

Estoque e Estabilidade do Carbono nos Solos da Amazônia Brasileira

Philip M. Fearnside

Estoques de Carbono do Solo

Na década de setenta, o Projeto RADAMBRASIL coletou perfis de solo em aproximadamente 3 mil pontos espalhados (desigualmente) ao longo de Amazônia Brasileira (Brasil, Projeto RADAMBRASIL, 1973-1983). Esses dados foram analisados por Moraes et al. (1995), com ponderação pelas áreas dos diferentes tipos de solo para gerar uma estimativa do estoque de carbono até a profundidade de 1 m sob a vegetação original nos 5×10^6 de km² da Amazônia Legal. O total computado foi de 47 gigatoneladas (GtC) (1 GtC = 1 gigatonelada de carbono, ou 1 bilhão de toneladas), ou média de 94 tC/ha. Com erro padrão igual a 24,5% da média (Cerri et al., 2000, p. 38), é alta a incerteza; haja vista a necessidade de informações mais precisas para a obtenção de estimativas mais confiáveis do estoque regional de carbono no solo (Sombroek et al., 2000).

O carbono do solo não é limitado apenas ao 1 m superficial que foi incluído na estimativa de Moraes et al. (1995). Trumbore et al. (1995) estudaram estoques de carbono do solo até 8 m de profundidade em Paragominas, PA. As camadas entre 1 e 8 m de profundidade contêm 155 tC/ha, ou 152% do estoque, no mesmo local, na faixa de 0 a 1 m de profundidade. Presumindo a mesma proporcionalidade para o resto da região, o solo profundo contém 71 GtC adicionais, assim fazendo com que o total, para o solo até 8 m, seja de 138 GtC, ou 276 tC/ha.

A estabilidade do carbono do solo é crítica para as mudanças que ocorrem quando a floresta é desmatada ou sofre outras perturbações. Estabilidade de carbono afeta seu estoque total (equilíbrio) e também a taxa de mudança (*i.e.*, os estoques nos estados transientes na medida em que se aproxima ao novo equilíbrio). Trumbore et al. (1990) calcularam um estoque de carbono lábil (hidrolisável) do solo de 54 tC/ha, medido nos 60 cm superficiais de um Ultisol (Podzólico) amazônico típico (Trumbore et al., 1990, p. 411) da área de Curuá-Una, Pará (Sombroek, 1966, p. 244). Nesse cálculo foi constatado que a camada de 60 a 150 cm tinha 36 tC/ha adicionais de carbono lábil e 40 tC/ha de carbono refratário. O denominado “refratário” pertence a um “estoque lento” de carbono que, freqüentemente, presume-se não sofrer nenhuma degradação. Porém, esse estoque tem, na realidade, substituição a uma taxa apreciável, até mesmo no solo profundo, o que poderia então representar emissões significativas de carbono por causa do grande tamanho do estoque lento na Amazônia Brasileira. Trumbore et al. (1995, p. 527) calcularam um tempo de substituição < 25 anos para todo o estoque de carbono do solo de 0 a 8 m de profundidade sob pastagem. O aumento de temperatura tem maior efeito na aceleração da liberação de carbono lento que na de carbono lábil (Bellamy et al., 2005). Isso ocorre porque a sensibilidade de taxas de reação a mudanças de temperatura (função Arrhenius) é maior para reagentes com energias de ativação mais altas, ou seja, para os que são menos reativos, ou mais recalcitrantes (Davidson & Janssens, 2006).

Impactos sobre Estoques de Carbono no Solo

Desmatamento

O desmatamento tem fortes influências sobre os estoques de carbono do solo. O aumento da temperatura, quando a terra é desmatada e exposta ao sol, muda o equilíbrio entre a produção e a oxidação de carbono no solo, deslocando o ponto de equilíbrio para baixo devido ao aumento da taxa

de oxidação (Cunningham, 1963; Greenland & Nye, 1959; ver também Sánchez, 1976, p. 164-172). A ação da queimada, em si, gera relativamente pouca oxidação do carbono do solo (Nye & Greenland, 1964; Sánchez, 1976, p. 373). Ao mesmo tempo, as contribuições de carbono do solo mudarão ambos os totais e a sua distribuição com a profundidade. Na floresta o solo recebe contribuições de carbono a partir da decomposição de liteira na superfície, de exsudatos de raízes e da substituição destas (especialmente a morte das finas, menores de 2 mm de diâmetro). Na floresta tropical, as árvores têm a maior parte de suas raízes perto da superfície, mas também existem as que estendem suas raízes até 8 m de profundidade ou mais (Davidson et al., 2004; Nepstad et al., 1994). Cipós podem ter raízes particularmente fundas; em Trombetas, PA, algumas chegam a alcançar 14 m (um fenômeno que é monitorado pois pode afetar a qualidade de minério de bauxita a essa profundidade). Plantas forrageiras (principalmente capim) medidas em Rondônia têm raízes concentradas nos 50 cm superficiais (Fearnside, 1989, p. 47-48), como também as formações lenhosas em áreas desmatadas, cujos sistemas radiculares são bem menos profundos não somente se comparados aos de árvores e florestas primárias, como também aos de florestas secundárias, inclusive aos de árvores usadas como componentes de sistemas agroflorestais (Wiesenmüller et al., 1998). Quando florestas primárias são cortadas e substituídas por formações com sistemas radiculares menos profundos, a introdução de carbono no solo acontece a profundidades onde a substituição de carbono é mais rápida, havendo, conseqüentemente, maiores liberações para a atmosfera (Nepstad et al., 1994). Medidas isotópicas (Nepstad et al., 1994) indicam que o estoque de carbono presente a profundidades abaixo de 60 cm diminui após a conversão de floresta em pastagem devido à existência de uma taxa apreciável de oxidação de carbono nessas profundidades, mesmo sem nenhuma perturbação direta (por exemplo, a aração).

O carbono do solo e seu destino são críticos ao futuro da mudança de clima global (Schultz & Freibauer, 2005). O estoque de 138 GtC até 8 m no solo é quase o dobro das 80 GtC presentes em 1990 na vegetação da Amazônia Legal, sem excluir cerrado e áreas desmatadas, além de raízes e biomassa morta (dados de: Fearnside, 2000, p. 123 & 129; Fearnside, 1997, p. 330 & 343; Fearnside, 2003, p. 58). A inclusão dessas emissões na contabilidade nacional será, portanto, indispensável para que a *Convenção Quadro sobre Mudança de Clima da Organização das Nações Unidas (UNFCCC)* tenha êxito em controlar o efeito estufa por meio de compromissos negociados sob o Protocolo de Quioto. Atualmente, por motivos que em grande parte são artificiais, o solo é omitido nesses compromissos. Tal omissão tem como elemento fulcral a idéia de que as incertezas e as controvérsias científicas são grandes demais para permitir compromissos. As reservas em assumir compromisso, no que concerne aos solos tropicais, estão baseadas em uma tabulação não crítica de uma gama de diferentes resultados publicados, sem considerar, contudo, o fato de que erros conhecidos em métodos de cálculo e em interpretação explicam a maioria dos resultados anômalos (veja revisão em Fearnside & Barbosa, 1998). O *Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC)*, nos inventários nacionais que são compilados sob a UNFCCC, não tem encorajado a inclusão de fluxos de carbono dos solos abaixo de florestas tropicais desmatadas. As instruções para os relatórios afirmam que “não há nenhum consenso científico de que o desmatamento leva a perdas significantes de carbono do solo em florestas tropicais. Esse cálculo é opcional para florestas tropicais” (IPCC/OECD Joint Programme, 1994). As instruções explicam que “Os cálculos básicos permitem, mas não encorajam a estimativa de perda de carbono do solo depois de desmatar florestas tropicais. Há resultados de pesquisa que indicam que a conversão de florestas tropicais em pastagens pode ou não resultar em perda de carbono do solo” (IPCC/OECD Joint Programme, 1994). Tal afirmação está baseada em uma série de estudos, nos quais alguns indicam perdas de carbono do solo (Bushbacher, 1984; Cerri et al., 1991; Fearnside, 1980, 1986) e outros não (Lugo et al., 1986; Keller et al., 1986). Keller et al. (1986), entretanto, afirmam “que corte raso de florestas tropicais não parece liberar carbono do solo” (IPCC/OECD Joint Programme, 1994). No entanto, o estudo em questão não mediu carbono do solo nem tirou conclusões a respeito, mas, ao contrário, mediu emissões líquidas de gás carbônico (CO₂) e de outros gases no solo sob floresta e em área adjacente de corte raso não queimado (sem plantas forrageiras como o capim). Entretanto deve-se observar que emissão de gases não é a mesma coisa que mudanças em estoques de

carbono: a emissão de carbono pode permanecer inalterada, enquanto uma redução da taxa de contribuição para o solo resulta em rebaixamento do estoque de carbono. No caso do estudo de Lugo et al. (1986), um aumento no armazenamento de carbono foi achado em solos sob pastagens em Porto Rico, especialmente em locais mais secos. Se mudanças em carbono do solo são incluídas em um inventário nacional, os cálculos consideram os 30 cm superficiais do solo e uma série de parâmetros para estimar novos estados de equilíbrio após 20 anos (IPCC, 1997, p. 5.44-5.48). O inventário nacional brasileiro indica uma perda média na Região Norte (sete dos nove estados da Amazônia Legal) durante os anos 1990-1994 de 5,9 milhões de tC/ano (Brasil, Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima, Ministério da Ciência e Tecnologia, 2004).

Manejo da pastagem

Manejo de pastagens é fator crítico para os estoques de carbono do solo na Amazônia, já que a pastagem é, indubitavelmente, o uso predominante do solo em áreas desmatadas. Onde as pastagens têm um manejo ideal, em que insumos de fertilizante suprem nutrientes como o fósforo, em que há consorciação de leguminosas e rotação controlada de gado, o estoque de carbono no solo de superfície tende a aumentar, se comparado ao solo sob a floresta original (Choné et al., 1991; Cerri et al., 1991; Neill et al., 1996, Neill & Davidson, 2000). Porém, deveria ser notado que, por várias razões, foram exageradas as reivindicações desses benefícios (veja revisão em Fearnside & Barbosa, 1998).

A compactação do solo sob pastagens frequentemente conduz a conclusões espúrias de que o estoque de carbono do solo esteja aumentando. Quando expostos ao sol e ao pisoteio do gado, os macroporos no solo diminuem, o que aumenta a densidade do solo. Por conseguinte o estoque de carbono em uma determinada faixa de profundidade aumentará, então, até mesmo se a concentração de carbono permanecer constante. O estoque de carbono é calculado multiplicando a concentração (gC/g de solo seco) pela densidade do solo (g/cm³ de solo seco) e pelo volume da camada do solo (cm³). Portanto para uma comparação válida de estoques no solo, antes e depois de desmatamento, é necessário comparar uma massa equivalente (não um volume idêntico) de solo, ou seja, seria comparado o carbono no perfil do solo para uma determinada profundidade sob floresta (digamos 1 m superficial) com o estoque no perfil mais curto que é compactado de 1 m do solo de floresta (veja Fearnside, 1980; Fearnside & Barbosa, 1998).

Apesar de problemas com algumas estimativas, é, não obstante, verdade que um bom manejo de pastagem pode aumentar os estoques de carbono no solo de superfície (até 30 cm de profundidade), tanto se comparado aos estoques em pastagens bem manejadas, como se comparado aos da floresta original (Neill et al., 1996). Entretanto, deve ser lembrado que o carbono nas camadas profundas do solo diminuirá (Nepstad et al., 1994), e que o carbono total do ecossistema (inclusive a biomassa) é muito mais alto em floresta que em pastagem, qualquer que seja o sistema de manejo.

A importância potencial de aumentar os estoques de carbono do solo por meio de manejo melhorado de pastagem sofre sérias restrições, em face da escassez de recursos físicos e financeiros. Tais recursos são insuficientes para manter esses sistemas de manejo nas áreas já desmatadas (que já são maiores que a França), e muito menos seriam para a área da floresta restante se esta fosse convertida em pastagens. Atualmente as jazidas de fosfato são usadas, quase que completamente, para manter a agricultura nas partes sul e central do País. As conhecidas no Brasil (Beisiegel & de Souza, 1986) durariam apenas 81 anos para manter a área atualmente desmatada, no entanto, se a manutenção das pastagens amazônicas fosse receber todo o fosfato do Brasil, a região inteira consumiria essas jazidas em apenas 11 anos. Não obstante o fato de que fosfato pode ser importado do estrangeiro, estima-se, entretanto, que os estoques globais sejam esvaziados dentro do século atual, o que suscita o questionamento se a manutenção da pecuária em vastas áreas de pastagens na Amazônia seria o melhor uso desses escassos recursos (Fearnside, 1998). Há um elevado grau de incerteza quanto aos estoques de fosfato existentes no mundo (Johnston, 2000), embora isso não altere o fato de que esses estoques representam séria limitação para a agricultura e a pecuária em escala global. Embora existam, na

Amazônia, usos da terra com melhor aproveitamento dos nutrientes do solo que as pastagens (*e.g.*, agroflorestas, veja Fearnside, 1995), são estas, hoje, que predominam nas paisagens desmatadas na região e provavelmente vão continuar predominando nas próximas décadas (Alencar et al., 2004).

Mudanças climáticas

É provável que mudanças climáticas resultem em liberações significativas de carbono do solo na Amazônia. O efeito estufa resultará, obviamente, em temperaturas do solo mais altas, mas a quantia do aumento de temperatura na Amazônia varia muito entre os diferentes modelos do clima global. O modelo HadCM3 do Centro Hadley, no Escritório Meteorológico do Reino Unido (UKMO), prediz que o efeito estufa, não mitigado, resultaria em aumento da temperatura em até 6°C na parte ocidental da Amazônia (Cox et al., 2000, 2004). Essas mudanças de temperatura, junto com a diminuição da chuva predita pelos mesmos modelos, resultariam em uma mortandade generalizada da floresta na Amazônia até o ano 2080. Isso reduziria ainda mais os estoques de carbono no solo, além dos efeitos diretos dessa mudança climática.

Se tais resultados estão corretos, a perspectiva é severa para a Floresta Amazônica e para os seus estoques de carbono, além dos impactos acarretados pela perda destes. Não seria demais enfatizar que esses resultados dependem de decisões humanas. Simulações com uma primeira versão do modelo do Centro Hadley indicaram que a catástrofe até 2080 causada por emissões de gases de efeito estufa sem mitigação seria adiada em um século se a concentração atmosférica de CO₂ permanecesse abaixo de 750 ppmv (partes por milhão de volume), ou em mais de dois séculos se a concentração fosse mantida abaixo de 550 ppmv (Arnell et al., 2002). Negociações começaram, pelo menos simbolicamente, em novembro de 2005 com o intuito de estabelecer a concentração de CO₂ que define “interferência perigosa” no sistema climático global, o que é especificado no Artigo 2 da UNFCCC como o objetivo da Convenção (UNFCCC, 1992). É, portanto, de suma importância que o Brasil use seu peso diplomático para pressionar a favor de uma definição de “perigoso” bem abaixo de 550 ppmv de CO₂, haja vista ser a Amazônia o local mais propenso a sofrer alguns dos piores impactos decorrentes do efeito estufa. A União Européia adotou como definição de “perigoso” um aumento máximo de 2°C da temperatura média mundial, em relação à temperatura pré-industrial, o que corresponde a uma concentração máxima de CO₂ de 400 ppmv; a concentração poderia ser estabilizada nesse nível após breve subida para 425 ppmv sem exceder em 20% o risco de ultrapassar o teto de 2°C para o aumento máximo de temperatura (Hare & Meinshausen, 2006).

Townsend et al. (1992) fizeram um dos primeiros modelos, no qual é demonstrada a possibilidade de mudanças climáticas causarem perdas significativas de carbono do solo na Amazônia. No entanto, a temperatura e as mudanças de vegetação previstas pelo modelo do Centro Hadley (Cox et al., 2000, 2004) são muito mais severas do que as mudanças presumidas por Townsend et al. (1992). Aquele indica que o sistema climático se trava, essencialmente, em um “El Niño permanente”, com a conseqüência de rigorosas secas na Amazônia. Entretanto, outros modelos do clima global, nos quais faltavam as mesmas retroalimentações, não indicavam uma catástrofe desse tipo (veja revisão por Nobre, 2001). Porém, estes têm sido atualizados para incluir processos que, antes, eram representados somente no modelo do Centro Hadley. Outrossim a grande maioria dos modelos, hoje, aponta a formação de um “El Niño permanente”, embora sejam divergentes com relação à data para início desse fenômeno. Durante os cinco anos após o lançamento do modelo do Centro Hadley em 2000, vários outros foram testados no Centro de Pesquisa em Tempo e Clima (CPTEC). Contudo, em novembro de 2005, concluiu-se que o modelo Had3CM, proposto pelo Centro Hadley, representa melhor o clima atual na Amazônia, o que corrobora a conclusão de que o cenário catastrófico indicado por esse modelo seja o mais provável (J. Marengo, declaração pública, 2005).

O futuro papel do carbono do solo frente ao efeito estufa é uma preocupação mundial porque a liberação desse carbono representa uma alça de retroalimentação positiva potencial um “efeito estufa fora de controle”. Quanto mais carbono é liberado pelos solos, maior o aumento da temperatura devido

ao efeito estufa, o que conduz a uma maior liberação de carbono do solo. A quantidade liberada seria significativa para o clima mesmo se fosse uma pequena porcentagem dos 1,6-2,0 trilhões de toneladas de carbono existentes nos solos da Terra até 1 m de profundidade (Prentice et al., 2001; Batjes, 1996). Junto com a emissão por morte de vegetação, existe a possibilidade que a população humana não pode lograr êxito na quebra desse ciclo vicioso diminuindo sua própria emissão, haja vista a magnitude da emissão do solo e da vegetação pode exceder as emissões humanas oriundas da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento. As emissões dos solos e vegetação poderiam ser mais que a emissão atual de aproximadamente 8 GtC/ano da queima de combustível fóssil e da fabricação de cimento. Ainda que adicionássemos a isso o desmatamento, para o qual estimativas globais variam de 1,6 GtC/ano para 1980-1989 (Schimel et al., 1996, p. 79; veja revisão em Fearnside, 2001) até 2,4 GtC/ano para 1990 (Fearnside, 2000), poderia não elevar o total antropogênico a esse nível. Portanto, até mesmo a eliminação completa das emissões provocadas pelo homem poderia ser insuficiente para evitar um efeito estufa fora de controle.

Resultados modelados da emissão de carbono do solo indicam trajetórias distintas para diferentes partes do mundo, cenário em que a Amazônia desempenha um papel chave para os resultados globais (Jones et al., 2005). Acoplando o clima simulado pelo modelo do Centro Hadley (HadCM3LC) ao modelo de estoques múltiplos de carbono de solo de Rothamsted (RothC), o mundo inteiro terá um aumento do estoque de, aproximadamente, 25 GtC até o ano 2070 (devido à fertilização das plantas por níveis mais elevadas de CO₂), ocorrendo depois disso uma queda abrupta de 86 GtC até 2100, ou seja, 2,9 GtC/ano. O modelo indica nenhuma ou muito pouca liberação de carbono do solo na Inglaterra, o que poderia significar que os resultados modelados são demasiadamente otimistas dado as perdas de carbono recentemente descobertas decorrentes dos modestos aumentos de temperatura até hoje. A queda do total global do estoque de carbono no solo indicada pelo modelo RothC é o resultado líquido de aumento do estoque de carbono na Sibéria, que é mais que compensado pela drástica diminuição do estoque na Amazônia. Em simulação do modelo RothC em Manaus (AM), constatou-se que a perda até 2100 seria de 14 tC/ha devido ao efeito direto do aumento da temperatura, mais 37 tC/ha devido à diminuição das entradas de matéria orgânica decorrentes dos efeitos de mortalidade, da inibição de fotossíntese pela temperatura alta e pela falta de água sobre a Amazônia Legal, o que representaria 25,5 GtC liberadas ao longo de 30 anos, ou seja, 0,9 GtC/ano. Para fins de comparação, esse resultado é dez vezes o que o Brasil emite atualmente com a queima de combustíveis fósseis.

Portanto, é premente a necessidade de pesquisas intensificadas a fim de quantificar as emissões de carbono do solo sob diferentes cenários climáticos, além da necessidade de ações imediatas que cessem ou até mesmo revertam o efeito estufa em uma escala maior que aquela concordada sob o Protocolo de Quioto.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: Proc. 470765/01-1, 306031/2004-3, 557152/2005-4, 420199/2005-5) e ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA: PPI 1-1005, PRJ05.57), pelo apoio financeiro. A R.I. Barbosa e aos dois *referees*, pelos comentários.