

Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂

*MARIA RAQUEL PEREIRA DOS SANTOS PACHECO**
*MARIA ELISA MARCONDES HELENE***

1. Objetivo

O presente artigo tem como objetivo a divulgação da problemática que envolve as altas concentrações de CO₂ na atmosfera. Sendo este um tema que preocupa os meios científicos, achamos importante elaborar um documento elucidativo desta complexa problemática. Trata-se de um assunto com várias pontas; portanto, procuramos, embora de uma maneira sucinta, mostrar a função e a importância do CO₂ na natureza, através do seu papel na atmosfera e dos seus fluxos. O nosso objeto de pesquisa, mais especificamente, refere-se ao papel que a biomassa terrestre — florestas tropicais — exerce em relação às altas concentrações de CO₂ (2ª parte do artigo, iniciada no item 6). Serão as florestas tropicais um depósito do excesso do CO₂ atmosférico?

2. Introdução

A cada ano, uma quantidade da ordem de 10 Gt de carbono na forma de dióxido de carbono (CO₂) e de outros gases são liberados para a atmosfera através de processos das atividades humanas. Nos últimos 200 anos, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera aumentou 27% — decorrente da queima de combustíveis fósseis com o início da era industrial e com os desmatamentos — sendo que metade deste aumento ocorreu nos últimos 30 anos. As concentrações de CO₂ na atmosfera passaram de 272 ppm na era pré-industrial para 346 ppm em 1986 (HALL, 1989, p. 175).

* Maria Raquel Pereira dos Santos Pacheco é bolsista de aperfeiçoamento tipo B, CNPq.

** Maria Elisa Marcondes Helene é pesquisadora-visitante do Instituto de Estudos Avançados da USP.

Este crescente aumento de CO₂ na atmosfera tem deixado os cientistas apreensivos em relação às possíveis conseqüências climáticas.

Alterações climáticas implicam em mudanças no atual equilíbrio ambiental estabelecido no planeta. Mais especificamente o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera pode supostamente prejudicar o equilíbrio estabelecido entre oceanos e biosfera que fazem suas trocas de carbono através da atmosfera. Em concentrações normais, longe de ser prejudicial, o CO₂ é fator primordial sob dois pontos de vista: *metabolismo das plantas e equilíbrio climático global*.

3. CO₂ na atmosfera

A Terra formou-se sem uma atmosfera. De acordo com teorias modernas, o planeta formou-se por uma lenta acumulação de partículas sólidas e frias de todos os tamanhos, procedentes de detritos e restos solares. Os gases e água que agora constituem nossa atmosfera e oceanos eram componentes químicos de uma mesma mescla original (DONN, 1978, p. 4).

Com o passar do tempo, o calor liberado pelos processos radiativos e pela sedimentação de elementos mais pesados para o centro da Terra elevou a temperatura da Terra primitiva. Os elementos que constituíram a atmosfera e os oceanos iniciais foram expelidos do interior da crosta terrestre, acumulando-se lentamente até constituir a água e o ar que hoje rodeiam a Terra. Quando a vida ainda não tinha aparecido, existiam no ar apenas traços de oxigênio molecular, a atmosfera era composta principalmente por CO₂ e vapor d'água expelidos pela intensa atividade vulcânica; só posteriormente, com o aparecimento das primeiras plantas verdes capazes de fazer fotossíntese, que o oxigênio livre surgiu (DONN, 1978, p. 4).

Nas fases iniciais de formação do que a Terra é hoje, as concentrações de gás carbônico (CO₂) na atmosfera eram muito altas, decorrentes principalmente da grande intensidade das erupções vulcânicas. O gás carbônico começou a decrescer em quantidade na atmosfera quando transformado em depósitos calcários pelas algas marinhas; este processo de decréscimo de CO₂ teve duas fases: primeiramente — há 600 milhões de anos —, com a proliferação de protozoários calcários, os foraminíferos e posteriormente — há 350 milhões de anos —, pela proliferação de pteridófitas. Porém, no meio do período Cretáceo — há 100 milhões de anos, na época dos dinossauros —, as concentrações de CO₂ na atmosfera ainda eram muito altas, estimadas em 10 vezes mais que nos dias atuais. Uma forte redução no vulcanismo teria provocado uma sensível baixa nos níveis de CO₂ na atmosfera e uma aproximação aos níveis atuais (POSTEL, 1986, p.

22). Após esta baixa, a terra conheceu sucessivas altas e novas baixas nos níveis de concentração de CO₂ na atmosfera — que ainda hoje não são explicadas — e que muitos cientistas acreditam estar relacionadas com a sucessão de períodos glaciais e interglaciais do período Pleistocênico.

Nos últimos 200 anos, como já foi mencionado, a concentração de CO₂ na atmosfera já aumentou 27% como fruto da crescente queima de combustíveis fósseis, pelo desmatamento das florestas e pelas mudanças no uso da terra.

Com a queima de combustíveis fósseis, o carbono armazenado é oxidado e liberado para a atmosfera em forma de CO₂. Os combustíveis fósseis são os responsáveis por cerca de 75% da energia primária mundial, na proporção de:

1. petróleo — 32%
2. carvão — 26%
3. gás — 17%

O restante da energia primária é obtida de:

4. biomassa — 14%
5. hidroeletricidade — 6%
6. fissão nuclear — 5%

As emissões totais globais de CO₂ para a atmosfera, resultantes da queima de combustíveis fósseis (incluindo fabricação de cimento), atingiram aproximadamente 5,65 Gt em 1987. Os EUA são a maior fonte mundial de liberação de CO₂ por queima de combustíveis fósseis, com 1,202 Gt em média em 1986 (HALL e CALLE, 1989, p. 517).

O desmatamento tropical pela queima da biomassa, para uso agrícola da terra, para pastos e para uso de madeiras, é também um grande responsável pelo crescente aumento de CO₂ na atmosfera. As florestas contêm de 20 a 100 vezes mais carbono por unidade de área que as plantações ou pastos. Com o desmatamento o carbono originalmente contido na vegetação e nos solos é liberado para a atmosfera em forma de CO₂. Somente uma quantidade relativamente pequena de carbono é redistribuída na terra ou levada pelos rios.

A liberação global líquida de carbono, devida ao desmatamento entre 1860 e 1980 situou-se entre 135 e 228 Gt (WOODWELL et alii, 1983, p. 1082). Wilson sugere que somente nas 3 décadas entre 1860

e 1890 foram liberadas para a atmosfera 110 Gt devido à chamada agricultura pré-industrial (WILSON, 1978, p. 41). Algumas estimativas de entrada global líquida de CO₂ na atmosfera devida a mudanças no uso da terra foram de 1,0 a 2,6 Gt em 1980 (HOUGHTON et alii, 1987, p. 128).

Enquanto que Marland e Boden (1989) estimam uma média de 1,8 Gt (na faixa de 0,8 a 2,6 Gt), quase totalmente a partir dos trópicos (MARLAND e BODEN, 1989, citado em HALL e CALLE 1989, p. 521). Essas variações resultam das incertezas em relação aos estoques de carbono na vegetação e nos solos, à extensão dos diferentes tipos de florestas, às taxas de desmatamento e ao destino das terras desmatadas.

4. Mudanças climáticas e CO₂

Transparente e tênue, a atmosfera que conhecemos é um estado de equilíbrio entre as concentrações de seus componentes.

Este crescente aumento de CO₂ na atmosfera tem deixado os cientistas apreensivos em relação às possíveis conseqüências climáticas.

As moléculas de nitrogênio, oxigênio e argônio que constituem quase a totalidade do ar são transparentes tanto às radiações infravermelhas como à radiação solar visível, tendo um poder de absorção praticamente nulo. Ao contrário, um certo número de moléculas presentes no ar que não representam mais que uma pequena parte dos componentes da atmosfera, em maior proporção vapor d'água (H₂O) e dióxido de carbono (CO₂) e em menor proporção metano (CH₄) e outros compostos, têm a propriedade de serem opacos aos raios infravermelhos do solo quando dissipados para o espaço e com isto aquecer as baixas camadas da atmosfera. Graças a este processo, a temperatura do ar que nos envolve é favorável às formas de vida existentes; este processo natural é chamado de "efeito estufa", por analogia às instalações que protegem culturas vegetais frágeis do frio, onde meios de vidro que deixam passar a radiação solar visível impedem a fuga dos raios infravermelhos.

Percebemos que, conjuntamente com o vapor d'água, o dióxido de carbono é um grande absorvedor das radiações solares capazes de aquecer a atmosfera; quanto mais vapor d'água e CO₂, mais quente estará o ar. A preocupação de muitos cientistas está, portanto, voltada para o perigo de um aquecimento global da atmosfera devido às altas concentrações de CO₂, através do agravamento de um fenômeno essencialmente natural: o "efeito estufa". Estas preocupações têm razão de ser, haja vista, que o CO₂ é fator importante no aquecimento da atmosfera. Porém, *relações de causa e efeito entre taxas de concentração de CO₂ na atmosfera e níveis de temperatura ainda são uma*

questão sem resposta definitiva. Sabe-se que a terra conheceu períodos muito quentes durante os quais as taxas de CO₂ foram muito elevadas, mas a concentração do vapor d'água que contribui em primeira ordem para o "efeito estufa" era provavelmente bem maior.

Estudos sistemáticos foram feitos até 150.000 anos atrás, comparando o volume das geleiras, o nível dos mares e as taxas de CO₂ (as taxas de CO₂ foram calculadas medindo a composição isotópica de carbono em conchas de foraminíferos). As concentrações de CO₂ na atmosfera atingiram o *maximum* de 350 ppm antes do começo do último período interglacial e atingiram o *minimum* de 225 ppm pouco antes do último maximum glacial; a relação de altas e baixas concentrações de CO₂ na atmosfera e períodos quentes e frios, respectivamente, foi exata nestes estudos. *A questão que se coloca é se as taxas de CO₂ que parecem anunciar um resfriamento e um aquecimento são efetivamente a origem destas variações ou são reflexo de causas mais profundas.* A análise isotópica do carbono contido em anéis de crescimento dos troncos de árvores indicou fortes variações nas taxas de CO₂ na atmosfera, na Europa, no curso dos últimos 15 séculos. Entre o ano 1000 e 1010, a taxa de CO₂ passou de 230 ppm para 310 ppm, aumento semelhante ao atual; essas 310 ppm estão associadas ao quente período das populações Viking. Se este quente período precedeu ou sucedeu o aumento de CO₂, é uma questão sem resposta. Por sua vez, as 230 ppm — taxa equivalente à do último *maximum* glacial há 18.000 anos — não corresponderam a um período glacial (POSTEL, 1986, p. 26). Isto nos mostra que a relação entre alterações climáticas e aumento de concentração de CO₂ na atmosfera ainda está em fase especulativa.

No entanto, caso mudanças climáticas ocorram decorrentes do aumento de dióxido de carbono na atmosfera, sem dúvida alguma os ecossistemas terrestres serão afetados. Efeitos serão sentidos na distribuição e composição da fauna e flora dos ecossistemas, decorrentes de inúmeras variáveis que mantêm o atual equilíbrio biológico. Haverá mudanças na temperatura e conseqüentemente no regime das chuvas, no escoamento das águas, na vazão dos rios, na umidade dos solos, na evapotranspiração, enfim, *nas variáveis que participam das relações fundamentais da natureza.*

Diante de tantas incertezas, uma questão não deixa dúvidas: o homem provoca a liberação para a atmosfera de grandes quantidades de CO₂. Descobrir como a Terra — velha conhecida do CO₂ — vai reagir aos impactos da liberação excessiva deste gás é toda uma questão em aberto.

5. Fluxos de carbono

O carbono distribui-se na natureza da seguinte forma: 0,06% na atmosfera, oceanos, plantas e animais; 99,94% nas rochas e sedimentos oceânicos (BERNER e LASAGA 1989, p. 58).

Pode-se perceber que a maior parte do carbono na Terra está estocado nas camadas geológicas e nos sedimentos oceânicos e está sob a forma de carbonatos, de carvão e de petróleo.

Porém, os três principais reservatórios de carbono capazes de fazer trocas entre si e que compõem o ciclo biogeoquímico do carbono são: *atmosfera, oceanos e biosfera terrestre.*

Estes reservatórios têm subdivisões internas e os mecanismos de trocas nas suas fronteiras são muito complexos. O ciclo biogeoquímico do carbono é o nome dado ao conjunto de processos responsáveis por retirar carbono de um determinado reservatório, fazê-lo participar de compostos e reações em outros reservatórios e após algum tempo devolvê-lo ao reservatório de origem. O carbono estocado em combustíveis fósseis não é permutável naturalmente, isto ocorre apenas com a interferência humana.

O CO₂ desaparece da atmosfera somente pelo processo de absorção dos outros 2 reservatórios: oceanos e biomassa.

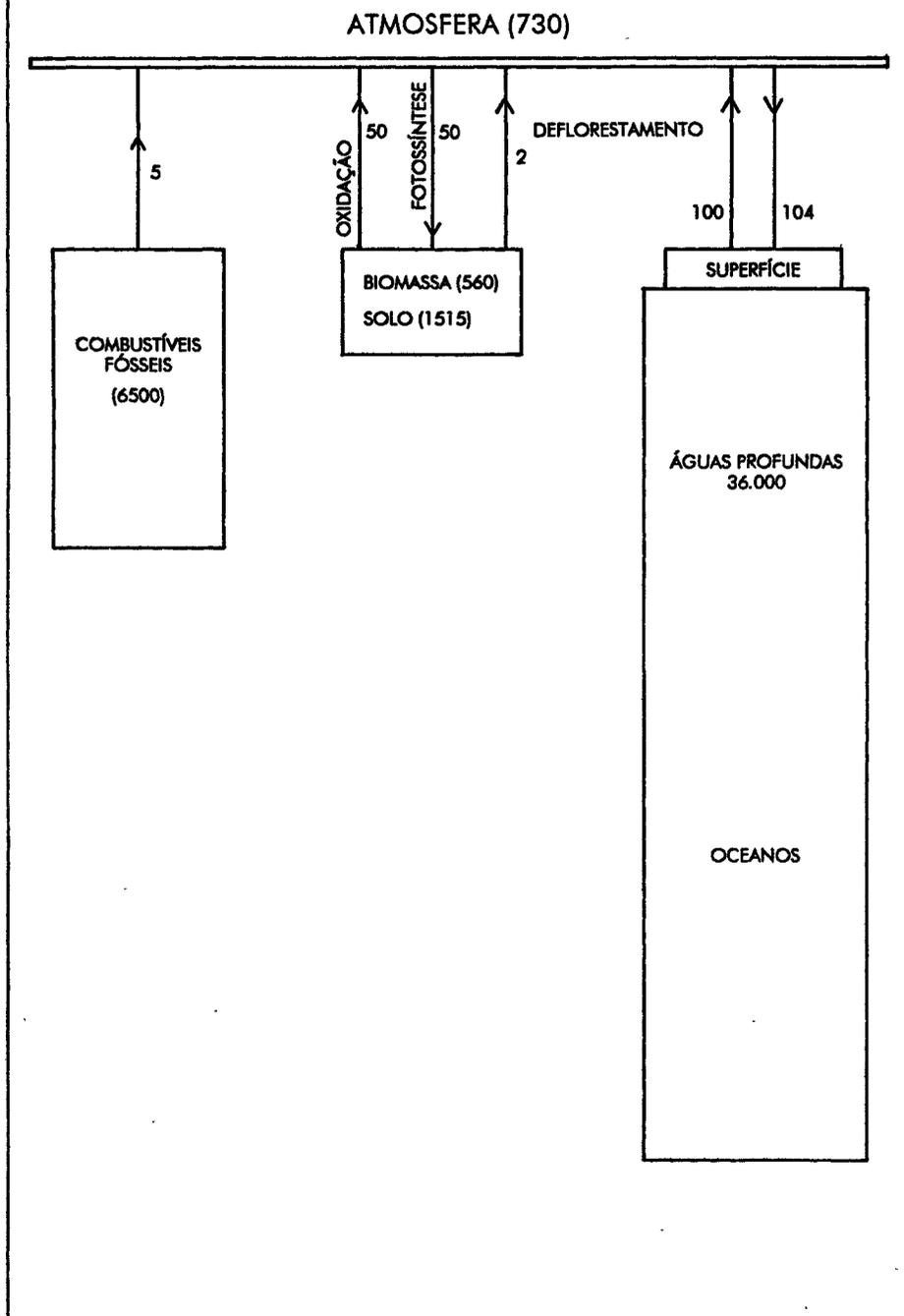
As quantidades de carbono transferidas de um reservatório para outro por unidade de tempo, devido a processos físico-bio-geo-químicos, são conhecidas como FLUXOS de carbono. Os fluxos ocorrem entre os três reservatórios principais, tendo a atmosfera um papel intermediário; em primeira aproximação, as trocas diretas entre biomassa continental e oceanos são negligenciáveis e todas as trocas entre esses dois reservatórios se produzem pelo intermédio da atmosfera.

A figura 1 mostra os reservatórios de carbono e os fluxos do mesmo entre esses reservatórios.

As fontes de carbono da atmosfera são bem conhecidas, como aquelas decorrentes das atividades humanas que queimam combustíveis fósseis e liberam bilhões de toneladas por ano para a atmosfera e aquelas naturais como o vulcanismo e o saldo das trocas da atmosfera com os biomas terrestres e com os oceanos. A concentração de dióxido de carbono na atmosfera é muito variável, dependendo da hora do dia, da sazonalidade, da latitude e das altitudes. O CO₂ desaparece da atmosfera somente pelo processo de absorção dos outros 2 reservatórios: oceanos e biomassa.

Figura 1

RESERVATÓRIO E FLUXOS DE CARBONO
(EM BILHÕES DE TONELADAS)
(Houghton e Woodwell, 1989, p. 20)



Por sua vez, os vegetais terrestres constroem seus tecidos a partir do CO₂ atmosférico captado em nível de folha. É a chamada **FOTOSSÍNTESE TERRESTRE** que retira anualmente da atmosfera, em um processo natural, cerca de 100 Gt de carbono em forma de dióxido de carbono. Sabe-se também que à noite estes mesmos vegetais liberam dióxido de carbono para a atmosfera em um processo chamado **RESPIRAÇÃO** e que conjuntamente com o solo devolvem para a atmosfera cerca de 100 Gt de CO₂ por ano (HOUGHTON e WOODWELL, 1989, p. 20). O grau de atividade vegetal depende notadamente da luminosidade, da temperatura, umidade e outras variáveis; as estações do ano caracterizam bem esta situação: a primavera e o verão, com climas mais quentes, são mais favoráveis à produção vegetal, ou seja, maior absorção de CO₂; já no outono, com a morte dos vegetais e o ataque por bactérias, existe maior liberação de CO₂. Em resumo, a fotossíntese e a respiração tanto dos vegetais como dos solos é que são os dois processos principais pelos quais passam os fluxos de carbono entre atmosfera e a biosfera.

A avaliação do reservatório oceânico é bastante complexa. A superfície oceânica está em contato direto com os gases atmosféricos e, portanto, tem a presença desses gases dissolvidos na água; o dióxido de carbono está em uma concentração de 33 a 56 ml/l (HARARI, 1989, p. 8).

Em primeira aproximação, o fluxo local de carbono trocado entre atmosfera e oceano por unidade de superfície e tempo é proporcional à solubilidade do CO₂, à temperatura da água e à diferença entre as pressões parciais do gás na água e na atmosfera. Já a capacidade global do oceano em fazer trocas com a atmosfera passa pela complexa dinâmica da circulação oceânica que é caracterizada por movimentos ascendentes e descendentes das águas. Uma mesma região oceânica poderá ser tanto emissora como absorvedora de CO₂, dependendo da pressão parcial do CO₂ na água e na atmosfera; a quantidade de CO₂ dissolvida na água depende de variáveis climatológicas e do ciclo sazonal dos organismos vivos do mar. Os processos físico-químicos na superfície do mar liberam aproximadamente 100 Gt de dióxido de carbono para a atmosfera e absorvem cerca de 104 Gt por ano (HOUGHTON e WOODWELL, (1989, p.20).

A atmosfera não é a única fonte de CO₂ para os oceanos, um grande sistema químico — o sistema carbonato — proporciona um fluxo constante e maior que o atmosférico de dióxido de carbono aos oceanos. O sistema carbonato, normalmente na forma de bicarbonato de sódio, de bicarbonato potássio e de carbonato de cálcio, é trazido pelos rios e transformado no oceano através de reações químicas em dióxido de carbono (HARARI, 1989, p. 9).

Qualquer alteração dos fluxos naturais acima percorridos poderá vir a afetar de modo acentuado a composição da atmosfera. Essa alteração já está ocorrendo, uma vez que os processos de queima de combustíveis fósseis e o desmatamento têm liberado grandes quantidades de dióxido de carbono para a atmosfera. Estimativas do ano de 1980 mostraram que a queima de combustíveis liberou para a atmosfera cerca de 5,2 Gt de carbono na forma de CO₂ e a derrubada de florestas tropicais, um valor médio de 1,8 Gt, dando um total de 7 Gt de carbono por ano. A metade fica na atmosfera — que tem um valor de crescimento líquido anual de aproximadamente 3,5 Gt —, o restante é absorvido pelos oceanos, biomassa terrestre e outros reservatórios não conhecidos (MYERS, 1989, p. 74). Foi dentro desta problemática que começaram a surgir estudos referentes ao papel da biomassa como depósito do excesso de CO₂ atmosférico. É o assunto que iremos tratar no tópico a seguir.

6. Biomassa terrestre e aumento de CO₂

Supõe-se que os oceanos e a biomassa terrestre absorvem boa parte do CO₂ emitido pelas atividades humanas. Isto tem tornado estes dois reservatórios de carbono um alvo de estudos e indagações acerca do papel que exercem e que poderão exercer como possíveis depósitos de CO₂ excedente na atmosfera.

Em um processo natural, as plantas têm o privilégio de poder transformar diretamente em biomassa substâncias inorgânicas envolvidas no ciclo dos materiais (carbono, hidrogênio, oxigênio, etc.). Graças à fotossíntese, as plantas utilizam a energia luminosa — captada em nível de folha pelos cloroplastos — para transformar quimicamente o CO₂ da atmosfera — captado pelos estômatos — em substâncias ricas em energia, os açúcares. Estes açúcares são vitais ao metabolismo alimentar e conseqüentemente ao crescimento das plantas. Com o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera tem-se colocado algumas perguntas, uma vez que o CO₂ é um gás fundamental no desenvolvimento vegetal:

Quais são e quais serão as conseqüências do aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera sobre a biomassa terrestre? Qual a ação do CO₂ na planta individualmente e na comunidade como um todo?

Pesquisas vêm sendo feitas a *nível laboratorial* e tem-se constatado que plantas estimuladas por altas concentrações de CO₂ têm dado respostas positivas de aumento de produtividade vegetal. Alguns experimentos controlados constataram que, em média, ao se passar do valor da

concentração de CO₂ atmosférico de 300 ppm para o valor de 600 ppm obtém-se um aumento de 30% na produtividade vegetal (IDSO et alii, 1989, p. 8). Tendo como base os valores acima, considerando-se que nos últimos 200 anos a concentração de CO₂ na atmosfera aumentou 74 ppm e *supondo-se* que é linear a relação entre aumento das concentrações de CO₂ e aumento de produtividade vegetal (BAZZAZ et alii, p. 9), podemos dizer que pode ter havido um aumento de 7,4% no crescimento vegetal. Continuando este raciocínio: como a reserva da vegetação mundial é de 560 Gt de carbono (HOUGHTON e WOODWELL, p. 20), houve um aumento na biomassa fixa de 41 Gt; desta forma, caracteriza-se este reservatório como um "missing sink" (suposto reservatório com capacidade para captar o excesso de carbono). Caso este reservatório não seja um "missing sink" definitivo, como os ecossistemas que tiveram sua produtividade aumentada em 41Gt dissiparam esta vultuosa quantidade de carbono?

A dissipação total desta biomassa levaria os ecossistemas de volta à sua concentração inicial de carbono; a dissipação parcial ou a não dissipação levaria os ecossistemas a uma outra situação de equilíbrio diferente daquela já estabelecida. Como há competição entre as espécies componentes do ecossistema, o 2º equilíbrio poderia ser, por exemplo, uma situação onde haveria um aumento diferenciado na biomassa fixa das plantas com diferentes taxas fotossintéticas (C₃ e C₄). Nesta situação, não estamos considerando os efeitos climáticos do aumento de CO₂, quais sejam, as mudanças no equilíbrio hídrico e variações na temperatura.

O processo de crescimento na produtividade vegetal devido a altas concentrações de CO₂ ficou conhecido como *efeito de fertilização por CO₂*.

Evidências experimentais controladas sobre os impactos diretos do aumento de CO₂ têm mostrado que as respostas em nível de folha em relação à taxa de assimilação de CO₂ estão atreladas a dois pontos:

1. sensibilidade dos estômatos ao CO₂;
2. atividade das enzimas fotossintéticas.

Dependendo da sensibilidade dos estômatos (poros microscópicos na superfície da folha através dos quais as plantas fazem as trocas dos gases, entre eles o CO₂) às concentrações de CO₂, as respostas das plantas à assimilação podem ser diferenciadas. Em alguns experimentos percebeu-se que diante de altas concentrações de CO₂ existia uma diminuição na abertura dos estômatos e uma conseqüente

menor perda de água pela planta. Com a redução da transpiração ou perda de água, ocorre maior eficiência fotossintética no uso da água e conseqüentemente um provável aumento na produtividade vegetal (SHUGART et alii, 1986, p. 476).

Quanto à fotossíntese, certas plantas respondem melhor que outras às altas concentrações de CO₂, dependendo do processo fotossintético a que estão ligadas. Diversas classificações serviram para catalogar os vegetais segundo critérios fisiológicos e morfológicos, porém, no final dos anos 60, um novo tipo de classificação surgiu ligada ao mecanismo inicial de assimilação de CO₂ pela fotossíntese. A explicação deste fenômeno de diferença de eficiência fotossintética reside em mecanismos bioquímicos de fotossíntese. Distinguiram-se dois tipos principais de plantas fotossintéticas: C₃ e C₄.

Na maioria das plantas, a fixação de CO₂ segue um ciclo de fosfato de pentose denominado C₃, ou ciclo de Calvin, o qual constituiu durante muitos anos o esquema aceito de fotossíntese. Em outras plantas, chamadas de C₄, a redução — processo redox — do CO₂ segue o ciclo de ácido dicarboxílico. As plantas C₃ representam 95% da biomassa vegetal mundial; as plantas C₄, em desvantagem de representantes, são particularmente numerosas na família das Gramíneas, mas ocorrem em muitas outras famílias de plantas.

Estes dois tipos de plantas fotossintéticas têm respostas diferenciadas de crescimento dependendo de 4 variáveis: *luz, concentrações relativas de O₂ e CO₂, temperatura e umidade.*

As plantas C₃ tendem a chegar a uma taxa fotossintética máxima sob intensidade luminosa e temperatura moderadas e a serem inibidas por altas temperaturas e à plena luz do sol. Ao contrário, as plantas C₄ estão adaptadas à intensa luminosidade e a temperaturas altas, superando em muito a produção das plantas C₃ sob estas condições. Uma razão para que as plantas C₄ sejam eficientes nestas condições é que a fotorrespiração não aumenta à medida que a luminosidade cresce de intensidade (ODUM, 1985, p.20). O CO₂ perdido pela fotorrespiração anula parcialmente a fixação de CO₂ pela fotossíntese; dependendo da espécie vegetal a fotorrespiração pode diminuir o rendimento fotossintético de 30 a 50%. A intensidade da fotorrespiração consegue atingir as plantas C₃; as plantas C₄ possuem vias metabólicas diferentes, mediatizadas por estruturas anatômicas especiais que diminuem a força da fotorrespiração (SOMERVILLE e SOMERVILLE, 1984, p.494).

As plantas C₄ apresentam ainda uma característica morfológica muito importante: grandes cloroplastos nas bainhas dos feixes em torno das

nervuras das folhas. São mais eficientes no uso da água — 400g de água para produzir 1g de matéria seca ao passo que as C₃ necessitam de 400g a 1000g de água para a mesma produção — e não são inibidas por altas concentrações de oxigênio como as plantas C₃. Mas, apesar do potencial fotossintético em nível de folha das plantas C₃ ter-se apresentado menor que o das plantas C₄ — em condições ótimas para ambas —, as plantas C₃ são responsáveis pela maior parte da produção fotossintética mundial, provavelmente porque são mais competitivas nas comunidades mistas, onde existem efeitos de sombreamento, onde a luminosidade, temperatura, etc., são médias em vez de extremas (ODUM, 1985, p. 21). Uma outra questão interessante que se nota é que experimentalmente as plantas C₃ respondem melhor ao aumento das concentrações de CO₂: a produtividade vegetal das plantas C₃ tem-se apresentado maior que a das plantas C₄, o que leva alguns pesquisadores a acreditar que altas concentrações de CO₂ atmosférico podem ser um fator inibidor de crescimento das plantas C₄, como por exemplo culturas de cana-de-açúcar.

A produtividade líquida normal de uma floresta é a soma do crescimento individual das árvores e da dinâmica global da floresta...

Os experimentos têm sido feitos controladamente em nível de folhas e brotos em um pequeno período de tempo. A reação de curto prazo das taxas de fotossíntese das folhas — em nível experimental — diante de concentrações altas de CO₂ não constitui uma indicação de resposta de curto ou longo prazo apresentada pelas plantas no meio ambiente. *Não se pode afirmar, apesar das respostas positivas de crescimento das plantas em laboratório que a produtividade das mesmas continuaria a crescer no meio natural em uma alta taxa de CO₂ ou que haveria um aumento do crescimento-padrão da planta com o passar do tempo.* Além do mais, os experimentos em nível de folha ainda carecem de conhecimentos mais aprofundados acerca da fisiologia das plantas, como um melhor entendimento dos mecanismos de crescimento da folha, nutrição, etc., que são fundamentais nas respostas das plantas aos estímulos externos. Os estudos de campo disponíveis são poucos e referentes apenas a áreas de plantações (SHUGART et alii, 1986, p. 494).

Os conhecimentos obtidos experimentalmente em nível de planta individual são insuficientes, como foi visto, para se determinar alguma coisa em relação aos efeitos do aumento do CO₂ atmosférico na vegetação no meio ambiente. E, quando se trata de um ecossistema inteiro, a questão fica infinitamente mais delicada. *Os ecossistemas reúnem um complexo tecido de interações químicas, físicas e biológicas e não podem ser tratados como uma relação de causa e efeito dentro da problemática do crescimento da produtividade vegetal e aumento de CO₂ atmosférico.*

O caso dos ecossistemas florestais tem-se apresentado como um desafio para os cientistas. Os problemas são muito grandes, tanto pela amplitude como pelo complexo feixe de relações internas compatíveis com a dinâmica deste ecossistemas e também pela íntima relação entre a vegetação e a atmosfera. A produtividade líquida normal de uma floresta é a soma do crescimento individual das árvores e da dinâmica global da floresta (morte, recrutamento de árvores, regeneração, competição) (SHUGART e alii, 1986, p. 481).

Quantificar a produtividade líquida de uma floresta frente às altas concentrações de CO₂ é uma tarefa de difícil acesso, uma vez que se tem em mente a complexidade das relações internas entre as diferentes espécies, das particularidades de cada espécie e da relação do ecossistema com as variáveis externas.

As florestas que já alcançaram o clímax estão no estágio mais maduro da sucessão ecológica: "Teoricamente, a comunidade clímax é autopertuante porque está em equilíbrio dentro de si mesma e com o habitat físico. Em contraste com uma comunidade desenvolvimental ou outra comunidade transitória, a produção anual mais a importação são equilibradas pelo consumo anual da comunidade mais a exportação" (ODUM, 1985, p. 299). *A floresta em clímax – como a amazônica – pode vir a ter um aumento nas taxas de crescimento de seus indivíduos como resultado de um aumento das concentrações de CO₂, mas isso não significa que haverá um aumento na produtividade líquida total da floresta.* Na estabilidade florestal, a média anual de trocas de CO₂ líquido é zero, embora a taxa instantânea de assimilação de CO₂ por alguns componentes das plantas seja muito alta. A taxa de assimilação de CO₂ é balanceada pelas perdas de CO₂ da planta através da respiração da biomassa viva, pelas perdas da biomassa morta, pelas trocas respiratórias das raízes, das folhas, dos galhos e pelo indivíduo inteiro (SHUGART et alii, 1986, p. 495). Na bacia Amazônica, a taxa da captação de CO₂ pelas florestas (solo e dossel) perto do meio dia foi estimada em 9(±4) kgC. ha⁻¹h⁻¹, enquanto a taxa de captação média diária é de 1,8(± 0.2) kgC. ha⁻¹h⁻¹ (WOFSY et alii, 1988, p. 1377).

Como uma elevação nas concentrações de CO₂ no meio ambiente poderá afetar os controles e balanços nos complexos sistemas em clímax? Responde-se de imediato que é uma questão muito incerta.

"As evidências não compõem uma argumentação convincente para pressupor que a estimulação do crescimento pelo CO₂ observada em estudos com meio ambiente controlado se manifestem ou não a longo prazo em comunidades naturais de espécies misturadas" (GIFFORD, 1989, citado em HALL e CALLE, 1989, p. 536).

6.1. Ecossistemas amazônicos

Falar em ecossistemas amazônicos é falar em complexas relações entre atmosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera.

As relações entre esses quatro sistemas é que equilibram todos os ecossistemas terrestres.

Embora este domínio natural apresente, de maneira geral, formas de relevo aparentadas e coberturas vegetais extensivas que dão a idéia de homogeneidade, no seu interior existe uma série de condições ecológicas, pedológicas, hídricas e fitogeográficas diferenciadas (AB'SÁBER, 1984, p. 173). Os ecossistemas florestais representam mais de 90% de toda a Amazônia brasileira em uma extensão de 3.500.000 km² (BRAGA, 1979, p. 54).

A mistura de espécies é muito grande, ou seja, há muitas espécies por unidade de área, sem uma nítida predominância de uma ou de algumas delas quanto ao número de indivíduos; isto ocorre mais claramente na floresta de terra firme com uma extensão de 3.300.000 km². E como foi visto no tópico anterior, esta heterogeneidade de espécies e de relações internas e externas (com a atmosfera) torna os ecossistemas amazônicos, mais especificamente os florestais, de difícil trabalho na problemática do aumento do CO₂ atmosférico e suas conseqüências na biomassa vegetal.

A heterogeneidade de espécies caracteriza-se por indivíduos morfológica e fisiologicamente distintos e portanto capazes de dar diferentes respostas aos fatores limitantes de crescimento: escassez d'água, muita ou pouca luz, escassez ou excesso de minerais e temperatura. A amplitude das florestas e as relações que mantêm com a atmosfera também são um problema cheio de nuances. A título de exemplo, a estratigrafia florestal impede uma homogeneização de oportunidade de contato de todos os vegetais tanto com o CO₂ atmosférico como com o CO₂ respirado pelas raízes das árvores. Isto quer dizer que o dossel mais alto das florestas tem maior contato com o dióxido de carbono da atmosfera em relação aos vários outros níveis de camadas de vegetação.

Isto é apenas a ponta do iceberg. Tanto uma série de variáveis no nível de indivíduo e de comunidade, como um todo, assim como as inter-relações entre essas variáveis é que podem nos dizer que tipo de resposta a biomassa florestal tem em relação ao aumento de CO₂ atmosférico.

7. Conclusão

Vimos que, através da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento, o Homem tem provocado a liberação de bilhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera a cada ano. As conseqüências para o planeta desta massiva liberação ainda são muito incertas, considerando, como vimos, a composição da atmosfera, os fluxos de carbono e a reação da biomassa terrestre frente ao aumento do CO₂.

Muitos cientistas advogam a idéia de que, se as emissões de gás carbônico continuarem a crescer, haverá sensíveis mudanças climáticas na Terra. Outros são mais cautelosos, limitando-se a dizer que as pesquisas ainda estão em níveis especulativos e alguns não acreditam nesta possibilidade.

Destas emissões, uma parte é absorvida pelo maior reservatório de carbono: os oceanos. Uma outra parte, estima-se que está sendo absorvida pela biomassa terrestre através de um processo ainda em estudo: *o efeito de fertilização das plantas por CO₂*.

Se, realmente, a vegetação terrestre for fertilizada por CO₂, atuará como um absorvedor de uma parte do excedente deste gás na atmosfera e, juntamente com os oceanos, poderá atenuar as possíveis mudanças climáticas. Esta é uma questão que as atuais pesquisas ainda não podem responder, apenas pode-se fazer conjecturas fundamentadas em dados experimentais.

A biomassa florestal tropical neste contexto exerceria importante papel como depósito de uma parte do excesso de CO₂ atmosférico; tanto pelo porte como pela diversidade de espécies vegetais. Mas se, por um lado, a exuberância e a diversidade vegetal levam a biomassa florestal tropical a ser vista como um provável absorvedor de CO₂ excedente, por outro lado, para se determinar se as florestas têm ou não essa função são necessários estudos minuciosos, uma vez que a complexidade dos ecossistemas florestais tropicais nos impede de apresentar respostas imediatas. Então, uma questão se coloca: o que observar nos ecossistemas florestais para podermos afirmar ou não serem estes "missing sink"? Propostas de trabalho de campo neste sentido são tema de trabalho que iremos desenvolver.

Não negligenciando a complexidade do reservatório oceânico, a biomassa continental é menos acessível do que os oceanos à modelagem e à reunião de medidas que possam levar à conclusão ou não que a vegetação terrestre é um depósito do excesso de CO₂ atmosférico (LAMBERT, 1987, p. 784). Em meio a esta discussão, torna-se importante mencionar os *satélites de observação* que podem

ajudar muito na elucidação da problemática do CO₂: Porém, fazer a correspondência das imagens de satélite em relação à densidade superficial do carbono na vegetação e ao desmatamento é um trabalho árduo e detalhado. Por outro lado, não se pode esquecer que grande parte do carbono dos ecossistemas está estocada nos solos vegetais e não na vegetação — exceção dos ecossistemas florestas tropicais, onde a vegetação encerra mais carbono — (HALL e CALLE, 1989, p. 524), escapando à observação visual.

8. Bibliografia

- Aziz Nacib AB'SÁBER (1984), " Ecossistemas Continentais ", *Rama - Relatório da qualidade do meio ambiente* — SEMA, Brasília.
- F. A. BAZZAZ, K. GARBUTT e W. E. WILLIAMS (1985), " The effect of elevated atmospheric CO₂ on plant communities " , *United States Department of Energy — DOE/EV/04329-5*, July 1985.
- Robert A. BERNER e Antônio C. LASAGA (1989), " Modelling the Geochemical Carbon Cycle " , *Scientific American*, vol. 260; nº 3, March 1989.
- Pedro Ivo Soares BRAGA (1979), " Subdivisão fitogeográfica, tipos de vegetação, conservação e inventário florístico da floresta Amazônica " , *Supl. Acta Amazônica*, vol. 9; nº 4.
- William DONN (1978), *Meteorologia*, Editorial Reverte, Barcelona 1978.
- David HALL (1989), " Carbon flows in the biosphere: present and future " , *Journal of the Geological Society*, vol. 146.
- David HALL e Rasillo CALLE (1989), " CO₂ cycling by biomass: global bioproductivity and problems of deforestation " , *Amazônia: Facts, Problems and Solutions*, July-August, 1989, São Paulo.
- Joseph HARARI (1989), *Apostila do curso de Fundamentos de Oceanografia Física*, Instituto de Oceanografia — Universidade de São Paulo.
- R. A. HOUGHTON, R. D. BOONE, J. R. FRUCI, J. E. HOBBIE, J. M. MELILLO, C. A. PALM, B. J. PETERSON, G. R. SHAVER e G. M. WOODWELL (1983), " The flux of carbon from terrestrial ecosystems to the atmosphere in 1980 due to changes in land use: geographic distribution of the global flux " , *Tellus*, vol. 39B.
- Richard A. HOUGHTON e George M. WOODWELL (1989); " Global climatic change " , *Scientific American*, vol. 260; nº 4, April 1989.
- S. B. IDSO, B. A. KIMBALL e M. G. ANDERSON (1989); " Greenhouse warming could magnify positive effects of CO₂ enrichment on plant growth " , *CDIAC Communications*. OAK Ridge, Winter 1989.
- Gérard LAMBERT (1987), " Le gaz carbonique " , *La Recherche*, vol. 189; nº 189, Juin 1987.
- N. MYERS (1989), " The Greenhouse Effect: A tropical forestry response " , *Biomass*, vol. 18.
- Eugene P. ODUM (1985), *Ecologia*, Rio de Janeiro.

- Olivier POSTEL (1986), " *Les prophètes de l'été carbonique* ", *Science et vie*, Août 1986.
- Christopher R. SOMERVILLE e Shauna C. SOMERVILLE (1984), " *Les photosynthèses des plantes* " *La Recherche*, vol. 15; nº 154, Avril 1984.
- H. H. SHUGART, M. ANTONOVSKY, P. G. JARVIS E A. P. SANFORD (1986), " *CO₂, climatic change and forest ecosystems* " , in Bolin, Döös, Warrick e Jäger (ED.), *The Greenhouse Effect climatic change and ecosystems-SCOPE 29*.
- A. T. WILSON (1978), " *Pioneer agriculture explosion and CO₂ levels in the atmosphere* " , *Nature*, nº 5657, May 1978.
- G. M. WOODWELL, J. E. HOBBIÉ, R. A. HOUGHTON, J. M. MELILLO, B. MOORE, B. J. PETERSON e G. R. SHAVER (1983), " *Global Deforestation: Contribution to Atmospheric Carbon Dioxide* " , *Science*, vol. 222, nº 4628, December 1983.
- Steven C. WOFSY, Robert C. HARRISS e Warren A. KAPLAN (1988), " *Carbon dioxide in the atmosphere over the Amazon basin* " *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, NO. D2, February 1988