrescentado pelo clima. Assim, esse aquecimento faz com que a água do mar se expanda e o nível do mar se eleve. Outro fator que contribuiu para o aumento do nível dos mares é o derretimento de certas geleiras e calotas. Segundo o já referido relatório do IPCC,

“[...] As geleiras montanhosas e a cobertura de neve diminuíram, em média, nos dois hemisférios.

Reduções generalizadas das geleiras e calotas de gelo contribuíram para a elevação do nível do mar (as calotas de gelo não abrangem as contribuições dos mantos de gelo da Groenlândia e da Antártica [sic.] [Antártida, N.A.]) [...]” (IPCC 2007, p. 7).

O gráfico da figura 3 ilustra o aumento médio do nível dos mares, em centímetros, a partir do final do século XIX, baseado em dados de marégrafos e, a partir do final do século XX, por altimetria em satélites.

Uma simulação que emprega imagens de

satélite (Fig. 4) ilustra o quão significativo será o aumento no nível do mar em algumas regiões, caso aumente o aquecimento da Terra. As imagens referem-se à América do Sul; manchas de cor clara indicam áreas invadidas graças à elevação do nível do mar. É importante ressaltar a escala das imagens. Embora as áreas afetadas em vermelho pareçam pequenas, é grande a extensão das regiões atingidas. Por exemplo, uma elevação do nível do mar da ordem de 6 m inundaria a maior parte da Ilha de Marajó, porque a ilha e a região continental adjacente possuem grande extensão geográfica.

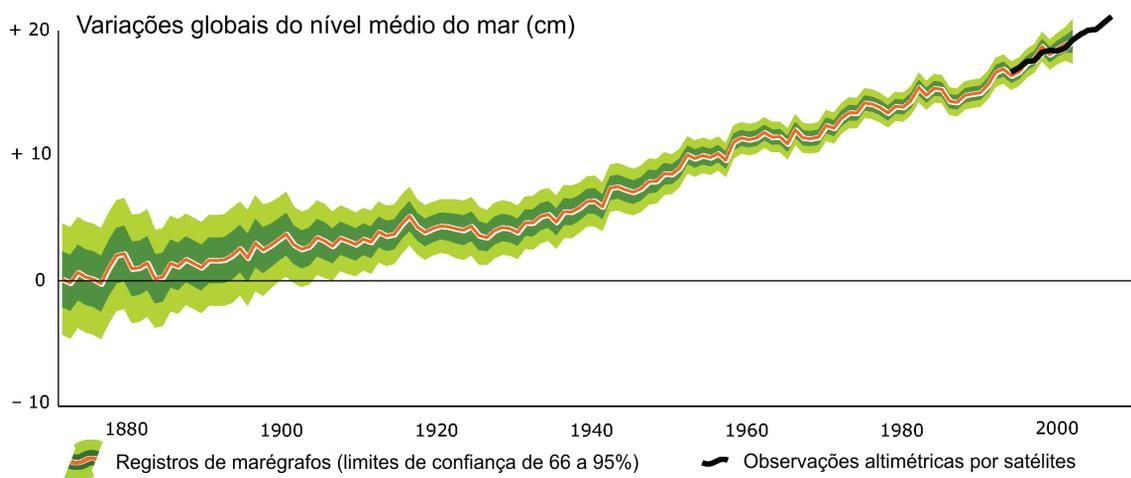


Figura 3 - Variações médias do nível dos mares, em centímetros, em escala global, com base em registros mareográficos e por altimetria de satélites; período de 1880 a 2000 (Modif. de Church e White 2006)

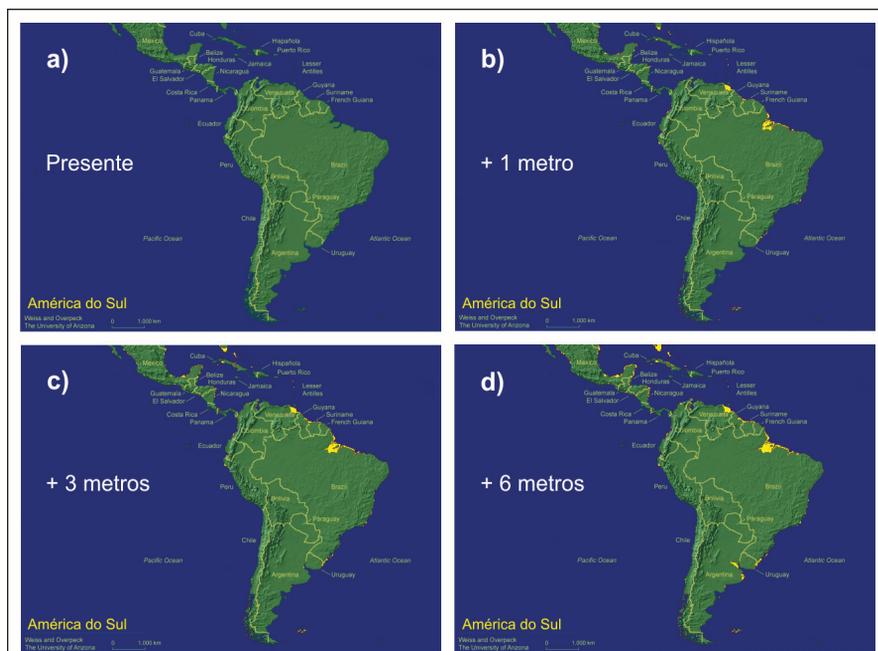


Figura 4 - Imagem da atual situação da América do Sul com relação ao nível dos oceanos: a) situação atual; b) América do Sul com o nível do mar elevado 1 metro; c) com três metros; d) com seis metros (Fonte: URL: http://www.geo.arizona.edu/dgesl/research/other/climate_change_and_sea_level/sea_level_rise/sea_level_rise_old.htm#images, Environmental Studies Laboratory, Department of Geosciences, University of Arizona 2008)

2) Diminuição da disponibilidade de recursos hídricos

O ciclo da água é fundamental para manutenção da vida na Terra. A evaporação dos oceanos contribui para precipitação nos continentes; os rios e aquíferos são como fontes básicas do recurso. A agricultura depende da água para a produção; a indústria a utilizará para produzir os bens que a sociedade utiliza e assim por diante.

Dois terços da água que os humanos utilizam são destinados à agricultura, especialmente para irrigação (Houghton 2004, p. 157). Aproximadamente um quarto é destinado à indústria. A utilização de água no planeta é irregular (Houghton 2004, p. 156): há lugares que esbanjam recursos hídricos, com médias de 1630 m³ de água per capita por ano (Areppim 2008), enquanto em outros a média é de 100 m³ per capita por ano, sendo necessário percorrer longas distâncias para conseguir alguns litros de água. Além de motivos sócio-políticos, as pessoas sofrem dificuldades para obter água devido a fatores naturais, em alguns lugares. Em cenários de aumento de temperatura, a disponibilidade de água doce poderá ser afetada substancialmente, fazendo com que grandes proporções de água sejam evaporadas. Com isso, o ciclo da água seria alterado. Algumas regiões podem sofrer inundações e, outras, secas (Houghton 2004, p. 115-123), com intensidade ainda maior do que a verificada em algumas regiões naturalmente secas.

Um exemplo associado à intensificação da seca é a desertificação. Em outros termos, o cenário contempla efeitos marcantes da mudança climática, com o potencial de desequilibrar o ambiente em que algumas sociedades se encontram. Por outro lado, é evidente que tal previsão despreza o conhecimento geológico e geomorfológico. Nos últimos milhares de anos, quando a distribuição dos continentes se tornou aproximadamente a mesma de hoje, os registros das variações climáticas pleistocênicas revelaram que períodos de resfriamento geraram climas mais secos, enquanto períodos mais quentes que o atual geraram expansão das áreas úmidas.

3) Impacto na agricultura

As sociedades humanas são notavelmente sensíveis a variações das condições climáticas (Diamond 2006). Vimos que dois terços da água utilizada pelos seres humanos destinam-se à agricultura. Portanto, em um cenário de mudança

climática a agricultura poderá sofrer significativos impactos. O clima é fortemente ligado à agricultura. Climatologia e Meteorologia estão em constante diálogo com os agricultores, já que o clima é fator muito importante para se pensar nas safras e na criação de animais. As plantações precisam de climas relativamente estáveis para se desenvolver. Dependendo do quadro que se colocar, poderá haver de um lado longos períodos de seca e, de outro, excessos de precipitação (Houghton 1999, p. 125). De fato, com os avanços da biotecnologia algumas espécies ficam mais resistentes a diferentes condições climáticas. Discute-se até que ponto a tecnologia será suficiente em futuras mudanças no cenário climático global. Por outro lado, existem registros dos últimos milhares de anos, baseados em observações regionais, que revelam correlação entre o aumento da temperatura média global e sua associação com climas mais úmidos. Em contraponto, durante períodos frios as áreas desérticas podem se expandir, em área, em virtude da menor disponibilidade de água em circulação na atmosfera.

4) Impacto no padrão mundial de correntes oceânicas

Oelkner e Cole (2008, p. 305) ressaltam que o problema do conteúdo de CO₂ atmosférico e aquecimento global não é isento de controvérsias; assinalam a conhecida solubilidade retrógrada de CO₂ na água do mar: o aumento de temperatura diminui a quantidade de CO₂ que os oceanos são capazes de reter. Isso é consistente com a possibilidade de que o aumento no CO₂ atmosférico *suced*a o aquecimento global – e portanto não seja *causa* do fenômeno, mas sua *consequência*. Portanto, com o aumento de temperatura, o CO₂ se exsolve da água do mar, “aumentando a proporção de CO₂ na atmosfera”. Aumento de CO₂ atmosférico significaria aumento de temperatura do ar e derretimento das geleiras calotas polares e geleiras de altitude.

O mecanismo de aquecimento global e derretimento das geleiras seria capaz de deflagrar nova era glacial, da seguinte forma (Oelkner e Cole 2008, p. 305-306): à medida que as geleiras se fundem, a salinidade da água do mar diminui, o que “reduziria dramaticamente a circulação oceânica” profunda, causando redução de velocidade de correntes como a do Golfo, que transporta “água quente do Golfo do México para o norte da Inglaterra e Noruega”, resfriando,

consequentemente, “o Atlântico Norte” (Oelkner e Cole 2008, McManus et al. 2004).

5) Impacto em ecossistemas naturais

Segundo Houghton (1999, p. 125), podem acontecer mudanças rápidas no clima que, neste caso, referem-se aos tempos e velocidades comuns na natureza.

“[...] variedade de plantas e animais que constituem um ecossistema local é sensível ao clima, ao tipo de solo e à disponibilidade de água. [...] As árvores são longevas e levam um longo tempo para se reproduzirem [...]” Com isso, um aumento da temperatura é sensivelmente importante às florestas, que cobrem aproximadamente um quarto dos continentes, tendo em vista que a velocidade de reprodução das árvores talvez não responda a uma rápida mudança do clima (Houghton 1999, p. 127).

As florestas são sinônimo de boa qualidade do ar: exercem papel importante na dinâmica do Sistema Terra, regulando a precipitação, protegendo o solo, contribuindo em parte na fixação do dióxido de carbono (CO₂) e consequente liberação de oxigênio, entre outros papéis importantes. Lembremos, porém, que nas pesquisas acerca do balanço entre O₂ e CO₂, os processos de fotossíntese e de respiração se equilibram e por conseguinte não se revelaram dados conclusivos acerca de serem as florestas maduras grandes “produtoras” de O₂ ou de ar puro. Além disso, durante o Pleistoceno é bem conhecido que as florestas também mudaram seus limites à medida que o clima mudou, mesmo nos intervalos em que houve rápidas e lentas mudanças climáticas.

6) Impacto na saúde dos seres humanos

Na perspectiva, dificilmente questionável, de que a saúde humana depende de um bom ambiente (Houghton 1999, p. 127), têm sido levantados alguns fatores de impacto relacionado a eventual aumento da temperatura média do planeta. De certo modo, as afirmações são polêmicas e até mesmo questionáveis porque constituem inferências com alto grau de incerteza:

a) Inadequado suprimento de água, por conta da diminuição dos recursos hídricos acima aludidos. Associadas a isso, as secas, que trazem

prejuízo à agricultura alimentícia.

- b) Inundações, que constituem em eventos extremos, como as secas. Também trazem problemas à agricultura de alimentos, além daqueles associados à malha urbana, põem em risco e matam centenas de pessoas com invasão de água nas casas, veículos etc.
- c) Bruscas elevações de temperatura, como as ondas de calor que afetaram a Europa em 2003.
- d) Insetos transmissores de doenças adaptam-se melhor em condições mais quentes, o que traria maior probabilidade de epidemias. Um exemplo é a malária. Não obstante, as previsões acerca de expansão das pragas são incompletas, uma vez que aparentemente se trata de modelos “pouco evolutivos”: o tempo de reprodução e sucessão de uma geração de insetos para outra é muito pequeno para ajudar a explicar a disseminação da malária, da dengue etc. Em outros termos, as variáveis podem não ter qualquer relação com o aumento de temperatura.

7) Outras visões: benefícios trazidos pelo aumento do CO₂ e da temperatura

No *Center for the Study of Carbon Dioxide and Global Change* (CSCDGC), instituição criada a fim de avaliar as consequências climáticas e biológicas do contínuo aumento no teor de CO₂, em sua revista *online CO₂ Science* o Dr. Sherwood Idso, uma autoridade mundial em Botânica Ambiental e Experimental, apresenta vídeo chamado *Carbon Dioxide: The Breath of Life* (Dióxido de Carbono: O Sopro da Vida). Segundo Idso (2009), as pesquisas experimentais com diferentes tipos de plantas, tanto terrestres quanto marinhas, mostram que, quanto maior a concentração de CO₂ em uma biosfera, maior é sua biomassa, e portanto maior é seu tamanho e disponibilidade. Segundo os dados, pesquisados ao longo de 19 meses, ele relata que:

Comparada com a biosfera de mais baixa concentração de CO₂, a biosfera que continha 70% a mais de CO₂ produziu 105% mais biomassa; enquanto a biosfera que continha uma concentração de CO₂ 160% maior, produziu uma biomassa 140% maior. E assim eu continuei, e a biosfera com uma concentração de CO₂ 225% maior produziu uma biomassa 205% maior. Finalmente, a biosfera com a concentração de CO₂ 275% maior, produziu uma biomassa 265%

maior (Idso 2009).

Nesse sentido, o CO_2 é visto como benéfico. Em vez de causar diminuição da biomassa e, conseqüentemente, um prejuízo aos ecossistemas terrestres, o Dr. Idso mostra que o CO_2 aumenta a biomassa, porque favorece o metabolismo dos seres vivos. Conclui Idso (2009):

Claramente: o dióxido de carbono (CO_2) não é um poluente. Baseado numa enorme quantidade de experimentos que conduzi ao longo dos últimos 25 anos, com dúzias de plantas diferentes, tanto terrestres como marinhas, em minha própria casa, usando o ar exalado dos meus pulmões [fonte de CO_2], bem como em experiências de campo e em laboratórios com os melhores equipamentos disponíveis, em colaboração com os melhores cientistas que já estudaram o assunto, cheguei à conclusão insofismável de que o dióxido de carbono é, verdadeiramente, o sopro da vida, para praticamente todas as plantas na face da Terra, bem como para aquelas em lagos, rios e oceanos. O que implica ser o CO_2 o sopro da vida para todos os animais, incluindo o homem, uma vez que, em primeira e última análise, somos totalmente dependentes dessas plantas para alimentar a todos esses animais (Idso 2009).

Além de Sherwood Idso, outros cientistas do *Center for the Study of Carbon Dioxide and Global Change* compartilham opinião semelhante, vendo o CO_2 como benéfico. Entre eles estão John Christy (University of Alabama), Willian Happer (Princeton University), Brian Valentine (Department of Energy USA) e Ross McKittrick (University of Guelph) (cf. CSCDGC 2009). Parte desses cientistas também não vê o aumento da temperatura como maléfico (Ibidem 2009).

No Brasil, um exemplo notável de cientista que vê o aumento de temperatura como benéfico é o geógrafo Aziz Ab'Saber. Diz ele que:

“Sim, seja ele [o aquecimento] mediano ou vago-roso, mas, quanto mais calor, a tendência, no caso da mata Atlântica e da Amazônia, é que elas cresçam e não que sejam reduzidas. (...) A gente que observa o céu vê que as nuvens estão subindo e sendo empurradas para a Serra do Mar, levando mais umidade para dentro do território” (Oms 2009)

Deve-se enfatizar, entretanto, que a posição

do Prof. Aziz é oposta à do IPCC, não porque o dióxido de carbônico seja “bom”. Na medida em que analisa dados regionais de mudança climática vinculados aos últimos milênios, o pesquisador tem registrado que os máximos de temperatura associam-se a climas úmidos. São períodos em que a floresta cresce e se reduz a extensão das áreas de cerrado e de caatinga. Essa posição é contrária àquelas que prevêm desertificação de florestas como a amazônica e a atlântica no Brasil.

Fixação do carbono pelo Sistema Terra

O termo fixação é usual para descrever um fenômeno que muitos autores, como por exemplo Roscoe (2003), tratam como sequestro. Sequestro e fixação dizem respeito a um mesmo fenômeno, que é a absorção do dióxido de carbono por determinado meio. Se o aquecimento atualmente observado tem no aumento do dióxido de carbono a principal causa do fenômeno e se, além disso, a origem do gás fôr predominantemente antrópica, a fixação do carbono pode ser esperança para o quadro futuro do clima associado ao dióxido de carbono. A fixação acontece naturalmente, porque faz parte da dinâmica do Sistema Terra. Há diversas formas de fixação, tanto nos oceanos como nos continentes. Os oceanos são os mais importantes sorvedouros do dióxido de carbono atmosférico, enquanto os ecossistemas terrestres assumem papel secundário (Roscoe 2003, p. 217).

Nos oceanos, a principal forma de fixação é a transformação do dióxido de carbono para formar carbonatos por meio da precipitação. Dizemos que se trata de precipitação química/biogênica porque pode ocorrer tanto por influência inorgânica como por ação biológica. No ambiente terrestre, pode ocorrer principalmente pela fotossíntese de organismos vegetais e, secundariamente, por reações químicas em rochas que sequestram dióxido de carbono. Uma imagem aproximada do ciclo do carbono encontra-se na figura 5, que ilustra o contexto em que ele se desenvolve.

Fixação de carbono nos oceanos

a) Absorção do CO_2 atmosférico pelos oceanos

Os oceanos absorvem dióxido de carbono (CO_2) por dois processos: 1) biológicos; e 2) físicos:

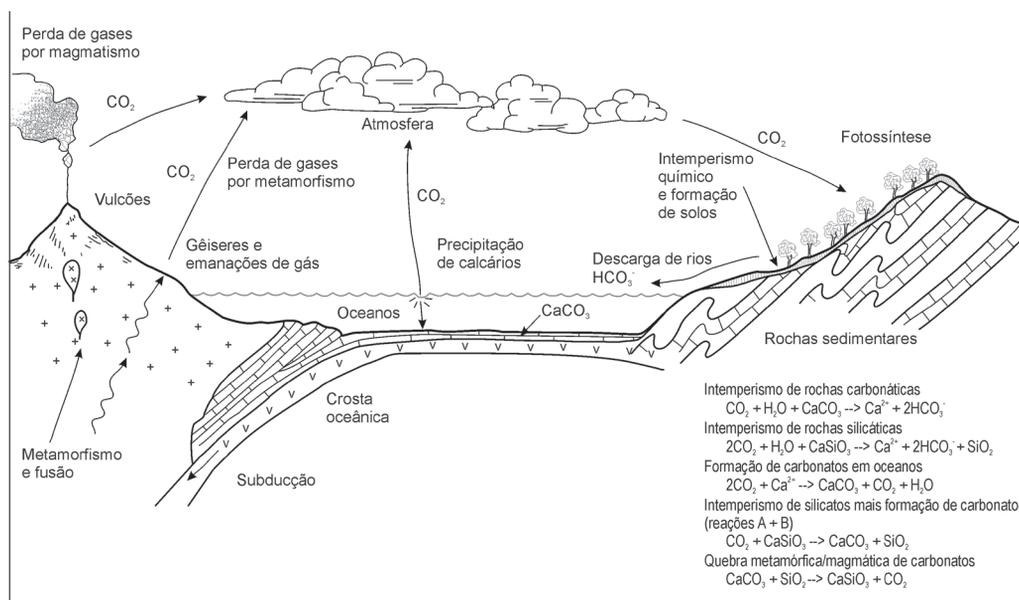
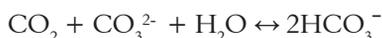


Figura 5 - O ciclo do carbono no Sistema Terra (Modif. de: Ernst 2000, p. 131 e <http://www.indiana.edu/~geo105b/1425chap8.htm>)

1) A absorção de CO₂ por processos biológicos é caracterizada pela absorção deste composto por algas e pelo fitoplâncton (Espere 2007). O fitoplâncton compreende o conjunto dos organismos vegetais que vivem no corpo de águas marinhas, com capacidade fotossintética. As algas também são fotossintéticas. Nesse sentido, o carbono é absorvido pela respiração desses tipos de organismos, que sintetizam seu próprio alimento com esse processo e posteriormente precipitam o CO₂ na forma de carbonatos, em meio aquoso, durante seu crescimento ou após sua morte. Conchas e fragmentos clásticos de carbonatos são produtos desses organismos.

2) A absorção de CO₂ por processos físicos é caracterizada pela dissolução do CO₂ nas águas. Este processo é mais eficiente nas águas do mar do que em águas de rios ou lagos, porque “[...] a água do mar contém, naturalmente, íons de carbonato [...]” (Espere 2008). A equação química é:



Além disso, devido à reação representada pela equação acima, os níveis de CO₂ nos oceanos são tão baixos “[...] que o dióxido de carbono atmosférico pode entrar nos oceanos (os químicos chamam este processo por Princípio de Le Chatelier) [...]” (Espere 2008). O processo pode ser descrito

do seguinte modo:

[...] Se a água permanece à superfície e aquece quando viaja a volta do globo, o dióxido de carbono voltará rapidamente para a atmosfera. Mas se a água desce para as profundezas oceânicas, o carbono pode permanecer, aí, armazenado durante mais de 1.000 anos, antes que a circulação oceânica o faça subir à superfície e, deste modo, de volta para a atmosfera. As águas frias descem para o fundo do oceano nas altas latitudes no Oceano Austral e nos Mares do Norte e do Labrador no Oceano Atlântico Norte. Estas zonas representam as principais regiões onde o dióxido de carbono é absorvido pelo oceano através dos processos físicos (Espere 2008).

Outro fator importante para a ocorrência desta dissolução é o fato de que o gás carbônico funciona como outros gases, quanto mais quente o líquido, mais gás escapa. No caso dos bicarbonatos dissolvidos na água, sua precipitação na forma de carbonatos será menor em águas frias, porque esses íons são mais solúveis em água fria do que em água quente.

b) Fixação do carbono pela precipitação de carbonatos nos oceanos

Uma das formas de fixação do carbono na crosta terrestre é pela deposição em meio aquoso, sobretudo nas plataformas carbonáticas. O carbono

nato é um composto mineral caracterizado por estrutura aniônica fundamental de CO_3 . A calcita e a aragonita são exemplos de carbonatos (Gary, McAfee, Wolf 1974, p. 106-8). Sua formação pode ser de origem orgânica ou inorgânica.

A seguir, trataremos das plataformas citando seus principais aspectos e onde se encontram os organismos responsáveis pela fixação do carbono. A abordagem descritiva das plataformas ajuda a mostrar onde nelas acontece a fixação do carbono, pois as principais feições de uma plataforma se interrelacionam.

Apesar de haver várias definições a respeito das plataformas carbonáticas, um consenso tem emergido em anos recentes (Tucker 2001, p. 38): a plataforma carbonática é caracterizada por espessa sequência de carbonatos predominantemente de águas rasas. Segundo Press et. al. (2006, p. 214), as plataformas carbonáticas “[...] são extensas áreas planas e rasas, onde tanto os carbonatos biológicos como os não-biológicos são depositados [...]”. Elas possuem pelo menos três feições importantes, que são a rampa carbonática, o recife e a laguna. As definições a seguir foram baseadas em Press et. al. (2006, p. 214).

1) Rampa carbonática

Em plataformas carbonáticas, “[...] abaixo do nível da plataforma estão as rampas carbonáticas, levemente inclinadas em direção às águas mais profundas, que também acumulam sedimentos carbonáticos, predominantemente de grão fino [...]”. A rampa é também a parte externa da plataforma “[...] conectando o recife com a bacia [ou laguna]” (Ibidem, p. 214). Além disso, essa área serve como um escoadouro do excesso de sedimento carbonático, tendo em vista que “[...] o sedimento produzido na laguna e no recife é transportado por vários processos e acumula na rampa [...]” (Ibidem, p. 214).

2) Recife

O recife tem pelo menos duas partes importantes, uma interna e outra externa. A parte interna possui “[...] uma plataforma plana que se estende em direção à laguna rasa, em cujo centro pode estar situada uma ilha [...]” (Press et. al. 2006). A outra parte, externa, é caracterizada por uma frente resistente às ondas, “[...] ligeiramente submersa, com forte inclinação ao oceano [...]” (Ibidem, p. 214). A

frente possui esqueletos de corais e algas calcíferas em crescimento, o que forma calcários resistentes. Podemos citar também que certas partes do recife podem estar acima do nível da água e são suscetíveis a se tornar vegetadas.

3) Laguna

A laguna, por sua vez, é a parte da plataforma que está atrás do recife, ou rodeada por ele, no caso de plataformas isoladas. É caracterizada por águas rasas e calmas. Além disso, “[...] os sedimentos são compostos de fragmentos do recife e de partes duras de organismos [...]”; pode haver, contudo, contribuição de sedimentos terrígenos quando o recife está próximo do continente (Press et. al. 2006, p. 214). Adiante, estudaremos exemplo ilustrativo de um tipo de plataforma (*rimmed shelf platform*) na qual é possível haver contribuição de sedimentos terrígenos.

Quanto aos tipos de plataformas, há pelo menos cinco tipos principais, caracterizadas por Tucker e Wright (2001). As plataformas (Fig. 6) são denominadas: de margem continental (*rimmed shelf*),

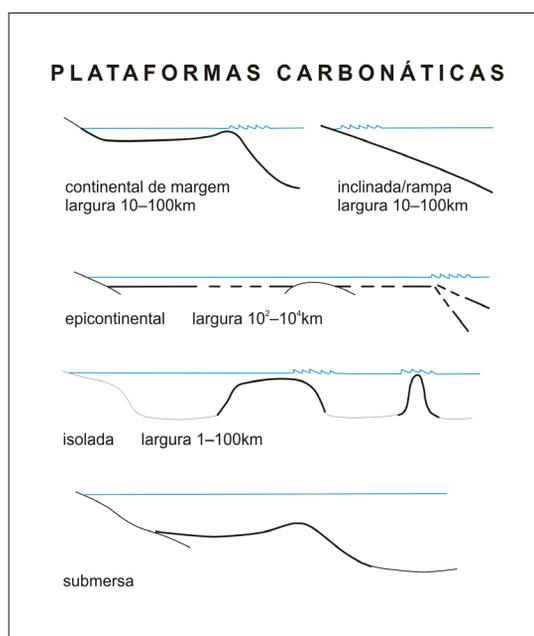


Figura 6 - Esboço dos cinco principais tipos de plataformas carbonáticas (Modif. de Tucker 2001, p. 29)

inclinada/rampa (*ramp*), epicontinental (*epeiric*), Isolada (*isolated*) e submersa (*drowned*).

Uma imagem (Fig. 7), ajuda a visualizar os três principais componentes gerais de uma plataforma

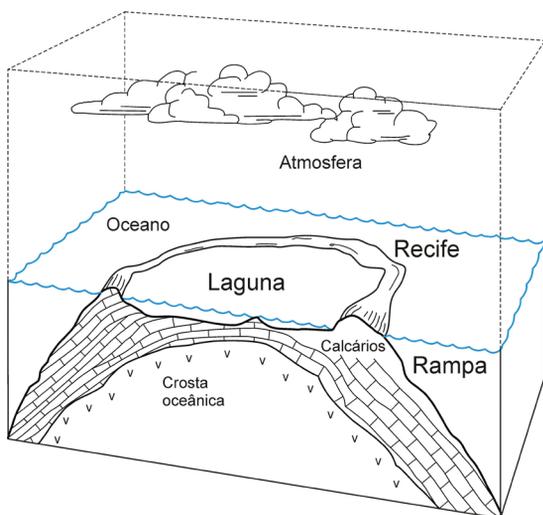


Figura 7 - Plataforma com destaque para a laguna, recife e rampa (Modif. de Press et. al. 2006, p. 215)

carbonática isolada: a laguna, o recife e a rampa carbonática lateral.

4) Como ocorre a precipitação do carbonato

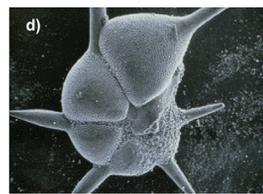


Figura 8 - Exemplos de organismos correspondentes às principais associações citadas no texto: a) *Coccosphaera* completa de *Coccolithus pelagicus*, do Pleistoceno, do sul do continente africano. Tamanho aproximado: 0,010 mm; b) diferentes formas de foraminíferos do Paleoceno; c) foraminífero planctônico, *Neoglobobulimina pachyderma*. Tamanho aproximado: 1 mm. d) foraminífero planctônico, *Hantkenina alabamensis*, do Eoceno Superior. Tamanho aproximado: 0,8 mm. (Fontes: Cushman Foundation For Foraminiferal Research (CFFR). Disponíveis [online] em: 28 Modern coccosphere, <http://www.cushmanfoundation.org/resources/slides/calnanno.html>; 46 Foraminifera; 55 Planktonic foraminifera; 56 Planktonic foraminifera, <http://www.cushmanfoundation.org/resources/slides/forams.html>)

A precipitação pode ser orgânica e inorgânica. Dentro da ação orgânica há dois modos principais de precipitação: a biologicamente controlada (*biotically controlled*) e a biologicamente induzida (*biotically induced*). A precipitação biologicamente controlada “representa os processos nos quais os organismos determinam a localização, o início da reação e o término do processo, bem como a composição e a textura do precipitado” (Shclager 2000, p. 218), ou seja, eles determinam a ocorrência da precipitação. Corais e algas calcárias são exemplos deste modo.

Já a precipitação biologicamente induzida “implica que os organismos provocam o processo [de precipitação] mas têm pouca influência nas etapas [ou caminho] de reações químicas, de tal

forma que o produto final se assemelha aos precipitados abióticos na maior parte dos aspectos” (Shclager 2000, p. 218). Micritos microbiais são exemplos deste modo.

A precipitação inorgânica (ou abiótica) “é controlada pelas leis da termodinâmica e por outros condicionantes impostos pelas reações cinéticas” (Ibidem, p. 218). Reações cinéticas referem-se à velocidade das reações. Daí que essas reações são importantes para os carbonatos marinhos, que se formam melhor em baixas temperaturas (Shclager 2000, p. 218).

5) Fatores que determinam a precipitação dos carbonatos

Diversos fatores determinam se o carbonato precipitará ou não, mas dois controles são preponderantes: a tectônica e o clima³ (Fig. 8). Além disso, há outro importante fator condicionado por esses dois, que é o nível do mar, fator que controla a deposição e influi na atividade biológica.

A tectônica determina o ambiente deposicional na medida em que determina as condições de formação da plataforma carbonática. O clima influen-

cia a deposição, na medida em que determina o padrão de circulação da água, a temperatura, a salinidade, o suprimento de nutrientes, a turbulência, as marés, os distúrbios e a atividade de ondas. Os corais, por exemplo, só podem se desenvolver em águas tropicais quentes. Por fim, o nível do mar, importante fator na sedimentação carbonática, é determinado, em termos mais específicos, pelo nível eustático do mar e pela subsidência tectônica⁴. Quanto à influência do nível do mar, alguns

³ Este tópico tem como referência o cap. 2 da obra *Carbonate Sedimentology* de Maurice E. Tucker e V. Paul Wright (2001). Evitou-se a citação comum (Nome, ano, página) devido ao fato de que as informações são extraídas desse livro.

⁴ *Nível eustático do mar* é o nível do mar de âmbito mundial, é o nível que afeta todos os oceanos. Segundo Gary, McAfee Jr. e Wolf (1974, p. 241), as mudanças eustáticas podem ter diferentes variações, mas aquelas

sistemas deposicionais só se desenvolvem durante intervalos de tempo específicos, nos quais o nível do mar encontra-se em determinado nível favorável à deposição.

Dentre as condições que permitem ou controlam a precipitação dos carbonatos, podemos citar principalmente a temperatura, a salinidade, a turbidez e a profundidade da água no ambiente de precipitação.

Não existe padrão uniforme que permita fazer qualquer generalização acerca dessas condições, principalmente para as três primeiras. Há ambientes em que a temperatura pode ser substancialmente baixa, menor que 0°C e, em outros, mais alta, como 18°C. O que vai determinar que a precipitação seja sob alta ou baixa temperatura, com pouca salinidade ou não etc., serão: (a) as diferentes condições físico-químicas da precipitação inorgânica, ou também (b) os tipos de organismos (Fig. 8), pois eles sobrevivem em ambientes específicos, controlados por determinadas condições químicas. Os organismos

recentes, de poucos milhões de anos, foram causadas por adição ou remoção de água das calotas de gelo continentais.

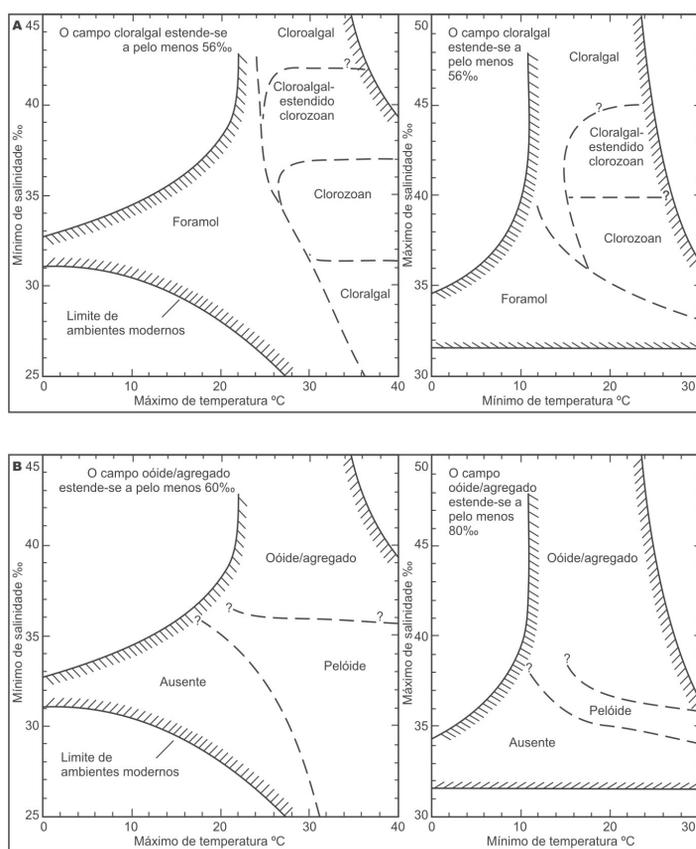


Figura 9 - Gráficos que associam temperatura e salinidade com a ocorrência de alguns organismos (Modif. de: Tucker e Wright 2001, p. 32)

podem ser agrupados em três principais associações de grãos esqueléticos: clorozoan, foramol e cloroalgal (Fig. 9).

Temperatura e salinidade

Em baixas latitudes, onde predominam altas temperaturas, pode haver ocorrência da associação clorozoan (Fig. 9). Os organismos pertencentes a esta associação, como corais hermatípicos e algas calcárias verdes (entre outros), não existem quando a temperatura mínima de superfície da água for menor que 15°C. Além disso, esses organismos não suportam mais do que 32% a 40% de salinidade. Também nessa associação aparecem grãos não-esqueléticos associados à temperatura e à salinidade. Por exemplo,

[...] oóides e agregados formam-se em áreas onde a temperatura excede 18°C. Eles também parecem ser restritos aos cinturões subtropicais, 15-25° de latitude (em vez de regiões equatoriais), onde as taxas de evaporação excedem as taxas de precipitação e a salinidade da água do mar é levemente alta (Less 1975, apud

Tucker 2001). A precipitação inorgânica de lama calcária também é provavelmente restrita aos cinturões subtropicais. [...]

Porém, os *pellets*, que pertencem à associação clorozoan, estendem-se a regiões de associação foramol. Quanto a esta última, sabemos que seus organismos, como moluscos e foraminíferos bentônicos, sobrevivem em temperaturas menores que 15°C e até mesmo menores que 0°C. Já quanto à associação cloroalgal, esta compreende as algas verdes que sobrevivem a elevadas salinidades.

Turbidez e profundidade

A turbidez está associada com a argila suspensa na água. Para que haja argila suspensa é necessário que alguma perturbação aconteça, como a chegada, pelos rios, de sedimentos em direção aos mares, distúrbios climáticos (temporais etc.) – que movimentam as águas –, o movimento das ondas e a ação de peixes. Nesse sentido, a turbidez faz com que a produção de carbonato fique inibida, porque a presença de argila na

água reduz a quantidade de luz que chega ao leito oceânico. Desse modo, o crescimento de organismos vegetais associados à produção de carbonato é reduzida, já que estes são impedidos de realizarem a fotossíntese.

A profundidade da água também é importante, já que, à medida que a profundidade aumenta, diminui-se a luz necessária para a fotossíntese. Esta profundidade é sobretudo importante em águas mais rasas. A maior parte da produção orgânica situa-se entre 10 e 15 metros de profundidade. A maioria dos carbonatos esqueléticos é produzida a até 5 metros de profundidade. Contudo, há exceções, como os corais, que chegam a crescer até abaixo de 50 metros.

Os seres vivos e a precipitação

Ao longo do que vimos até agora, os seres vivos exercem papel fundamental na deposição de carbonatos. Avancemos um pouco mais sobre esse aspecto. Os sedimentos carbonáticos podem se acumular rapidamente quando comparados com outros tipos de rochas sedimentares (Tucker 2001, p. 33). Nesse sentido, é necessário considerar o tópico em três níveis. O primeiro nível é o apropriado para a presente discussão, porque “[...] a taxa de crescimento de carbonatos de esqueletos modernos [...] dão um máximo valor de deposição calcária [...]” (Tucker 2001, p. 33). Hoje, 90% da produção de CaCO_3 são devidos a plâncton calcítico, associado a dois tipos de organismos, *coccolithophorida* e *foraminifera*. Lembremos que “os recifes são os principais lugares de sedimentação carbonática” (Ibidem, p. 33).

c) Fixação do carbono pela formação de petróleo, gás e carvão

O motivo de se reunir nessa abordagem os três recursos é que eles podem ter a mesma origem a partir do querogênio. O carvão pode se formar sob condições que não favorecem, ao mesmo tempo, a formação de petróleo e gás. Adiante, trataremos especificamente do carvão.

Uma forma de fixação do carbono nos oceanos é a formação do petróleo e/ou gás natural e, em zonas de pântanos costeiros, além de outros ambientes continentais, do carvão. Isso se deve ao fato de que estes três recursos podem originar-se de matéria orgânica (Bjørlykke 1989, p. 269-270), que constitui seu componente essencial. Contudo, o carvão é secundário nesse processo, já que nem

sempre se origina da mesma matéria orgânica que dará origem ao petróleo e gás.

1) O processo de fixação do CO_2 e formação de recursos energéticos

A formação do petróleo e recursos associados está ligada à produção de matéria orgânica, apesar de em alguns casos o gás metano (CH_4) ter origem inorgânica (Bjørlykke 1989, p. 269-270). Dessa forma, é importante entender de que maneira e onde os sedimentos com alta quantidade de matéria orgânica são depositados.

Locais com maior potencial de matéria orgânica são os lagos e áreas costeiras, principalmente próximas a deltas de rios, onde há descarga de sedimentos com muita matéria em suspensão. A maior produção biológica ocorre nos oceanos, em



Figura 10 - Um exemplo de diatomácea (Fonte: Andrade 2008)

áreas costeiras, entre aproximadamente 30 e 50 metros de profundidade (Bjørlykke 1989, p. 271), onde se desenvolvem algas planctônicas como as diatomáceas (Fig. 10). Além disso,

[...] todo o crescimento do fitoplâncton [que é matéria orgânica] acontece na zona abaixo da qual a luz solar torna-se muito fraca para a fotossíntese (cerca de 100-150m). O fitoplâncton provê alimento para todas as outras vidas nos oceanos [...] (Bjørlykke 1989, p. 271). [...] [Podemos citar também que] a alga planctônica é a mais importante contribuinte para a matéria orgânica que dá lugar ao petróleo. Entre as mais importantes estão as diatomáceas, que possuem esqueletos de sílica (Ibidem, p. 272).

Com os organismos dos filos *Radiolaria*, *Foraminifera* e *Mollusca* (gastrópodes pelágicos), o zoo-

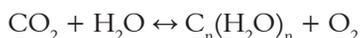
plâncton também fornece matéria orgânica (Bjørlykke 1989, p. 272). Biologicamente, a produção de matéria orgânica faz parte da cadeia alimentar marinha. Assim, o fitoplâncton serve de alimento para o zooplâncton, que serve de alimento para os crustáceos; estes por sua vez servem de alimento para peixes (Bjørlykke 1989, p. 272).

Existe alta produção de matéria orgânica em pântanos litorâneos, principalmente em deltas de rios, na forma de plantas e árvores:

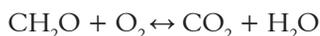
“[...] A matéria de plantas, incluindo madeira, [...] flutua nos rios e é depositada quando afunda para o leito [...]” (Bjørlykke 1989, p. 272).

Além disso, a *própria água dos rios*⁵ não fornece apenas material inorgânico, mas quantidades consideráveis de ácido húmico (C₂₀H₁₀O₆), bem como substâncias semelhantes (Bjørlykke 1989, p. 272).

A fixação acontece da seguinte forma: pela fotossíntese, o dióxido de carbono (CO₂) de baixa energia e a água (H₂O) são transformados em hidrocarbonetos, com alta energia, pela seguinte equação (Bjørlykke 1989, p. 271) não-balanceada:



Contudo, a reação pode ser quebrada, e surge uma questão importante: noventa e nove por cento (99%) da matéria orgânica produzida por organismos vivos são desfeitos por oxidação e por processos microbiológicos (Bjørlykke 1989, p. 273). No caso da presença do oxigênio (O₂) temos a seguinte reação:



Nesse sentido, Bjørlykke (1989, p. 273) informa que:

“[...] O petróleo é derivado de matéria orgânica que foi finalmente formada por intermédio da fotossíntese, isto é, armazenamento de energia solar. Cada energia é constantemente acumulada na crosta da Terra, mas a percentagem de energia solar que é preservada como petróleo é muito pequena. O crescimento anual do potencial das reservas de petróleo é portanto minúsculo em relação ao total de produção orgânica, por isso, na prática, o petróleo deve ser con-

siderado como um recurso não-renovável (Bjørlykke 1989, p. 273).

O acúmulo de matéria orgânica pode se dar pela incorporação desta pelos sedimentos, como nos casos do fitoplâncton e do zooplâncton, que concentram, nos sedimentos, a parte indigesta da matéria orgânica (Bjørlykke 1989, p. 274). No panorama sedimentológico, quando se depositam sedimentos, como as areias de rios ou praias, praticamente se interrompe o fornecimento de oxigênio. A quantidade de oxigênio soterrada reage muito rapidamente com a matéria orgânica, minerais com Fe²⁺ etc. e o ambiente torna-se redutor. Ao longo de poucos meses ocorrem as primeiras reações da diagênese. Esses sedimentos não são bons geradores de petróleo porque havia pouca matéria orgânica no momento do transporte, quando as trocas com atmosfera eram intensas e a matéria orgânica se transformava em CO₂. Isso explica como se forma o carvão em meio a arenitos: a enorme concentração de troncos, folhas etc. reage e consome o O₂ disponível quando os sedimentos foram soterrados. Se oxigênio adicional penetrar nos sedimentos, a possibilidade de formação de petróleo pelo acúmulo de matéria orgânica em determinado local tornar-se-á ainda mais baixa. Sedimentos de grão fino, como argila, exibem tendência à absorção de água nos poros, que são muito pequenos. Como a circulação de água se torna baixa, isso dificulta a penetração de oxigênio capaz de oxidar os hidrocarbonetos. Ao contrário, em sedimentos com grãos de tamanho maior, como areia, os poros são maiores, e portanto a oxidação poderia ser maior. Assim, uma condição favorável ao acúmulo de matéria orgânica é quando os sedimentos possuem poros pequenos e, sobretudo, no caso dos folhelhos, porque o ambiente deposicional antes do soterramento já era redutor.

Neste ponto, podemos tratar do querogênio. Examinemos duas definições que, embora semelhantes, são de algum modo complementares:

1. Querogênio é um nome coletivo para a fração de matéria orgânica sedimentar que não é solúvel em solventes orgânicos e tem um polímero como estrutura. A fração orgânica que é solúvel em solvente orgânico é chamada de betume. O querogênio é formado gradualmente no máximo a algumas centenas de metros da coluna de sedimento depois da deposição precursora de produtos como ácidos húmus,

⁵ Grifamos “a própria água dos rios” para frisar que os sedimentos de origem orgânica, embora estejam na água dos rios, não fazem parte dela e que, neste caso, a própria água tem contribuição de matéria orgânica.

húmicos e fúlvicos [...] (Bjørlykke 1989, p. 277).

2. Substância betuminosa sólida contida em folhelhos que produzem petróleo (*petroleum*) somente quando esses sedimentos são submetidos à destilação destrutiva por aquecimento. O querogênio é insolúvel em solventes orgânicos comuns como o tetracloreto de carbono (CCl_4) [...] (Suguio 1998, p. 647).

Existem pelo menos três tipos de querogênio, que são chamados de Tipo I, Tipo II e Tipo III (Bjørlykke 1989).

Querogênio Tipo I

O querogênio tipo I, também chamado de sapropélico, é composto de matéria orgânica rica em lipídios, contendo abundantes unidades estruturais alifáticas (Bjørlykke 1989, p. 273). Ele se origina da “[...] quebra microbiana de esporos, [de] alga planctônica, e também [de] matéria orgânica animal [...]” (Bjørlykke 1989, p. 273). Este tipo tem uma alta proporção de hidrogênio por carbono (H/C), entre 1,3 e 1,7, no geral, e baixa proporção de oxigênio por carbono (O/C). Isto faz que o principal produto deste tipo de querogênio depois de maturado seja o óleo. Este tipo é comum em xistos betuminosos (*oil shales*), “[...] particularmente em bacias de água doce [...]” (Bjørlykke 1989, p. 273).

Querogênio Tipo II

Este tipo de querogênio é uma mistura complexa, com considerável variação de acordo com sua origem orgânica. Ele tem proporção inicial relativamente alta de hidrogênio por carbono (H/C) e baixa proporção inicial de oxigênio por carbono (O/C), mas um pouco mais de oxigênio do que o Tipo I. O querogênio tipo II pode ser considerado intermediário entre os tipos I e III, porém não é uma mistura deles. Este tipo é encontrado comumente em bacias marinhas,

“[...] onde uma mistura de fitoplâncton, zooplâncton e outros organismos marinhos foi depositada sob condições de redução” (Bjørlykke 1989, p. 277).

Além disso, este tipo de querogênio é o mais comum em rochas sedimentares que dão origem ao óleo.

Querogênio Tipo III

A maioria dos carvões tem composição e estrutura semelhantes ao tipo III de querogênios (Bjørlykke 1989). O querogênio tipo III, também chamado de querogênio húmico, tem origem em matéria orgânica de plantas terrestres. Ele tem uma baixa proporção inicial de hidrogênio por carbono (H/C) e uma alta proporção inicial de oxigênio por carbono (O/C). O produto comum deste tipo de querogênio, depois de maturado, é o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4), este último conhecido como gás natural.

2) A maturação do querogênio

A maturação do querogênio⁶ é o lento processo pelo qual a matéria orgânica transforma-se em óleo, gás, carvão e grafite. Para que a maturação aconteça são necessárias, primeiramente, temperaturas altas, secundariamente, tempo, e por fim pressão e existência de minerais que possam acelerar ou inibir a reação (catalisadores ou inibidores). A partir de 50° a 70°C inicia-se a maturação, temperatura que equivale a entre 1 e 2 quilômetros de sobrecarga sedimentar. A temperatura aumenta à medida que aumenta a sobrecarga, e a temperatura ideal está entre 80° e 130°C. Com o aumento da temperatura, a sobrecarga favorece ligações de carbono-carbono e com isso o querogênio é quebrado. Nas reações de maturação de querogênio, sob condições físico-químicas típicas favoráveis a reações diagenéticas, a maturação ocorre porque o tempo envolvido é longo: o oxigênio e a água são liberados primeiro e formam-se os hidrocarbonos, na seguinte ordem relativa: primeiro há formação de hidrocarbonos claros, depois marrons e por fim pretos.

“Quando as reações de maturação estão completadas, as estruturas alifáticas de querogênio, que podem ser derivadas de lipídios, ácidos gordurosos e proteínas etc. foram removidas e convertidas em hidrocarbonos. [...]” (Bjørlykke 1989, p. 279).

3) A migração dos hidrocarbonetos

Como vimos, depois do querogênio maturado tem-se os produtos finais, como o óleo, o gás, o grafite e, em alguns casos, o carvão. Após a formação dessas substâncias, deve haver migração do óleo e

6 O conteúdo deste tópico tem como referência o livro *Sedimentology and Petroleum Geology*, de Bjørlykke, Knut Olav (1989, p. 278-281), com exceção de indicação distinta.

gás para rochas-reservatório, que constituem os reservatórios de petróleo. Isto porque a rocha que dá origem ao petróleo, sedimentar por natureza, não é comumente uma rocha-reservatório de petróleo, embora em alguns casos isso possa acontecer por conta de fraturas (Bjørlykke 1989, p. 284).

As condições geológicas que favorecem a acumulação em grandes proporções de petróleo e gás natural são combinações da estrutura com os tipos de rocha, as quais criam uma barreira impermeável à migração desses hidrocarbonetos para o topo – uma armadilha de petróleo. Algumas são causadas por uma deformação estrutural e são chamadas de *armadilhas estruturais*. [...] Outras armadilhas de petróleo são criadas pelo padrão original da sedimentação, como, por exemplo, quando uma camada mergulhante de arenito permeável estreita-se no contato com um folhelho impermeável. Essas são denominadas de *armadilhas estratigráficas*. O petróleo pode também ser aprisionado por uma massa impermeável de sal, em armadilhas de domos de sal (Press et. al. 2006, pp. 554-5).

Durante a migração o óleo flui entre os poros dos sedimentos e na água (Bjørlykke 1989, p. 286). Finalmente, quando está em uma armadilha de petróleo, o óleo flutua sobre a rocha saturada em água, por ser mais leve, e o gás fica acima do óleo (Press et. al. 2006, p. 554). Acima do óleo e do gás, uma rocha impermeável os aprisiona, dando origem aos três tipos de armadilhas mais comuns: estrutural, estratigráfica e em domos de sal.

Fixação de carbono no ambiente terrestre

O ambiente terrestre absorve o dióxido de carbono atmosférico (CO₂) por dois processos, tal como ocorre nos oceanos: 1) processos biológicos; e 2) processos físicos. Os processos biológicos relacionam-se à formação do carvão. Em seguida, veremos quais são os processos físicos ligados às próprias rochas terrestres.

a) Fixação do carbono pela formação de carvão

As definições a seguir dão idéia do que se entende por carvão. O carvão é:

“[...] uma rocha combustível gerada por atuação de processos diagenéticos (diagenetic processes) induzidos principalmente por calor e pressão devi-

dos ao soterramento profundo, sobre restos vegetais continentais e subaquáticos, acumulados em antigos ambientes paludiais (*Paludial environments*) [...]” (Suguio 1998, p. 131).

“[...] uma rocha orgânica estratificada compacta, composta largamente de restos de plantas metamorfizados com uma variável, porém subordinada, quantia de material inorgânico [...]” (Landis e Averitt 1978, p. 165).

“[...] uma rocha prontamente combustível contendo mais de 50% em peso e mais de 70% em volume de material carbonoso, incluindo uma mistura própria, formada da compactação e endurecimento de restos de plantas alteradas de modo variado, similares àqueles da turfa [...]” (Gary, McAfee Jr. e Wolf 1974, p. 135).

Algumas informações são úteis para conhecermos melhor o processo formador de carvão, do qual resulta a fixação do dióxido de carbono:

- De onde vem o carvão? Quais são os tipos de carvão?
- Como ele é formado? Qual a causa de sua formação, isto é, da carbonização?
- Como ele se acumula?
- Como o dióxido de carbono é fixado nesse processo de formação?

1) A origem do carvão

As definições de carvão sugerem a mesma fonte para o carvão: os restos vegetais. As plantas realizam fotossíntese e, desse modo, absorvem o carbono. Essa é a origem primária do carvão, o que constitui apenas parte do processo de fixação do carbono na formação do recurso. Afinal, não basta que as plantas simplesmente assimilem carbono para que o carvão se forme e, conseqüentemente, o carbono seja acumulado. Para o carvão se formar é preciso existir ambiente propício. O ambiente propício é um clima úmido (Landis e Averitt 1978, p. 165), semi-tropical e/ou tropical (Marshak 2005, p. 452). Nesses ambientes, os restos de vegetais se acumulam normalmente em pântanos continentais, costeiros ou simplesmente “corpos de água rasos e calmos” (Suguio 1980, p. 181), como alguns lagos. A matéria orgânica, para se acumular, ser preservada e mais tarde transformar-se em combustível fóssil, necessita, de forma similar ao caso da formação

do petróleo, de algumas condições específicas de sedimentação, das quais duas são essenciais (Collinson 1996, p. 117):

1. Embora, a rigor, os fragmentos de troncos, folhas etc. também devam ser considerados como clastos, a taxa de suprimento de sedimentos clásticos, como cascalho, areia, silte e argila, deve ser relativamente baixa em comparação com a taxa de suprimento de matéria orgânica;
2. A taxa de acumulação de matéria orgânica deve exceder a taxa de degradação causada pela oxidação inorgânica e microbiológica.

Nesse sentido,

“à medida que a luxuriante vegetação dos pântanos morre, deposita-se no solo encharcado de água. O rápido soterramento pelas demais folhas que caem e a imersão em água protegem os gravetos e folhas da decomposição total, pois as bactérias que decompõem a matéria vegetal não obtêm o oxigênio de que necessitam” (Press et. al. 2006, p. 558).

Além disso, quando restos de plantas são acumulados, a decomposição aeróbica ocorre primeiro, processo que consome o oxigênio da água; isso faz com que as bactérias aeróbicas morram e dêem lugar às anaeróbicas, o que cria um ambiente de não-degradação (Suguio 1980, p. 180).

À medida que a vegetação morta acumula-se, ela vai se transformando em turfa, uma massa orgânica “de cor castanha escura ou preta [...]” (Suguio 1998, p. 775), na qual ainda podem ser reconhecidos os fragmentos de plantas, como gravetos e raízes (Press et. al. 2006, p. 559). Importante característica da turfa é sua alta quantidade de mistura (Teichmüller e Teichmüller 1978, p. 168), ou seja, a quantidade de hidrocarbonetos ainda não é grande em comparação com os tipos de carvão de maior densidade; por essa razão, na turfa (Fig. 11) há maior quantidade de compostos variados.

Primeiro estágio: a turfa

A turfa é o primeiro estágio de formação do carvão⁷; desde esse estágio já se pode usar a turfa

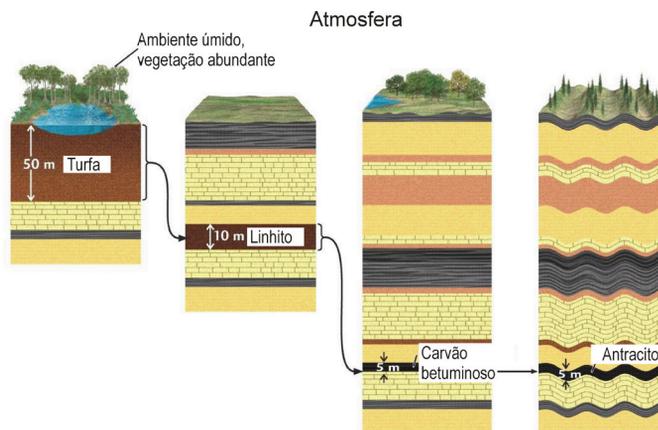


Figura 11 - Etapas de formação do carvão (Modif. de: Press et. al. 2006)

como combustível fóssil, quando seca, pois contém entre 45% a 60% de carbono nas camadas superiores. Em profundidades maiores a concentração aumenta um pouco (Teichmüller; Teichmüller 1978, p. 168). Após esse estágio, seguem-se outros, sendo necessário que algumas condições estejam presentes para que se forme o carvão mineral (Fig. 11). As condições, essencialmente geológicas, são o tempo e a temperatura.

[...] o controle mais importante no processo [de diagênese do carvão] é a profundidade de soterramento e não a idade dos sedimentos. Em qualquer sequência vertical normal de carvão húmico, o conteúdo de carbono aumenta com a profundidade. Esta relação é conhecida como **lei de Hilt** [...] (Suguio 1980, p. 180-1). [grifos do original].

Nessa concepção, profundidade quer dizer temperatura, segundo a regra do gradiente geotérmico, pois a temperatura aumenta, em média, 30°C a cada 1 km de profundidade que se avança na crosta. Isso quer dizer que os “estádios diagenéticos do carvão estão relacionados principalmente a variações na temperatura máxima a qual o carvão foi submetido” (Suguio 1980, p. 180-1). Além disso, a pressão parece ter pouca influência ou, pelo menos, influência secundária e relativamente pouco importante (Suguio 1980, p. 181).

Segundo estágio: carvão marrom, linhito e carvão sub-betuminoso

Depois do estágio da turfa, o carvão passa para o estágio do carvão marrom, do linhito e carvão sub-

ler e Teichmüller (1978, p. 169), e em paralelo a classificação sucinta de Suguio (1980, p. 177-178).

7 Utilizamos aqui uma classificação condensada daquela contida em Teichmüller

betuminoso. Segundo Teichmüller e Teichmüller (1978, p. 169-170), no início deste estágio, isto é, nos carvões marrons, ainda se pode reconhecer algum resto preservado de plantas, como madeira. O linhito é diferente, das turfas, porque tem bem menos celulose e maior concentração de carbono, variando entre 65% e 75% (Suguio 1980, p. 177), o que corresponde a maior valor calorífico. O carvão sub-betuminoso já é de grande potencial calorífico, pois varia entre 7.300 a 8.100 kcal/kg (Suguio 1998, p. 132). Ele está entre o linhito e o carvão betuminoso. Nesse estágio de formação do carvão a regra é o aumento da concentração do carbono, diminuição das misturas e a consequente diminuição de matéria volátil.

Terceiro estágio: o carvão betuminoso e o antracito

No terceiro estágio (Fig. 11), encontramos aquilo que conhecemos por carvão mineral, pois, normalmente, “[...] a hulha (o carvão betuminoso) e o antracito formam, em conjunto, o que é conhecido sob o nome de carvão mineral [...]” (Suguio 1980, p. 178).

Na fase de carbonização do carvão betuminoso podemos notar, em termos gerais, que a quantidade de carbono aumenta e a de oxigênio diminui (Teichmüller e Teichmüller 1978, p. 170); aliás, está é uma característica na formação do carvão, isto é, a quantidade de carbono aumenta à medida em que se avança para o estágio do antracito:

“[...] muitas propriedades físicas do carvão começam a mudar nesse estágio, que é o intervalo de fase durante o qual os espaços intermoleculares tornam-se particularmente pequenos porque as grandes cadeias não-aromáticas e cadeias de moléculas húmicas foram em grande parte destruídas” (Suguio 1980, p. 178).

Nesse estágio, o carvão betuminoso alcança teor de carbono entre 75% a 90% e seu conteúdo em água é baixo, variando de 2% a 7%. No antracito, o teor varia de 90% a 93% e a quantidade de água também é baixa, bem como sua volatilidade, o que era de se esperar à medida que avançamos para este estágio. Sua formação é curiosa, porque depende de metamorfismo do carvão em fase anterior (Suguio 1998, p. 45). Ele é também o carvão de maior poder calorífico, superior a 8.000 kcal/kg (Suguio 1980, p. 178).

2) Causas da carbonificação

Segundo Teichmüller e Teichmüller (1978, p. 171), os processos microbiológicos são decisivos apenas no estágio da turfa. Eles têm influência nas fácies do carvão, que dependem do ambiente vegetal que lhes deu origem. Nesse sentido, depois do estágio da turfa, os organismos vivos saem de cena e as alterações químicas tomam seu lugar. As alterações estão relacionadas com a temperatura da crosta terrestre:

“[...] geralmente o grau de carvão depende do máximo de temperatura a qual o carvão foi exposto durante sua história geológica, isto é, do máximo de profundidade em que foi enterrado na crosta terrestre [...]” (Teichmüller e Teichmüller 1978, p. 171).

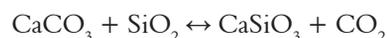
b) Fixação do carbono por meio de processos físicos e químicos

Embora os processos de fixação do carbono estejam associados ao ciclo geral do carbono, é importante, para bom desenvolvimento deste tópico, notar que há dois grandes ciclos do carbono, compreendidos no ciclo geral: os ciclos mineral e orgânico. Neste tópico, tratamos do ciclo mineral, incluindo a fixação, bem como da relação deste ciclo com o orgânico.

Em relação ao ciclo do carbono mineral, sabemos que:

“Os ciclos tectônicos, vulcânicos e metamórficos determinam os pulsos dos fluxos de gás carbônico emitidos para a atmosfera e o oceano. Regem, assim, os ritmos de sedimentação do carbonato de cálcio das séries sedimentares calcárias [...]” (Tardy 1997, p. 157).

Considere-se a seguinte reação química em fase sólida, representada por equação simplificada, para o que acaba de ser mencionado:



Da esquerda para a direita temos a reação de metamorfismo das séries calcárias antigas. Em sentido inverso, ocorre reação de compensação que leva à alteração de rochas silicatadas antigas e formação de séries calcárias recentes (Tardy 1997, p. 157). Traduzindo para o interesse deste trabalho,

segue-se, evidentemente, que o carbono é fixado no sentido inverso da reação (da direita para a esquerda), quando os produtos são o carbonato de cálcio (CaCO_3) e o dióxido de silício SiO_2 (sílica).

De acordo com Tardy (1997, p. 157), quando ocorre aumento da atividade tectônica e metamórfica, parte dos calcários antigos é destruída, e, no sentido geológico do termo (segundo o autor), o CO_2 emitido com essa origem é em seguida consumido pelo incremento do intemperismo de minerais silicáticos. Concomitante a essa alteração (emissão), o CO_2 é reincorporado em novas séries carbonatadas antigas. Nessas condições, na atmosfera, sob clima quente e úmido, aumenta a concentração de CO_2 . Tardy salienta ainda, em relação a essas condições, que:

“[...] não é porque os mares são quentes que se depositam grandes quantidades de carbonatos; mas por serem destruídas grandes quantidades de carbonatos antigos que são criadas, em compensação, grandes séries carbonatadas recentes [...]” (Tardy 1997, p. 157).

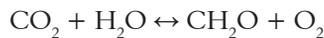
Conclui-se que não é porque a temperatura aumenta que aumentará a sedimentação de carbonatos, mas é por haver uma fonte de CO_2 (oriunda do metamorfismo das séries carbonatadas antigas) e Ca (oriundo da alteração de rochas aflorantes) (Tardy 1997, p. 158). Além disso,

[...]Os ciclos tectônicos determinam os pulsos de relevo e agem diretamente sobre o ritmo de exposição dos sedimentos antigos submetidos aos agentes do clima da época. O clima, pela pluviosidade e pela temperatura, intervém também diretamente sobre a erosão (Tardy et. al. 1989). A erosão é química e mecânica; mas, na escala global, a erosão mecânica comporta componentes químicos de grande importância (Tardy 1997, p. 158).

O exposto, basicamente, dá uma idéia de como ocorre a fixação do CO_2 pelos processos físico-químicos no ambiente terrestre, sem a mediação de organismos vivos. Pode-se dizer também, em outros termos, que ocorre a variação de um reservatório de carbono a outro (Tardy 1997, p. 158). A causa de se depositarem grandes quantidades de carbonatos é a existência de fontes abundantes de CO_2 e Ca. O controle global desse movimento são os ciclos tectônicos, vulcânicos e metamórficos.

Vejam agora qual a relação da erosão mecânica com o CO_2 e como ela pode constituir fonte de oxigênio.

A erosão química na litosfera consome oxigênio, por oxidação de sulfetos e carbonatos. Isso significa a emissão de CO_2 ; em contraponto, a erosão mecânica de matéria orgânica produz oxigênio (Tardy 1997, p. 158). A reação simplificada (Tardy 1997, p. 158) é a seguinte:



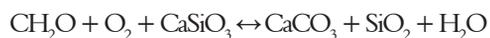
Se um mol de matéria orgânica é retirado do solo e é posteriormente sedimentado, isto significa que CO_2 foi consumido e O_2 produzido. De modo inverso, matéria orgânica é consumida e CO_2 liberado:

“Por erosão química natural ou por combustão industrial, o resultado é o mesmo: matéria orgânica é destruída, oxigênio é consumido e CO_2 é produzido (Tardy 1997, p. 158).

Na relação entre o carbono orgânico e mineral, temos que:

“[...] o carbono pode ser envolvido em reação de competição entre matéria orgânica, fonte ou fixadora de carbono orgânico e carbonato de cálcio, fonte ou fixador de carbono mineral [...]” (Tardy 1997, p. 161).

Para que se aconteçam as transferências, é necessária uma fonte de cálcio na forma de silicato, ou seja, um silicato proveniente da litosfera que, no oceano, age como fixador do carbono mineral (Tardy 1997, p. 161):



Da esquerda para a direita, tem-se a consequente formação de carbonato de cálcio e depósito de sílica sedimentar. Da direita para a esquerda, tem-se a produção de matéria orgânica. Por fim, podemos dizer que:

“[...] as flutuações das quantidades relativas de carbono orgânico e de carbono mineral traduzem-se por variações de composição isotópica do carbono em cada um dos dois reservatórios sedimentares orgânico e mineral [...]” (Tardy 1997, p. 161).

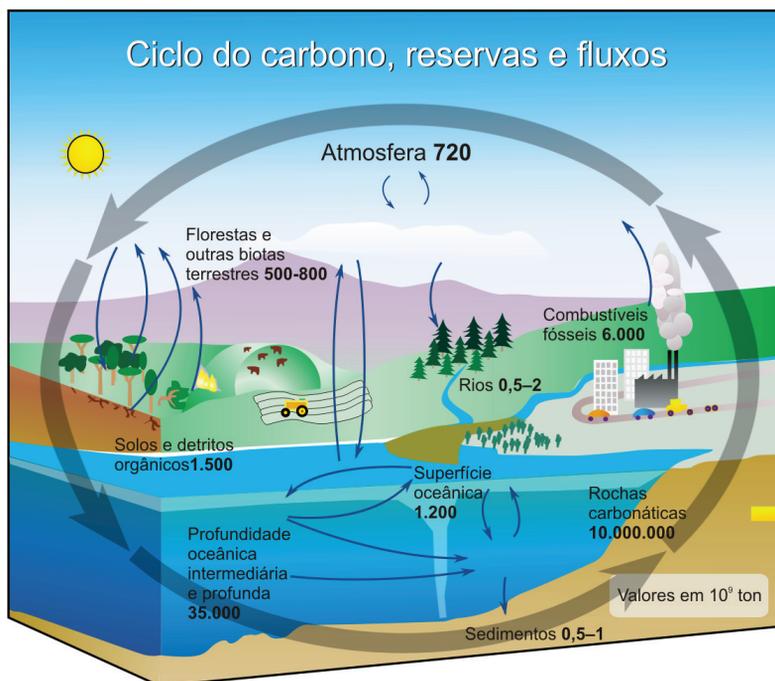


Figura 12 - Ciclo do carbono na Terra, com destaque para as quantidades em Gt/ano (Modif. de: Wikimedia Commons. URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon_cycle_cute_diagram.svg. Acesso 03/02/2010. Valores das reservas: com exceção dos sedimentos, Earth's Environmental Systems, Columbia University, URL: http://eesc.columbia.edu/courses/ees/slides/climate/carbon_res_flux.gif. Acesso 01/02/2010)

A figura 12 indica, em gigatoneladas (Gt), ou 10⁹ ton, a quantidade de carbono retido nos reservatórios, bem como quais são e onde se localizam alguns compostos químicos do ciclo. As setas indicam os fluxos existentes entre os reservatórios.

Discussão

O caminho percorrido no trabalho é amplo; reuniu-se conjunto significativo de informações e conceitos a serem considerados na abordagem do problema da fixação de carbono na crosta terrestre. Convém analisar e discutir o itinerário percorrido para, em seguida, formalizar algumas conclusões.

O expressivo volume de artigos, relatórios, notícias, vídeos e documentos recuperados na pesquisa mostra claramente que o tema do aquecimento global tem dominado a agenda da mídia e do mundo político. Pontuamos contudo ser necessário distinguir previsões catastrofistas formuladas por defensores de um aquecimento global motivado estritamente por causas antropogênicas, da real mensuração de quais seriam, hoje, exatamente, os efeitos danosos. Pode-se estimar serem esses efeitos ainda pouco efetivos, e portanto eles ainda

constituem mera possibilidade. Algumas alterações na dinâmica planetária atribuídas a efeitos do aquecimento vêm sendo notadas, conforme divulgado no último relatório do IPCC (2007), porém em ritmo muito menor do que as previsões. A simulação apresentada na figura 4 revela que o nível do mar não subiu seis metros, conforme antecipado, mas houve mudanças na ordem de centímetros.

Causas e efeitos do aquecimento global

A principal causa apontada em relação ao aquecimento anormal do planeta é o aumento da concentração de diversos gases atmosféricos, como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (IPCC 2007, p. 2). O aumento da concentração desses gases é

associado à ação antrópica. Dentre eles, o IPCC atribui ao CO₂ o papel mais importante para o aquecimento (IPCC 2007, p. 2), e, por decorrência, o aumento da temperatura média da atmosfera seria devido principalmente à ação humana, por conta de diversas atividades que emitem, além de outros gases, CO₂ como acontece com indústrias e veículos.

No sítio da revista *Veja*, foi criado tópico específico: “Em profundidade: aquecimento global”. Na seção denominada “Contexto”, o texto *A Terra em alerta* contém o subtítulo “O planeta esquenta e a catástrofe é iminente. Mas existe solução”:

Há décadas, pesquisadores alertavam que o planeta sentiria no futuro o impacto do descuido do homem com o ambiente. Na virada do milênio, os avisos já não eram mais necessários – as catástrofes causadas pelo aquecimento global se tornaram realidades presentes em todos os continentes do mundo. O desafios passaram a ser dois: se adaptar à iminência de *novos e mais dramáticos desastres naturais*; e buscar soluções para amenizar o impacto do fenômeno (ABRIL S.A. 2008) [grifo nosso].

A afirmação acima parece não levar em conta os contra-argumentos a respeito do tema. Já vimos que não há consenso entre cientistas sobre o fenômeno do aquecimento global (Sowell 2008)⁸ apesar de o IPCC constatar que a temperatura tem subido⁹. Uma conferência internacional sobre mudança climática ocorreu em Nova York (2 a 4 de março de 2009). O alarmismo observável em relação a aquecimento global não se restringe a um ou outro veículo de comunicação, mas perpassa muitos deles. O portal Terra noticiou a conferência, sob o título *Especialistas questionam alarmismo sobre mudança climática* (EFE 2008). Tem-se aí bom exemplo do comportamento apelativo da mídia na questão do aquecimento, já que a informação não procede de um ou outro especialista; é a própria conferência que afirma existir alarmismo.

Portanto, de um lado, há aqueles que dizem ser o aquecimento associado a catástrofes ambientais, quer defendendo que se correm hoje grandes riscos, quer prevendo riscos em curto prazo; o *Greenpeace*, em livro recente, publica fotomontagem da costa de Murcia na Espanha: uma foto apresenta a situação atual e outra simula o mesmo lugar daqui a 30 anos, amplamente invadido pelo mar.

De outro lado, como vimos, muitos questionam tais posições. É preciso investigar com cuidado as críticas à gravidade do aquecimento (Toniolo e Carneiro 2009). Observamos que se dá muito crédito ao IPCC. Acreditamos ser importante dar voz a estudiosos do tema que não concordam com a visão dominante (o que tem sido chamado de *main stream*), como p.ex.: a conferência ocorrida em Nova Iorque; os trabalhos de Thomas Sowell (2007, 2008) e Christopher Monckton (2006a, 2006b); as ponderações feitas por Jefferson Simões, glaciólogo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que critica interpretações catastróficas a respeito do derretimento de geleiras, calotas e afins (cf. Castilhos 2007).

Em síntese, há duas possibilidades: de um lado, se admitirmos um aquecimento global devido à ação humana, na linha do IPCC, as visões catastróficas

não são tão alarmantes: a pesquisa mostrou que o planeta se auto-regula em relação ao aumento da concentração do dióxido de carbono, embora em um tempo maior (velocidades mais lentas), sob padrões desconhecidos pelos seres humanos; além disso, os efeitos são significativos, se atribuídos especificamente ao aquecimento global, porém não-catastróficos. De todo modo, não tem havido posições consensuais da comunidade científica em relação aos alertas e a todas as críticas. Esses elementos indicam a imperiosa necessidade de investigações mais aprofundadas.

Vejamos dois exemplos concretos.

Segundo Tucker (2001, p. 33), em ótimas condições de produtividade dos organismos que fixam o carbono tem-se formação de CaCO_3 (calcário) quantidades: 1,5 - 4,5 kg/m²/ano, o que equivale a uma taxa de deposição carbonática de 0,5 - 1,5 mm/ano ou 0,5 - 1,5 m / 1.000 anos. Ou seja, para serem fixados vários quilos ou metros cúbicos de carbono são necessários muitos anos. Observa-se terem aumentado, nas últimas décadas, segundo o IPCC (2007), quantidades da ordem de gigatoneladas (bilhões de toneladas) que são atribuídas à emissão antrópica. Esse último dado significa que o Homem retira carbono em grandes quantidades daquilo que já está fixado, ou seja, de reservatórios naturais nos quais a natureza fixou carbono no passado, em função de uma miríade de processos.

Em sentido inverso, há razões suficientes para afirmar que, primeiro, a causa exclusiva do aquecimento pode não ser o Homem. Isso se deve ao fato de que, ao longo da pesquisa, termos descoberto, paralelamente, críticas à posição dominante divulgada na mídia, que se nutre principalmente dos dados fornecidos pelo IPCC. É o que demonstraremos a seguir.

Levando em conta que o aquecimento global preocupa diversos setores da sociedade, procuramos tanto interpretações que privilegiam catástrofes ambientais, como visões as negam (Toniolo 2007). Vimos até aqui que, segundo o IPCC (2007), não houve alterações catastróficas, mas alterações significativas. Afinal, catástrofe deve ser entendida como uma mudança rápida, súbita, com grande prejuízo às vidas afetadas, p.ex. terremotos de grande escala, uma erupção vulcânica etc.

Quanto à nossa primeira asserção, a de que a causa do aquecimento pode não ser exclusivamente o Homem, Tardy diz-nos que:

8 Um trecho do texto de Thomas Sowell: "Uma nova e diferente conferência sobre o aquecimento global ocorrerá em Nova York, sob o patrocínio do Heartland Institute, de 2 a 4 de março – se o clima permitir.[*] / Seu título é "Conferência Internacional sobre Mudança Climática Aquecimento Global: Verdade ou Fraude?". O tema da conferência é que "não há nenhum consenso científico sobre as causas ou as possíveis consequências do aquecimento global" (Sowell 2008).

9 O que de alguma forma também é questionado, mas isto não cabe à discussão deste trabalho. Para mais informações, conferir, por exemplo, nas referências, Sowell (2007, 2008) e Monckton (2006, 2006).

Pode-se supor – sem muita certeza, no entanto – que as flutuações dos teores do CO₂ da atmosfera apenas acompanham as oscilações de temperatura e umidade do clima, ou sejam apenas suas consequências e não suas causas. Pode-se também crer – e não seria absurdo – que a enorme taxa de produção de CO₂ em direção à atmosfera, conseqüente do atual desenvolvimento industrial, não seja a causa profunda do aumento da temperatura, da elevação do nível do mar e do aumento da pluviosidade sobre os continentes. Contudo, é provável – e já é mais seguro dizê-lo assim – que o aumento do teor em CO₂ atmosférico por combustão estimula um aumento de temperatura e de umidade que poderiam ser apenas naturais. Finalmente, seria totalmente correto afirmar que, para os últimos 100 anos, esses três parâmetros aumentaram juntos. Percebe-se, de um lado, que esta constatação, verificável na escala do século, não era perceptível na escala do ano. A prudência deveria, portanto, impor-se (Tardy 1997, p. 169).

Quanto à segunda assertiva, a de que se o aquecimento global existe no sentido de ficarmos alarmados com tal fato, temos alguns exemplos. Na primeira página do sítio brasileiro *Aquecimento Global* (www.aquecimentoglobal.com.br), por exemplo, consta a seguinte afirmação:

“O aquecimento global é hoje *uma das maiores ameaças à vida*, um fenômeno climático de grande proporção, que está causando o aumento da temperatura média da superfície terrestre nos últimos 150 anos.” [Grifo nosso].

É fato incontestável que se tem notado aumento da temperatura, pelo menos a partir dos relatórios do IPCC dos quais participam cientistas e políticos do mundo todo. Porém, dizer que o aquecimento global “é hoje uma das maiores ameaças à vida” parece não ter respaldo, pois hoje há mais fatores significativos de risco à vida do que o aquecimento, como a violência nas grandes cidades, fenômenos naturais como terremotos, grandes epidemias e doenças como a AIDS na África etc.

O que se ouve como atribuído ao aquecimento, por exemplo, são ondas de calor, como as da Europa no início da presente década, que matou centenas de idosos¹⁰, mas as informações não são conclusivas, pois há aqueles que dizem o contrário – que as

ondas acelerarão o efeito-estufa¹¹. Isso não se compara à quantidade de pessoas que morrem por ano por conta de fatores como a violência, que acabamos de citar. Portanto, o argumento é inadequado para explicar a realidade, tal qual tem sido atribuída ao aquecimento do planeta, ao menos segundo as informações mais frequentes a que se tem acesso direto. Vejamos o argumento de Marcel Leroux (2005), para quem “**o suposto aquecimento global é uma fábula**” (grifos do original):

“A climatologia do IPCC ou, para ser mais preciso, a climatologia do *Summary for policymakers*, não é climatologia. Acima de tudo, ela visita a disciplina com uma imagem distorcida e deplorável, que é extremamente esquemática e simplista” (Leroux 2005, p. 465).

Yves Tardy complementa seus argumentos afirmando que, tanto em Ciências da Terra quanto em outras ciências da Natureza, costuma haver uma precipitação passional quando se identifica uma causa capaz de explicar um fenômeno (Tardy 1997, p. 169); além disso, quando há duas variáveis, costuma-se atribuir uma como causa da outra. Mas, referindo-se a Edgar Morin e Kern, diz ele que:

“[...] a natureza é apreendida a várias escalas, de tempo e de espaço. A natureza é um sistema complexo [...]” (Tardy 1997, p. 169).

Isso nos conduz à importância de se pensar a natureza como sistemas complexos, não como sistemas lineares; nestes últimos, para determinado fenômeno pode haver uma única causa bem-determinada, ou algo tão simples assim.

Conclusões

Analisamos neste artigo os processos de fixação de carbono na crosta terrestre, em oceanos e nos continentes. Nos oceanos a fixação se dá por meio de reações químicas entre atmosfera e oceano, mas também há a fixação mediada por organismos vivos, que ocorre pela fotossíntese, pela formação de rochas carbonáticas em plataformas e pela formação de petróleo, gás e, secundariamente, carvão, em ambientes propícios. No ambiente terrestre, a fixação também é mediada por organismos vivos, como os processos relacionados à fotossíntese, a

10 P. ex., nos sites em Português *Deutsche Welle* (2008) e *Sua Pesquisa* (2008) as ondas de calor são associadas ao aquecimento global.

11 É o caso do site britânico www.bbc.com (2008).

formação de carvão por processos independentes da formação de petróleo, intemperismo de minerais silicáticos e outras reações químicas em rochas que fixam dióxido de carbono (CO₂).

Vimos que o fenômeno do aquecimento global caracteriza-se pela alteração das condições sob as quais ocorre o efeito estufa, condição natural na dinâmica do Sistema Terra. Sem esse tipo de aquecimento do planeta, a temperatura média da superfície terrestre seria de 18°C abaixo de zero (Molion 2008, p. 9).

A pesquisa revelou que o CO₂ atmosférico, embora tenha aumentado de concentração desde o início da era industrial, não fica necessariamente acumulado na atmosfera. As taxas de acumulação podem ser divergentes, porém não se pode afirmar que o acúmulo de carbono na atmosfera seja *causa exclusiva e direta* do aquecimento crescente. A partir deste viés, o fenômeno do aquecimento perde o caráter de urgência, porque:

- a) as alterações percebidas não são catastróficas, apenas significativas;
- b) a Terra tem seus próprios modos de fixar o carbono. Afinal, é um sistema dinâmico.

Tal conclusão é coerente tanto com as considerações de Lovelock (1991), que propõe ser a Terra um sistema auto-regulador, quanto com respeito às observações histórico-globais de Tardy (1997), que revelam que o carbono ora está em um reservatório, ora em outro.

Desde 3,5 bilhões de anos a Terra vive permanentemente submetida a crises do clima e do ambiente terrestre: transgressões e regressões marinhas, vulcanismo, glaciações, aquecimentos, desertificações, dilúvios, florestas densas, escassez ou abundância de oxigênio, de ozônio ou de gás carbônico etc., *piores do que aquelas pelas quais nos cremos responsáveis atualmente. A vida atravessou tudo isso!* E se a Evolução é sinônimo de diversificação, poderia acontecer que a Evolução não tivesse sido possível não fossem os sobressaltos e oscilações do clima e do ambiente. A vida teria utilizado estas crises para diversificar-se e evoluir. Mas a vida modificou e continua a modificar o ambiente e assim, também, o clima. A Terra é, portanto, um sistema. A Terra é um ser vivo superior, nos diz Lovelock [...] (Tardy 1997, p. 167) [Grifo nosso].

A Terra não é imune à alteração na concentração de dióxido de carbono, se admitirmos que de fato

o aumento possa ser devido à ação humana. Uma vez que os ciclos dos sistemas terrestres são longos (Tardy 1997), é bastante provável que o tempo de fixação da quantidade que se admite ter aumentado seja maior que o tempo que levou para ser liberada. Sabemos que o Homem consegue transpor diversos limites naturais e, com isso, modifica a natureza com velocidades muito maiores que a dos demais seres vivos. Os problemas são, assim, tanto de escala de processos como em relação às velocidades relativas.

A atual conscientização ambiental das pessoas e sociedades tem a grande qualidade de aportar conhecimentos e saberes capazes de alertar a todos sobre as consequências dos padrões atuais, mas será ineficaz enquanto não assumirmos com vigor – e na plenitude dessa visão – que é preciso pensar a natureza como um sistema complexo, tal como prevêm, modernamente, as Ciências da Terra.

Referências

- Abril S.A., Editora. s.d. *Em profundidade: aquecimento global*. São Paulo: Ed. Abril. Disponível [online] em Veja.com http://veja.abril.com.br/idade/exclusivo/aquecimento_global/contexto.html. Acesso 30 de maio de 2008.
- Andrade B. s.d. *Diatomaceous Earth - diatom4*. In: Yao N. Abdelhamid D. "Our Diatom Research Site". Disponível [online] em <http://www.princeton.edu/~pccm/outreach/environmentors/summer/2000/symposium/diatoms/pesticide.html>. Acesso em 31 de janeiro de 2008.
- Areppim. 2008. *Water: huge deficit in the marking*. Areppim: information, pure and simple. 23.ago.2008. Berna, Suíça. URL: http://www.areppim.com/archives/print_water20080823.pdf. Acesso 10.abr.2010.
- Ayoade J.O. 2001. *Introdução à climatologia para os trópicos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. pp. 23-45.
- Azevedo J.C.de. 2008. *Iludindo o público*. Folha de São Paulo, São Paulo, 1º de julho de 2008, Opinião – Tendências e debates. Disponível [online] em <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/opiniaofz0107200808.htm>. Acesso 2 de julho de 2008.
- BBC. www.bbc.com. 2006. *Onda de calor causa mortes na Europa*. 19/08/2006. Disponível [online] em http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/story/2006/07/060719_europacalortp.shtml. Acesso em 29 de agosto de 2008.
- Bjørlykke K.O. 1989. *Sedimentology and Petroleum Geology*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Butcher S.S., Charlson R.J., Orians G.H. 1998. *Global*

- Biogeochemical Cycles*. San Diego: Academic Press.
- Carneiro C.D.R., Toniolo J.C. 2010. A Terra “quente” na mídia: confiabilidade das notícias sobre aquecimento global. Revista *História, Ciências, Saúde – Manguinhos*. (submetido, março 2010).
- Castilhos W. s.d. *Enganos e catastrofismos*: Jefferson Simões critica interpretações catastróficas e destaca confusões sobre aquecimento global. Disponível [online] em <http://www.agencia.fapesp.br/>. Captura realizada em 12 de março de 2007.
- Center for the Study of Carbon Dioxide and Global Change. 2009. *CO₂ Science Magazine* [<http://www.co2science.org/>]. Seção Vídeos / Copenhagen Climate Concerns / Science. Tempe City, Arizona, EUA: Center for the Study of Carbon Dioxide and Global Change, 2009.
- Christofoletti A. 1999. *Modelagem de sistemas ambientais*. 2ª reimpr. São Paulo: Blücher/EDUSP. 236p.
- Christopherson R.W. 1992. *Geosystems*. Introduction to Physical Geography. New York: Macmillan Publ. Co, 616p.
- Church J.A., White N.J. 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, **33**:L01602-L01604. doi:10.1029/2005GL 024826.
- Collinson J.D. 1996. *Alluvial sediments*. In: H.G. Reading ed. *Sedimentary environments: processes, facies, and stratigraphy*. 3 ed. Oxford: Blackwell Science.
- Diamond J. 2006. *Colapso: como as sociedades escolhem o fracasso ou o sucesso*. Trad. A. Raposo. Rio de Janeiro: Record. 683p.
- EFE, Agência. 2008. *Aquecimento Global: Especialistas questionam alarmismo sobre mudança climática*. Disponível no Portal Terra em <http://noticias.terra.com.br/ciencia/interna/0,,OI2654386-EI8278,00-Especialistas+questionam+alarmismo+sobre+mudanca+climatica.html>. Acesso em 30 de maio de 2008. Artigo publicado em 4 de março de 2008.
- Ernst W.G. 2000. *Earth Systems: processes and issues*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ESPERE (Environmental Science Published for Everybody Round the Earth). s.d. *Como os oceanos absorvem o dióxido de carbono*. Disponível [online] em http://www.atmosphere.mpg.de/enid/1__Oceanos_e_clima/-_Como_os_oceanos_absorvem_o_di_xido_de_carbono_2oc.html. Acesso em 8 de janeiro de 2008.
- Gary M., McAfee Jr. R., Wolf C.L. eds. 1974. *Glossary of Geology*. Washington: American Geological Institute.
- Global, Aquecimento. s.d. [não há título]. Disponível [online] em <http://www.aquecimentoglobal.com.br/index.php?pg=home>. Acesso em 30 de maio de 2008.
- Henderson-Sellers A., Robinson P.J. 1986. *Contemporary climatology*. New York, Longman. 439p. (reprinted 1987).
- Houghton J. 1999. *Global Warming: the complete briefing*. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press. 1999.
- Houghton J. 2004. *Global Warming: the complete briefing*. 3 ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 2004 [reimpressão de 2006].
- Idso S. 2009. *Carbon Dioxide: The Breath of Life* [vídeo]. Tempe City, Arizona: Center for the Study of Carbon Dioxide and Global Change. In: *CO₂ Science Magazine*. <http://www.co2science.org/>. Seção Vídeos / Copenhagen Climate Concerns / Science. [trad. e adapt. texto para Português por Henrique Dmyterko, disp. [online] em <http://www.midiaamais.com.br/videos-indicados/2064-co2-o-sopro-da-vida>. Acesso 12.jan.2010.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2004. *Global Warming: the complete briefing*. 3. ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press. Reimpressão em 2006.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). s.d. *Summary for Policymakers*. Disponível [online] em http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/pages_media/SRCCS-final/SRCCS_SummaryforPolicymakers.pdf. Acesso em 28 de março de 2007.
- Landis E.R., Averitt Paul. Coal. In: Fairbridge R.W., Bourgeois J. 1978. *The Encyclopedia of sedimentology*. Encyclopedia of Earth Sciences, volume VI. Stroudsburg/Pennsylvania: Dowden, Hutchinson & Ross, Inc.
- Leroux M. 2005. *Global warming: Mith or reality? The erring ways of climatology*. Berlin: Springer-Verlag. 509p.
- Lovelock J. 1991. *As eras de Gaia: a biografia da nossa Terra viva*. Rio de Janeiro: Ed. Campus.
- Marshak S. 2005. *Earth: portrait of a planet*. 2 ed. New York: W. W. Norton & Company, Inc.
- McCarthy J.J. et al. 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- McManus J.F., Francois R., Gherardi J.M., Keigwin L.D., Brown-Leger S. 2004. Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes. *Nature*, **428**: 834-837.
- Molion L.C.B. 1995. Um século e meio de aquecimento global. Rio de Janeiro: SBPC. *Ciência Hoje*, **18**(107):20-29.
- Molion L.C.B. 2008. Aquecimento global: uma visão crítica. São Paulo: Associação Brasileira de Climatologia (ABCLima), *Rev. Bras. Climatologia*. Ano **4**(3/4):07-24.
- Monckton C. 2006a. *Wrong problem, wrong solution*. Disponível [online] em <http://www.telegraph.co.uk/news/main.jhtml?xml=/news/2006/11/12/nclim12.xml&page=1>. Acesso em 25 de abril de 2008. Artigo publicado em 15 de novembro de 2006.

- Monckton C. 2006b. *Climate chaos? Don't believe it*. Disponível [online] em <http://www.telegraph.co.uk/news/main.jhtml?xml=/news/2006/11/05/nosplit/nwarm05.xml>. Acesso em 25 de abril de 2008. Artigo publicado em 5 de novembro de 2006.
- NASA. Wikipedia. 2009. *NASA Earth energy budget.gif*. Wikimedia Commons, Wikipedia. Modif. 28 de agosto de 2009. Disponível [online] em <http://en.wikipedia.org/wiki/File:57911main_Earth_Energy_Budget.jpg> Acesso em 23 de julho de 2010.
- Oelkers E.H., Cole D.R. 2008. Carbon dioxide sequestration: a solution to a global problem. *Elements*, 4:305-310. Disponível [online] em <http://elements.geoscienceworld.org/cgi/reprint/4/5/305>. Acesso em 12 de fevereiro de 2010.
- Oms C. 2009. Ab'Saber: COP-15 é farsa, Amazônia crescerá com aquecimento. In: *Terra Magazine*. Publ. 11 de dezembro de 2009. Disponível [online] em <http://terramagazine.terra.com.br/interna/0,,OI4150118-EI6586,00.html>. Acesso em 12 de janeiro de 2010.
- Pesquisa Sua. s.d. *Aquecimento Global*. Seção de Geografia. Disponível [online] em http://www.suapesquisa.com/geografia/aquecimento_global.htm. Acesso em 29 de agosto de 2008.
- Press F., Siever R., Grotzinger J., Jordan T.H. 2006. *Para entender a Terra*. 4 ed. Trad. R. Menegat, P.C.D. Fernandes, L.A.D. Fernandes, C.C. Porcher. Porto Alegre: Bookman. 656p.
- Shelager W. 2000. Sedimentation rates and growth potential of tropical, cool-water and mud-mound carbonate systems. In: Insalaco E., Skelton P.W., Palmer T.J eds. 2000. *Carbonate Platform Systems: components and interactions*. Geological Society Special Publication n° 178. London: The Geological Society of London, 2000.
- Silva R.W.C., Paula B.L. 2009. Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural. *Terræ Didática*, 5(1):42-49. Disponível [online] em <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>. Acesso em 12 de dezembro de 2009.
- SM. 2004. *Europa ameaçada pela mudança climática*. DW-WORLD.DE - Deutsche Welle. 19/08/2004. Disponível [online] em <http://www.dw-world.de/dw/article/0,9137,1301893,00.html>. Acesso em 29 de agosto de 2008.
- Sowell T. 2007. *Global Warming Swindle*. Disponível [online] em http://www.townhall.com/columnists/column.aspx?UrlTitle=global_warming_swindle&ns=ThomasSowell&dt=03/15/2007&page=full&comments=true. Acesso em 25 de abril de 2008. Artigo publicado em 15 de março de 2007. Tradução em português disponível em <http://www.midiasemmascara.com.br/artigo.php?sid=5729>. Acesso em 25 de abril de 2008.
- Sowell T. 2008. *Cold Water on "Global Warming"*. Disponível [online] em http://www.townhall.com/columnists/ThomasSowell/2008/02/28/cold_water_on_global_warming?page=full&comments=true. Acesso em 25 de abril de 2008. Artigo publicado em 28 de fevereiro de 2008. Tradução em português disponível em <http://www.midiasemmascara.com.br/artigo.php?sid=6427>. Acesso em 25 de abril de 2008.
- Suguio K. 1980. *Rochas sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Suguio K. 1998. *Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1998.
- Tardy Y. 1997. Geoquímica Global: oscilações climáticas e evolução do meio ambiente desde quatro bilhões de anos. *Estudos Avançados USP* 11(30):149-173.
- Teichmüller M., Teichmüller R. 1978. Coal-diagenesis and metamorphism. In: Fairbridge R.W., Bourgeois J. *The Encyclopedia of sedimentology*. Encyclopedia of Earth Sciences, volume VI. Stroudsburg/Pennsylvania: Dowden, Hutchinson & Ross, Inc..
- Toniolo J.C. 2007. Plano de Trabalho e Cronograma de Atividades de Pesquisa: Processos geológicos de fixação de carbono na crosta terrestre. Campinas: Departamento de Geociências Aplicadas ao Ensino (Instituto de Geociências). 2007.
- Toniolo J.C., Carneiro C.D.R. 2009. Um tema "quente" nos meios de comunicação: a confiabilidade das notícias sobre aquecimento global. In: CONGR. INTERNO INIC. CIENT., 17, Campinas, 2008. *Resumos...* Campinas: Unicamp. [pdfN/606.pdf] (CD-ROM, resumo E0455)
- Tucker M.E., Wright V.P. 2001. *Carbonate sedimentology*. Oxford: Blackwell Scientific.
- Veiga J.E.da. 2008a. A principal lição da mudança climática. *Valor Econômico*, 19/02/2008. Blog URL: <http://www.espacopublico.blog.br/?p=1727> e <http://www.valor.com.br/valoreconomico/285/primeirocaderno/opiniao/A+principal+licao+da+mudanca+climatica,,58,4784019.html?highlight=&newsid=4784019&areaid=58&editoid=1948>.
- Veiga J.E.da. org. 2008b. *Aquecimento global: frias contendas científicas*. São Paulo: Senac.
- Wikipedia. 2010. *Earth's energy budget*. Wikipedia. Modif. 6 de julho de 2010. Disponível [online] em <http://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_energy_budget> Acesso em 23 de julho de 2010.
- Wikipedia. s.d. *Carbonate platform*. Disponível [online] em http://en.wikipedia.org/wiki/Carbonate_platform. Acesso setembro de 2007.
- Wikipedia s.d. *Fitoplâncton*. Disponível [online] em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fitopl%C3%A2ncton> Acesso em 8 de janeiro de 2008.