



## *Estudos do solo revelam alterações climáticas da Amazônia*



Depósito de bauxita na Amazônia

*As características dos solos dependem das condições sob as quais eles se formam, como, por exemplo, a natureza da rocha-mãe ou o clima. Este último tem um papel fundamental. Sob um clima bastante seco, a alteração dos minerais das rochas-mães leva à formação de alguns tipos de argilas, como as esmectitas. Sob um clima mais úmido, as argilas formadas são diferentes, como a caulinita. Assim, por suas características morfológicas e mineralógicas, o solo reflete o clima sob o qual se formou. O clima, entretanto, pode ter sofrido variações, com períodos mais secos ou mais úmidos, no decorrer da formação dos solos hoje observados, e algumas características adquiridas durante esses períodos com clima diferente do atual podem ter sido conservadas nos solos até hoje.*

**Yves Lucas**

**François Soubiès**

**Armand Chauvel**

*Instituto Francês de Pesquisa Científica para o Desenvolvimento em Cooperação - Orstom.*

**Thierry Desjardins**

*Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA/Orstom.*



Os solos observados no planeta têm idades muito variadas. Nas zonas montanhosas, ou mais geralmente nas zonas submetidas a movimentos rápidos da crosta terrestre, a erosão mecânica arrasta o solo à medida que ele se forma. Em zonas de sedimentação fluvial ou marinha, os solos não podem ser mais velhos que os sedimentos sobre os quais eles se desenvolvem. Nas zonas temperadas da Europa ou da América do Norte, as geleiras, que ocupavam essas regiões até uma época relativamente recente, eliminaram os solos preexistentes, e os solos atuais, portanto, são relativamente jovens.

Nas zonas úmidas dos velhos escudos estáveis, como o escudo central brasileiro, que inclui uma grande parte da Amazônia, os solos puderam teoricamente evoluir por um longo tempo sem terem sido submetidos a uma submersão pelo mar, a uma erosão mecânica intensa, ou à ação das geleiras. Portanto, esses solos podem apresentar traços herdados dos climas que se sucederam durante sua longa formação.

No caso dos latossolos, que junto com os solos podzólicos são os solos mais comuns da Amazônia, a indicação da idade é dada, em primeiro lugar, pela sua espessura e pela natureza dos minerais que o compõem. Modelagens realizadas a partir das condições atuais de formação indicam um tempo de formação entre 10 e 100 milhões de anos, em função das hipóteses iniciais. Apesar da imprecisão, tais resultados indicam que esses solos são muito antigos: não ocorreram, pelo menos nos últimos 10 milhões de anos, episódios climáticos que permitissem a ablação da cobertura de solos, como geleiras ou desertos quentes (nestes, na ausência de vegetação, há erosão mecânica, principalmente eólica, que leva as partículas finas e só deixa no local os elementos grosseiros).

Sob certas condições, uma cronologia relativa dos diferentes elementos constituintes do solo pode ser feita por análise petrográfica ou química. Nos solos bauxíticos das regiões de Juriti ou de Trombetas (2° S, 57° W), foi possível estabelecer uma sucessão de eventos. Os constituintes mais antigos são materiais endurecidos pelo ferro, chamados couraças ferruginosas, que apresentam características

de rocha-mãe pouco alterada. Posteriormente, formaram-se materiais endurecidos pelo alumínio, chamados bauxitas, nas quais as características da rocha-mãe quase desapareceram. Enfim, esses materiais estão atualmente em vias de substituição por um material argiloso não-consolidado.

Essa sucessão nos dá indicações paleoclimáticas. Observa-se atualmente que as couraças ferruginosas formam-se nas regiões submetidas a um clima tropical contrastado, como na África sudano-guineense. Pode-se supor que o solo evoluiu sob um clima desse tipo no início de sua formação, pelo menos 10 milhões de anos atrás. As bauxitas, entretanto, formam-se sob um clima muito úmido. Como elas

estão agora em fase de substituição por um material argiloso característico do clima atual, pode-se concluir que esses solos evoluíram sob um clima mais úmido durante um tempo longo o suficiente para formar os espessos horizontes bauxíticos, hoje residuais.

No entanto, as extrapolações climáticas a partir dos solos devem manter-se prudentes. As linhas de cascalhos ferruginosos ou quartzosos observadas em profundidade nos solos, por exemplo, foram consideradas, nos anos 60 e 70, como indícios de climas que teriam permitido uma erosão e uma desnudação do solo, seguidas por um recobrimento de materiais não-consolidados. Mas vários estudos detalhados, realizados nos últimos 20 anos, tanto

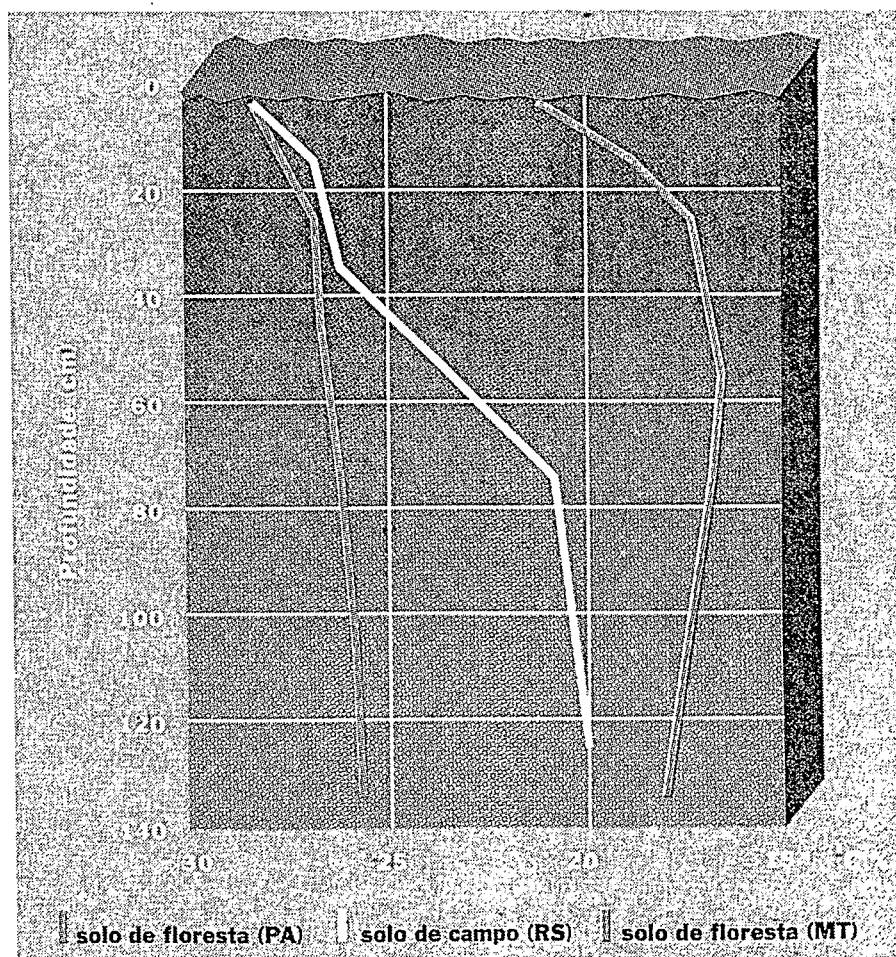


Figura 1. Distribuição do isótopo  $^{13}\text{C}$  do carbono em vários solos brasileiros. Os solos recobertos pela floresta amazônica (A) apresentam geralmente um empobrecimento marcante de  $\delta^{13}\text{C}$  em relação aos solos de regiões recobertas por uma vegetação de campo ou de cerrado (B). Porém, existem solos atualmente recobertos pela floresta amazônica (C) que apresentam, nas camadas mais profundas, valores de  $\delta^{13}\text{C}$  muito parecidos com aqueles encontrados nos solos de campo ou de cerrado. A hipótese mais provável é que esses valores observados em profundidade seriam devidos à persistência de uma matéria orgânica antiga e estável, proveniente de uma vegetação anterior mais rica em  $^{13}\text{C}$  que a atual. Tal vegetação seria provavelmente semelhante à encontrada hoje em campos e cerrados.



**Figura 2.** A observação dos cortes da rodovia Cuiabá-Santarém mostrou que, em uma vasta área ocupada pela floresta, a sudoeste do Pará, os solos encerraram casualmente, numa profundidade pequena e aproximadamente constante, fragmentos de carvões de origem vegetal. Diferentes indícios, principalmente pedológicos e climatológicos, levam a pensar que tais depósitos de carvão surgiram pela queima de uma antiga cobertura vegetal, durante um período mais seco que o atual.

na África como na América do Sul, mostraram que essa interpretação era muitas vezes falsa, já que essas linhas de cascalhos podem formar-se em profundidade nos solos, sem a necessidade de uma fase de aridez e de erosão mecânica.

Na paisagem, os solos são geralmente organizados em sistemas que podem ser entendidos na escala da unidade de relevo. Os solos de platôs ou dos cumes de colinas são diferentes dos solos das vertentes, e esses diferentes dos solos dos baixios. Tais sistemas são ao mesmo tempo a consequência e o motor da formação das paisagens.

Perto de Manaus, foi possível mostrar que o sistema de solos e as formas da paisagem locais são típicos das regiões de florestas tropicais úmidas, comandadas pela erosão química. Se oscilações climáticas recentes ocorreram, com desaparecimento da floresta, essas mudanças não foram intensas ou longas o suficiente para modificar os sistemas de solos de uma maneira significativa ou para induzir a formação de formas de paisagem diferentes.

### *Pistas na matéria orgânica*

Mesmo sem modificar os sistemas de solos de uma forma visível, as oscilações

climáticas recentes podem ter deixado marcas em alguns dos componentes dos solos. Isso acontece, por exemplo, com a matéria orgânica existente nos solos, que provém quase exclusivamente da vegetação que cobriu ou cobre tais solos. Essa matéria orgânica aparece como uma testemunha dos eventos climáticos que ocorreram nos últimos milhares de anos.

As datações da matéria orgânica dos solos, usando o método do carbono 14 radioativo, evidenciam, para a grande maioria desses solos, um crescimento regular da idade da matéria orgânica com a profundidade. Assim, nas camadas mais superficiais, a matéria orgânica é geralmente jovem, entre 50 e 100 anos. A um metro de profundidade, a idade média dessa matéria varia de 3 a 5 mil anos, atingindo de 7 a 10 mil a cerca de dois metros de profundidade. A matéria orgânica humificada e estável das camadas profundas é, portanto, uma testemunha da vegetação que recobriu os solos durante os últimos milênios.

Sabe-se, por outro lado, que o carbono 13 ( $^{13}\text{C}$ ), um isótopo estável do carbono, não aparece com a mesma concentração em todos os vegetais. Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  das espécies vegetais (obtidos, após a combustão das amostras de solo a  $800^\circ\text{C}$ ,

com um espectrômetro de massa) são determinados em relação a um padrão internacional. Tais valores variam em função do ciclo fotossintético das espécies vegetais: as plantas com um ciclo fotossintético  $\text{C}_4$  (no qual o primeiro composto orgânico, formado a partir do  $\text{CO}_2$ , é uma molécula com quatro átomos de carbono, como a grande maioria das gramíneas tropicais, dos campos e dos cerrados) são menos empobrecidas em  $^{13}\text{C}$  do que as plantas com um ciclo fotossintético  $\text{C}_3$  (primeiro composto orgânico, formado a partir do  $\text{CO}_2$ , é uma molécula com três átomos de carbono) e que é encontrado em todas as árvores. Para as primeiras, os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  situam-se entre  $-10\text{‰}$  e  $-20\text{‰}$ , e para as últimas entre  $-22\text{‰}$  e  $-33\text{‰}$ .

A matéria orgânica das camadas superficiais dos solos possui uma relação  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  muito próxima da existente na vegetação de que se origina. Por isso, quando duas coberturas vegetais compostas de vegetais de ciclos fotossintéticos diferentes se sucedem, observam-se, no decorrer do tempo, modificações dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  nas camadas dos solos. Assim, pode-se deduzir que, se no curso dos últimos milênios ocorreram alternâncias de vegetação devidas à ação humana ou a flutuações climáticas, a matéria orgânica antiga das camadas profundas conservou indícios dessas alternâncias.

Atualmente, poucos perfis de distribuição dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  nos solos da Amazônia são disponíveis. Na maioria deles, os valores obtidos nas camadas superficiais do solo estão próximas de  $-28,5\text{‰}$  e, com o aumento da profundidade, observa-se apenas um ligeiro aumento de 2 a 3 unidades, como resultado do fracionamento do carbono durante o processo de decomposição da matéria orgânica e não da ocorrência de um tipo diferente de vegetação. Esse aumento pode mascarar pequenas variações na razão isotópica. Variações maiores (em torno de  $10\text{‰}$  ou mais) provavelmente indicarão que diferentes tipos de vegetação ocuparam aquele solo. A presença de uma vegetação florestal sobre esses solos desde uma época antiga parece então muito provável.

Entretanto, um dos solos de floresta, obtida ao norte de Mato Grosso, apresen-

tou uma distribuição bem diferente nos valores de  $\delta^{13}\text{C}$ . A parte superior do perfil apresenta valores e uma evolução parecidas com as dos solos anteriores, mas a partir de uma profundidade de 30 cm o aumento do valor de  $\delta^{13}\text{C}$  é acentuado, atingindo  $-19,9\text{‰}$  a 1,2 m, resultado parecido com os atualmente observados nas camadas superficiais dos solos de campos e de cerrados. Isso mostra que na Amazônia, sob um mesmo tipo de vegetação, a floresta densa úmida, e sob o mesmo clima atual, tropical úmido, solos parecidos do ponto de vista pedogenético podem apresentar distribuições do isótopo  $^{13}\text{C}$  muito diferentes entre si.

Tais diferenças não podem ser explicadas pelo processo de fracionamento isotópico decorrente da decomposição da matéria orgânica. A hipótese mais provável, portanto, é a de que os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  observados em profundidade, nesse solo do Mato Grosso, seriam decorrentes da presença de uma matéria orgânica antiga, humificada e estável, proveniente de uma vegetação anterior de composição isotópica diferente, mais rica em  $^{13}\text{C}$  que a vegetação atual, e provavelmente parecida à vegetação atual de campos e cerrados.

### *Fósseis de antigos vegetais*

Além da matéria orgânica distribuída nos perfis de solos, o estudo dos carvões encontrados nesses perfis também pode dar informações sobre as mudanças climáticas ocorridas no passado.

Nos anos de 1975 a 1977, o exame atento de 800 km de cortes do terreno, às margens da rodovia Santarém-Cuiabá, que acabava de ser aberta, revelou a presença freqüente, principalmente entre o município de Itaituba, no Pará, e o planalto do Cachimbo, de pedaços de carvão nos horizontes superiores dos latossolos vermelho-amarelos, situados sobre granitos e riolitos encobrendo esta área. De tamanho centimétrico a milimétrico, os fragmentos de carvão concentram-se freqüentemente em profundidades que variam de 50 cm a 1 m, formando uma verdadeira linha, que em geral acompanha as descontinuidades texturais e estruturais dos perfis.

Um exame minucioso desses carvões (através de técnicas como a espectrometria infravermelha, a reflectância e o estu-

do das paredes celulares) mostrou que eram o produto de incêndios de paleocoberturas vegetais, e que tais eventos localizam-se entre 3 e 6 mil anos no passado. Outros traços de paleo-incêndios da floresta amazônica foram identificados depois em diversos setores da bacia.

Tendo em vista que nenhum traço de atividade humana (ferramentas, cerâmica ou outros) está associado a esses indícios do Alto Tapajós, entre Jamanxim e Curuá, o significado deles parece muito provavelmente paleoclimático. No decorrer de um ou vários episódios climáticos mais secos do que o atual, a floresta tropical úmida, insuficientemente abastecida de água, teria sido devastada numa grande extensão por incêndios cuja origem pode ter sido diversa (relâmpagos, ação humana ou outras causas). Uma vegetação de savana instalou-se provavelmente em seguida, temporariamente, conforme indicado por certas características físico-químicas anômalas dos solos desta área.

Essa interpretação paleoclimática das camadas de carvões encontradas nos solos do sul do Pará foi muito reforçada por informações recentemente recolhidas ao curso do estudo dos sedimentos dos lagos da serra sul de Carajás (ver 'Paleoclimas e Geologia', neste número).

O estudo palinológico e sedimentológico realizado por uma equipe franco-brasileira mostrou que, ao longo dos últimos 60 mil anos, ocorreram quatro episódios de forte regressão da floresta amazônica oriental, ligados a episódios climáticos mais secos que o atual. Os fatos importantes são que: 1) a última fase seca registrada em Carajás situa-se entre 7 e 4 mil anos no passado, ou seja, aproximadamente na mesma época em que a floresta incendiou-se no Alto Tapajós; 2) em Carajás, também existem traços de paleo-incêndios nessa época.

Do mesmo modo que os fósseis nos sedimentos, os carvões conservados nos perfis do solo podem constituir marcadores de paleoambientes. Os da estrada Santarém-Cuiabá mostram que a grande floresta amazônica não escapou, provavelmente num passado relativamente recente, dessas catástrofes ecológicas naturais que são os incêndios. Traços de incêndios das coberturas vegetais acham-se nos sedimentos desde o Devoniano e em todas as

latitudes, indicando que eles podem ter desempenhado um papel de grande importância nas modificações das coberturas vegetais passadas e na composição da atual floresta amazônica.

No que diz respeito à Amazônia, o papel dos paleo-incêndios na dinâmica da floresta amazônica ainda permanece pouco conhecido, mas o *Ecofit-Brasil*, um programa de pesquisas franco-brasileiro, lançado recentemente, poderá, num futuro próximo, trazer algumas respostas às indagações dos cientistas.

### **Bibliografia**

- LUCAS, Y. & CHAUVEL, A. "Soil formation in tropically weathered terrains", in: *Handbook of exploration geochemistry* (v. 4, Pegolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains). Elsevier, Butt and Zeeger Rds., 1992, pp. 57-77.
- SANFORD, R.L.; SILDARRIAGA, J.; CLARK, K.E.; UHL, C. & HERRERA, R. "Amazon rain forest fires", in: *Science* nº 227, 1985, pp. 53-55.
- SOUBIÈS, F. "Existence d'une phase sèche en Amazonie brésilienne datée par la présence de charbons dans les sols: 6.000-3.000 ans", in: *B.P. Cahiers, série Géologie*, v. XI-1, Orstom, 1980, pp. 133-148.
- DESJARDINS, T.; VOLKOFF, B.; ANDREUX, F. & CERRI, C. "Distribution du carbone total et de l'isotope  $^{13}\text{C}$  dans les sols ferrallitiques du Brésil", in: *Science du sol*, nº 29/3, 1991, pp. 175-187.