

FLORESTAS

A Amazônia é com frequência lembrada como uma floresta arbórea exuberante e com grande diversidade de vegetais e animais. Em algumas áreas da região, porém, a vegetação é mais parecida com as 'savanas' (ou 'campos') do cerrado do Centro-oeste brasileiro, onde predominam gramíneas e esparsas árvores de baixo porte. Essas vegetações naturais não têm sua origem ou manutenção explicadas por características do solo, nem pela ação do homem. Estudos do solo indicam que as alterações sofridas nos últimos 17 mil anos pelas savanas amazônicas e pelas florestas circundantes estão ligadas a períodos de clima mais seco e de longa duração. Também revelam que, em função das condições climáticas atuais, a área ocupada por esses campos está diminuindo, com a floresta avançando sobre eles.

Hermes Augusto de Freitas

Luiz Carlos Ruiz Pessenda

Centro de Energia Nuclear na Agricultura,
Universidade de São Paulo

Ramon Aravena

Departamento de Ciências da Terra,
Universidade de Waterloo (Canadá)

Susy Eli Marques Gouveia

Centro de Energia Nuclear na Agricultura,
Universidade de São Paulo

Adauto de Souza Ribeiro

Departamento de Biologia,
Universidade Federal de Sergipe

René Boulet

Instituto de Pesquisas
para o Desenvolvimento (IRD, França)
e Instituto de Geociências,
Universidade de São Paulo

A bacia amazônica tem cerca de 7 milhões de km² e é constituída por terras baixas situadas em uma zona equatorial quente e úmida. Essa imensa área é coberta, em sua maior extensão, por uma floresta exuberante, dominada por árvores de grande porte (com até 50 m de altura). Entretanto, a idéia de uma imensa floresta uniforme é falsa: existem na região diferentes tipos de vegetação, e essa heterogeneidade também é constatada na geologia, no clima e nos solos.

As savanas (campos) são áreas com vegetação xeromórfica, ou seja, adaptada a ambientes secos. Nessas áreas são encontradas principalmente plantas herbáceas (como gramíneas e ciperáceas), associadas ou não a árvores pequenas e arbustos (figura 1). Na Amazônia, os campos têm ocorrência minoritá-

X SAVANAS

NO PASSADO A AMAZÔNIA

Figura 1. Aparência das vegetações de savana na área estudada, entre Porto Velho (RO) e Humaitá (AM)



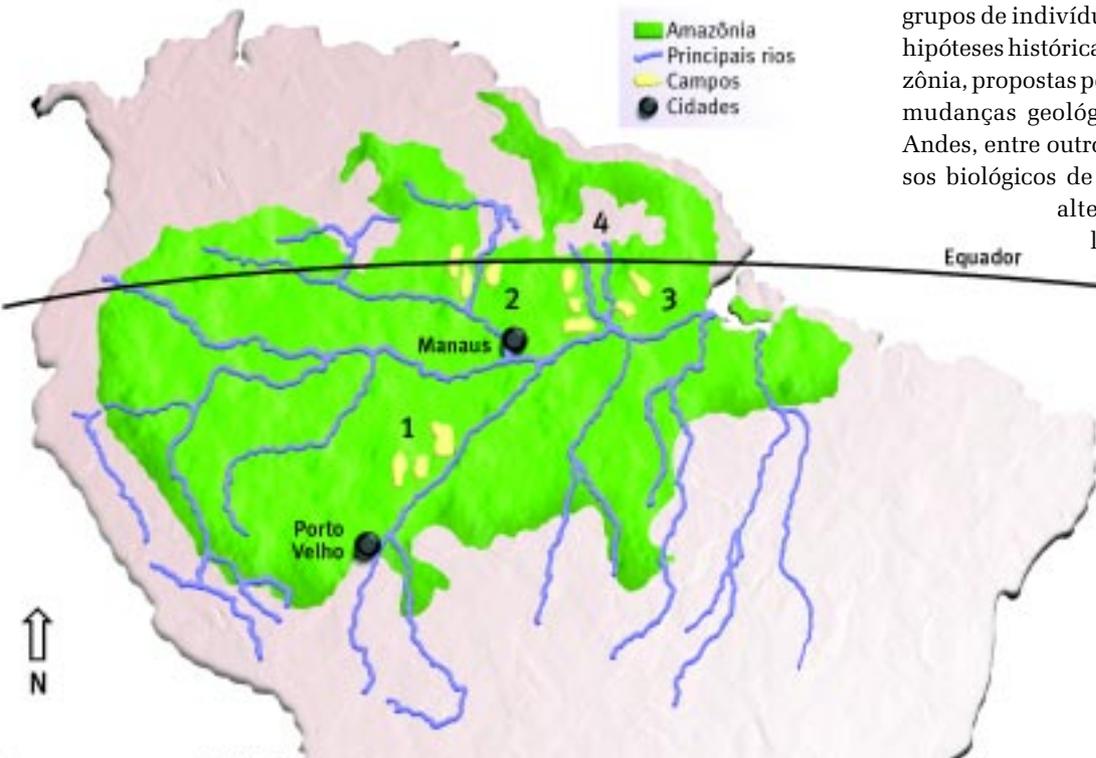
ria (figura 2), mas cobrem áreas extensas, apresentando diferentes padrões de distribuição, desde o tipo ilhas isoladas (como em Humaitá, ao sul do estado do Amazonas) até o tipo contínuo (como os *llanos* do Orenoco, na Venezuela).

Esses campos formam alguns mosaicos com as florestas circundantes. O contato entre essas vegetações (ecótono) ocorre, em alguns locais, de maneira abrupta (figura 3), mas em outros a mudança da vegetação entre a floresta e o campo é gradual.

Para determinar as mudanças de vegetação (campo *versus* floresta) em épocas passadas, o Laboratório de Carbono 14 do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (Cena), da Universidade de São Paulo, localizado em Piracicaba, realizou estudos ao longo da rodovia BR-319, na divisa dos estados de Rondônia e Amazonas. A dinâmica da vegetação pode ser inferida pela variação dos isótopos do elemento químico carbono presentes no solo, a profundidades variáveis, já que os resíduos de diferentes tipos de plantas (incorporados ao solo em épocas sucessivas) contêm teores também diferentes desses isótopos. Esse estudo, tese de mestrado de um dos autores (Freitas) no Cena, em 1999, foi publicado em 2001 na revista *Quaternary Research* (v. 55, p. 39).

Nos estudos, foi possível determinar, para esses resíduos, idades de até 17 mil anos AP. Na datação pelo isótopo ^{14}C , a idade é dada em anos 'antes do presente' (AP), sendo o presente o ano de 1950.

Figura 2. Nos cerca de 6 milhões de km² da Amazônia, que se estendem por Brasil, Peru, Bolívia, Colômbia, Venezuela, Guianas e Suriname, 80% da área é ocupada por floresta arbórea e cerca de 2% por campos encravados em vegetações florestais – dessas áreas de campos, as mais extensas são as de Puciari-Humaitá (1), de Roraima (2) e de Ariramba e Monte Alegre (3), além do chamado cerrado Guianense (4)



Além da datação por ^{14}C , a pesquisa também utilizou a determinação, na matéria orgânica do solo, da relação entre os dois isótopos estáveis do carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), representada pela notação $\delta^{13}\text{C}$. A partir do que se descobriu sobre a dinâmica da vegetação dos últimos 17 mil anos AP, foram sugeridas variações climáticas responsáveis por esses eventos.

DINÂMICA DE VEGETAÇÕES E DIVERSIDADE DE ESPÉCIES

Por muito tempo acreditou-se que o fato de a floresta amazônica ter se mantido estável durante milhões de anos era a explicação para a diversidade de espécies encontradas na região.

Estudos palinológicos (identificação e contagem de pólenes e esporos presentes em sedimento), como os realizados pelos ecólogos norte-americanos Paul Colinvaux (do Laboratório de Biologia Marinha de Woods Hole) e Marc Bush (do Instituto de Tecnologia da Flórida) nos anos 90 (*Science*, v. 274, p. 85), indicam que, mesmo em períodos mais secos, a vegetação de floresta não foi substituída por campos na Amazônia. De acordo com as conclusões desses estudos, a grande diversidade decorreria, pelo menos em parte, de pressões e influências entre os organismos das comunidades biológicas, através de diversos processos ecológicos (como competição e relações de mutualismo). Esse conceito, no entanto, foi modificado nas últimas décadas, com a ampliação do conhecimento sobre a ocorrência na Amazônia de mudanças do clima, e em consequência da vegetação, no período Quaternário (os últimos 1,83 milhão de anos).

O processo de especiação (formação de novas espécies a partir de uma população homogênea) exige longo período de tempo, pois as mudanças que geram grupos de indivíduos diferentes são lentas. Algumas hipóteses históricas a respeito da especiação na Amazônia, propostas por vários autores, argumentam que mudanças geológicas (como o soerguimento dos Andes, entre outros) teriam influenciado os processos biológicos de evolução na região, ao provocar alterações nos seus padrões hidro

lógicos. Esses processos geológicos teriam ocorrido desde o início do período Terciário (há cerca de 65 milhões de anos). É provável, no entanto, que a origem de muitas espécies e os seus padrões de distribuição na região não possam ser entendidos apenas com base nesses processos geológicos.

Simultaneamente às mudanças geológicas, períodos glaciais

e interglaciais alternaram-se em algumas regiões da Terra, modificando a temperatura e o nível dos oceanos. Nos períodos glaciais a quantidade de gelo aumentou nas calotas polares. Isso teria afetado o clima de todo o planeta, principalmente reduzindo a temperatura e a umidade. Segundo essa hipótese, as variações climáticas globais provavelmente levaram a repetidas separações da vegetação – e em consequência da fauna – da Amazônia em ‘refúgios’, como propuseram nos anos 60 o geólogo alemão Jürgen Haffer e o zoólogo brasileiro Paulo Vanzolini. Isso explicaria a origem de muitas espécies e grupos de espécies encontrados atualmente na região neotropical (que abrange do México à Patagônia). Estudos palinológicos e outros realizados por vários autores na Amazônia indicam diminuição da área de floresta em algumas épocas e aumento em outras épocas no passado (ver ‘Paleoclimas na Amazônia’, edição especial, em *CH* n° 93).

A RELAÇÃO ENTRE OS ISÓTOPOS ESTÁVEIS DO CARBONO

Isótopos são átomos com o mesmo número de prótons, mas diferente número de nêutrons – portanto, têm número atômico igual, mas diferem no número de massa. Todos os átomos do carbono (C) têm número atômico 6, ou seja, têm seis prótons. Dois isótopos estáveis (não-radioativos) desse elemento ocorrem na natureza: o de número de massa 12 (^{12}C) e o de número de massa 13 (^{13}C). Já o ^{14}C é um isótopo natural radioativo do carbono. Quase todo o carbono encontrado na natureza (98,89%) está sob a forma de ^{12}C , e o restante está na forma de ^{13}C (1,11%) ou ^{14}C (10^{-10} %).

Devido ao chamado decaimento radioativo (processo natural de diminuição da atividade de um átomo radioativo), a concentração do ^{14}C em materiais que contêm carbono diminui com o decorrer do tempo (nos seres vivos, isso ocorre após a morte). Essa redução da atividade radioativa tem uma taxa constante, permitindo que se faça a datação, ou seja, a determinação da idade de materiais, como fósseis ou restos orgânicos (ver ‘Sob a poeira do tempo’, em *CH* n° 146).

Já a relação entre o ^{13}C e o ^{12}C praticamente não se altera, pois esses isótopos são estáveis. No entanto, a proporção $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ não é idêntica em todos os materiais naturais, em função do chamado ‘fracionamento isotópico’ (aproveitamento seletivo desses isótopos) que ocorre durante processos biológicos, físicos e químicos. Mas a diferença é pequena: nos materiais mais enriquecidos (com maior teor de ^{13}C), a relação entre o ^{13}C e o ^{12}C é cerca de 3% (partes por 100) ou 30‰ (partes por 1.000) maior que nos menos enriquecidos.



Figura 3. O contato entre savana e floresta pode ocorrer de maneira abrupta (como na fotografia) ou a mudança de uma vegetação para a outra pode ser gradual

A proporção $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de um material é calculada em relação a uma proporção-padrão (em geral adota-se a do PDB, molusco fóssil do período Cretáceo encontrado na Carolina do Sul, nos Estados Unidos). Essa relação isotópica é representada pela notação $\delta^{13}\text{C}$ (delta carbono 13). A determinação do valor de $\delta^{13}\text{C}$ é feita em um espectrômetro de massas (que identifica e quantifica os componentes químicos de um material), após queima da amostra (a 900°C e em atmosfera de oxigênio).

FRACIONAMENTO ISOTÓPICO E FOTOSÍNTESE

A variação isotópica do carbono (ou da relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) é pequena em vegetais e na matéria orgânica do solo. Embora durante o ciclo da fotossíntese o fracionamento isotópico seja pouco expressivo, ele permite classificar os vegetais terrestres em três grupos distintos: plantas C_3 , C_4 e CAM.

Os valores típicos de $\delta^{13}\text{C}$ desses diferentes grupos fotossintéticos resultam de propriedades bioquímicas das enzimas de fixação primária do dióxido de carbono (CO_2) e da limitação à difusão desse gás nas folhas. Em plantas com fotossíntese C_3 , o CO_2 é reduzido a fosfoglicerato (cuja molécula tem três átomos de carbono) por uma enzima que discrimina o $^{13}\text{CO}_2$. Isso resulta em valores relativamente mais baixos de $\delta^{13}\text{C}$ nessas plantas. Nas plantas de fotossíntese C_4 , o CO_2 é reduzido a ácido aspártico ou málico (com quatro átomos de carbono nas moléculas) por uma enzima que não discrimina tanto o $^{13}\text{CO}_2$. Isso leva a valores de $\delta^{13}\text{C}$ mais altos (maior teor de ^{13}C) nas plantas C_4 do que nas plantas C_3 .

Análises realizadas com plantas de diferentes ciclos fotossintéticos revelaram que as do tipo C_4 têm valores típicos de $\delta^{13}\text{C}$ entre -9‰ e -16‰, enquanto as do tipo C_3 ficam entre -22‰ e -35‰. Não há, portanto, superposição dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ no caso desses dois grupos fotossintéticos. Já as plantas CAM têm valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -10‰ e -28‰. ▶

As plantas com ciclo fotossintético C_4 (gramíneas e ciperáceas) dominam em regiões de savanas e campos e são mais resistentes a condições mais secas que as vegetações arbóreas de florestas tropicais (com ciclo fotossintético tipo C_3). As plantas C_4 apresentam maior produtividade que as plantas C_3 em temperaturas mais altas e são típicas de vegetações mais abertas (preferem luminosidades mais intensas). Por isso, plantas C_4 têm presença abundante em áreas tropicais e subtropicais e em muitos desertos. Já as plantas com ciclo CAM (orquídeas e cactáceas) mostram maior diversidade e produtividade em ambientes secos, como desertos, ou em locais epifíticos (sobre outras plantas) em florestas tropicais.

SOLO: FORMAÇÃO E MATÉRIA ORGÂNICA

O solo resulta das transformações que a crosta terrestre (rochas e sedimentos) sofre na interação com a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera. É, portanto, um produto do 'intemperismo' – conjunto de alterações de ordem física (desagregação) e química (decomposição) das rochas que afloram à superfície da Terra. Tais alterações, junto com as modificações estruturais ocorridas no solo (pedogênese), levam à formação de um perfil de alteração ou 'perfil de solo'. Esse perfil, disposto em camadas chamadas 'horizontes', tem em sua base a rocha fresca, e sobre

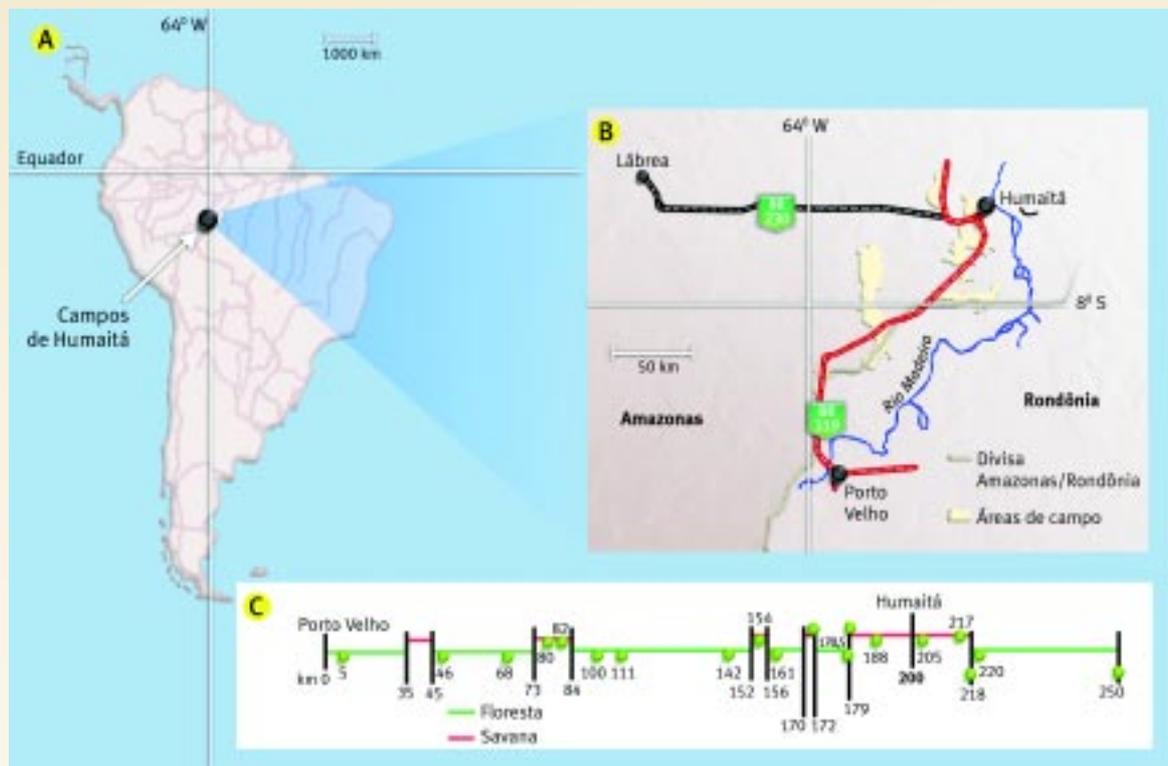
ela formam-se o saprolito (rocha inalterada e rocha levemente intemperizada) e o *solum* (camada com estrutura pedogenética). O saprolito e o *solum* constituem, juntos, o 'manto de alteração'.

Quanto mais afastados da rocha original situam-se os materiais do perfil de solo, mais diferenciados eles são, em relação a ela, em termos de composição, estruturas e texturas. Assim, a camada de solo de formação mais recente é a mais próxima da rocha-base, na parte inferior do perfil. A matéria orgânica presente no solo, por sua vez, é mais antiga nas camadas mais profundas e mais nova na camada superior, pois está sendo depositada continuamente pela fauna e flora que povoam a superfície.

Embora os mecanismos de decomposição da matéria orgânica vegetal no solo sejam bastante complexos, podem ser divididos em dois tipos básicos. Parte desse material é mineralizado, gerando compostos inorgânicos, como gás carbônico (CO_2), metano (CH_4), íon sulfato (SO_4^{2-}), íon nitrato (NO_3^-) e outros, e parte permanece no solo, por períodos variados, como moléculas orgânicas complexas, às vezes fixadas à superfície de (adsorvidas a) componentes inorgânicos (argilas). Esse material orgânico, que se encontra em níveis diversos de decomposição, é chamado de húmus ou matéria orgânica do solo.

Os compostos húmicos são substâncias amorfas, coloidais, com coloração de amarela a marrom/preta e com altas massas moleculares. Podem estar presentes em ambientes terrestres (solos) ou aquáti-

Figura 4. A área estudada fica no sul da Amazônia (A), e as coletas foram realizadas ao longo do traçado da BR-319 (B), que atravessa algumas manchas de campo (em ocre) cercadas por floresta – o esquema (C) mostra a distribuição da vegetação ao longo da estrada e os pontos de coleta (não houve coletas entre os quilômetros 35 e 45 porque o campo estava descaracterizado pela exploração agropecuária)



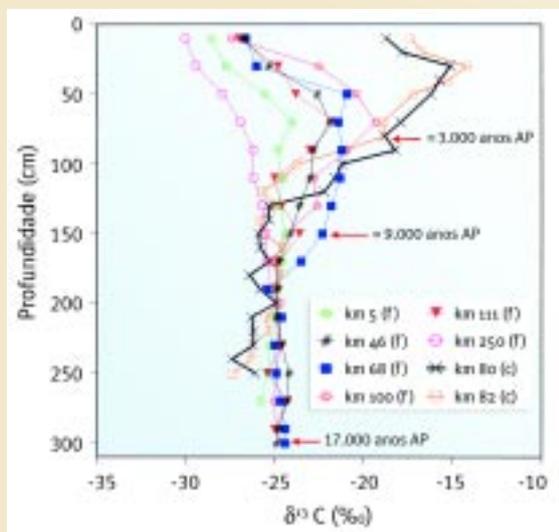


Figura 5. Variação da relação isotópica $\delta^{13}\text{C}$ com a profundidade na matéria orgânica em camadas de solo de vários pontos ao longo da BR 319: a 3 m abaixo da superfície (datação de 17 mil anos AP), o valor de $\delta^{13}\text{C}$ obtido indica que plantas C_3 (floresta) eram dominantes em toda a região; entre 1,5 m (9 mil anos AP) e cerca de 70 cm, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ tornaram-se em geral mais positivos, indicando maior presença de plantas C_4 (savana) nessa camada; de 70 cm até a superfície, nos locais onde hoje há floresta (quilômetros 5, 46, 100 e 111), os valores ficaram gradualmente mais negativos, indicando um avanço da floresta (plantas C_3) sobre a savana, e nos locais onde hoje existe savana (quilômetros 80 e 82), os valores também se tornaram mais negativos de 30 cm até a superfície, indicando um aumento da presença de plantas C_3 nesses locais

cos (rios, lagos, oceanos e seus sedimentos) e ainda como material geológico (lignita, carvão etc.). O material húmico ou matéria orgânica humificada pode ser dividido em grupos de compostos chamados de ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas. A fração humina, que contém os compostos mais estáveis, pode permanecer por milhares de anos no solo e é considerada a mais adequada para a datação da matéria orgânica do solo.

Para determinar a idade da matéria orgânica do solo, amostras desse material, retiradas de diversas profundidades, são submetidas a tratamentos químicos e físicos que permitem obter a fração humina, e em seguida é medida a radioatividade do ^{14}C presente nessa fração (usando-se, entre outros, um equipamento chamado 'cintilador líquido'). Para determinar a relação isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) dessa matéria orgânica, amostras de solo de profundidades variadas, após tratamentos físicos, são analisadas em um espectrômetro de massas.

SOLO PODE REVELAR A VEGETAÇÃO DO PASSADO

Em comunidades vegetais nas quais plantas C_3 e C_4 coexistem (ou coexistiram no passado), os valores de $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica do solo permitem reconstruir a produtividade relativa delas. Esse conhecimento não informa que espécies vegetais estavam presentes, mas as produtividades podem ser correlacionadas com a dinâmica da vegetação e o tipo de ambiente presente no local. Para se determinar o tipo de vegetação (C_3 ou C_4) e a época em que ela ocorreu, associam-se dados de $\delta^{13}\text{C}$ com a datação por ^{14}C da matéria orgânica do solo.

O valor de $\delta^{13}\text{C}$ na matéria orgânica do solo é função do ciclo fotossintético da vegetação que co-

bria a área quando essa matéria foi depositada na superfície. Se o material orgânico do solo tem $\delta^{13}\text{C}$ em torno de -25 ‰, a vegetação que a originou era do tipo C_3 (floresta úmida). Se o valor obtido de $\delta^{13}\text{C}$ ficar em torno de -12 ‰, a vegetação era do tipo C_4 (gramíneas e ciperáceas).

Determinando-se a provável paleovegetação, pode-se inferir paleoclimas. Por exemplo, as separações de vegetações de floresta existentes na Amazônia, de acordo com a hipótese dos refúgios, devem ter ocorrido através da expansão e da regressão dos campos (onde dominam as plantas com ciclo fotossintético C_4) e florestas (plantas com ciclo C_3). Essa dinâmica pode ser associada à ocorrência na região, no passado, de climas mais secos (que favorecem a expansão dos campos) e mais úmidos (que estimulam a expansão das florestas).

O AVANÇO DA FLORESTA SOBRE OS CAMPOS

Nas proximidades da cidade de Humaitá, ao sul do Amazonas, existem algumas áreas denominadas 'campos de Humaitá', formadas por vegetação do tipo savana natural, que se transforma gradualmente em vegetação de floresta (figura 4). Tais áreas estão presentes em toda a região e formam um sistema de vários campos circundados por vegetação de floresta, ocupando uma área estimada em 600 km².

Os dados de $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica do solo, em conjunto com as datações da fração humina do solo (figura 5), sugerem que, no final do Pleistoceno (há cerca de 17 mil anos AP), todos os locais amostrados estavam cobertos predominantemente por floresta (vegetação C_3), indicando a ocorrência de clima úmido o bastante para manter esse tipo de vegetação na região. As amostras de solo foram coletadas em perfis verticais, com ferramenta apropriada, ou em paredes de trincheiras (com cerca de 1 m de largura, 2 m de comprimento e 3 m de profundidade, cavadas nos quilômetros 46 e 188 da BR-319).

Há cerca de 9 mil-8 mil anos AP houve expansão do campo (vegetação C_4) e regressão da floresta (vegetação C_3), possivelmente devido à presença de ▶

Figura 6. Os estudos indicam a seguinte dinâmica para a vegetação da área estudada: de cerca de 17 mil anos AP até em torno de 9 mil anos AP, o predomínio na área era da floresta (A); entre 9 mil anos AP e cerca de 3 mil anos AP ocorreu expansão da savana sobre a floresta, com pelo menos duas grandes manchas – entre os quilômetros 46 e 111 e os quilômetros 142 e 200 (B); mais de 3 mil anos AP até hoje está acontecendo uma expansão da floresta sobre a savana (C)

um clima mais seco e quente que o atual. Essa provável expansão das áreas de campo foi observada até cerca de 30 cm nos solos dos campos atuais e até 70 cm nos das florestas (camadas depositadas há cerca de 3 mil anos AP). Daí até o presente, a floresta iniciou uma expansão sobre os campos, sugerindo mudança para um clima mais úmido, semelhante ao atual.

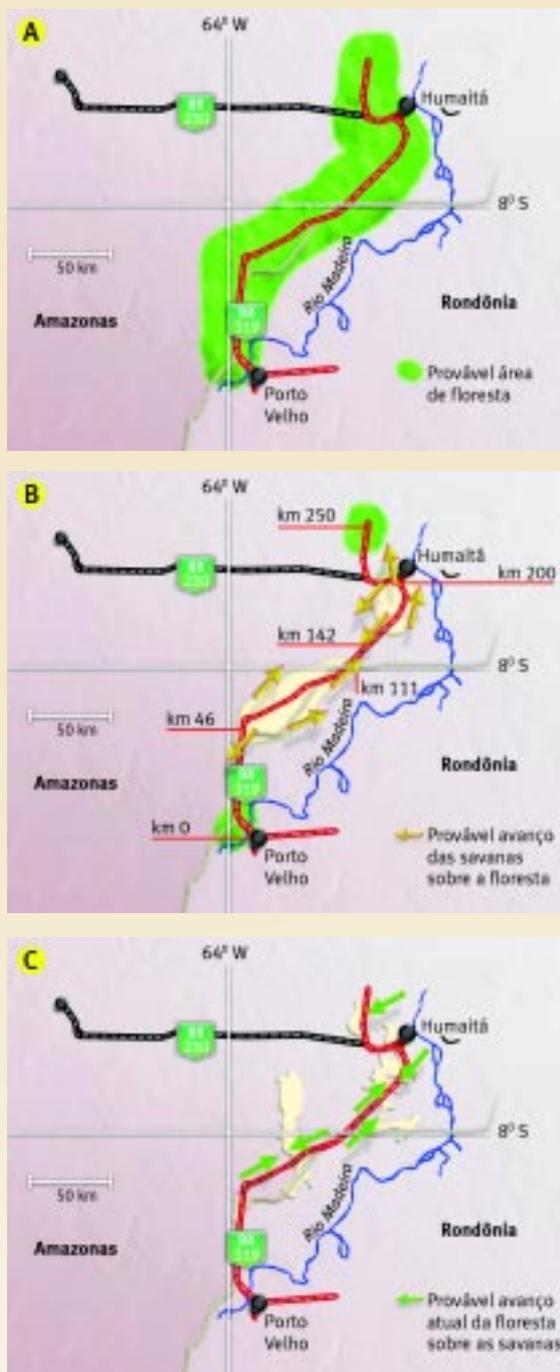
Esses resultados levam à conclusão de que a dinâmica da vegetação, na área e no período estudados, provavelmente foi a seguinte (figura 6): áreas com vegetação C_3 (floresta) ganharam aos poucos ‘manchas’ de vegetação predominantemente C_4 (campo). A nova vegetação expandiu-se, ocupando áreas vizinhas antes cobertas por florestas. A seguir, a floresta avançou de volta sobre o campo, processo que ainda ocorre atualmente.

Substituições de floresta por vegetação de campo foram observadas em outras regiões da Amazônia durante período similar (ver ‘Paleoclimas na Amazônia’, em *CH* n° 93). Em Altamira (PA), na área central da Amazônia, e em Pontes e Lacerda (MT), na área sudoeste da região, não foram detectadas substituições de vegetação nesse período, segundo outro estudo realizado pelo Laboratório de Carbono 14 do Cena. Outras evidências de avanço de área de floresta e redução de áreas de campos, na Amazônia, foram obtidas também em Roraima, em 1996.

Tal dinâmica também pode ter sido influenciada por, entre outros fatores, ações de grupos humanos, pastagem por animais e ocorrência de fogo (ver ‘Os caminhos do fogo na Amazônia’, em *CH* n° 65). Entretanto, como as alterações foram observadas ao longo de toda a faixa de 250 km estudada e os teores de argila e de nutrientes dos solos sob floresta e sob campo também foram muito similares, a hipótese de trocas climáticas fica favorecida. Atualmente observa-se, na região dos campos de Humaitá, um aumento da área destinada à cultura de grãos, como soja. Esse tipo de uso do solo é importante na modificação da tendência natural de avanço de uma vegetação.

A região estudada apresenta duas características que a diferenciam de outras áreas onde foram realizadas pesquisas semelhantes. Uma é a presença de um grande rio (o Madeira) a uma distância de apenas dezenas de quilômetros e a outra é a extensão da área de coleta de amostras (250 km).

Embora áreas periféricas da Amazônia tenham sido apontadas, diversas vezes, como mais sensíveis às mudanças climáticas, em especial por causa da



variação do regime hídrico, muitos estudos admitem a hipótese de que os grandes rios têm uma influência significativa na manutenção de uma vegetação florestal, mesmo em épocas secas. Assim, é provável que os ‘refúgios’ ocorressem em áreas próximas a grandes rios. Os resultados obtidos em alguns pontos de coleta na BR-319 apontam nesse sentido, indicando que neles não houve influência significativa de vegetação C_4 . Nos dois pontos extremos de coleta (nos quilômetros 5 e 250), por exemplo, as análises revelaram predomínio de vegetação C_3 (floresta) em todo o período estudado. ■

Sugestões para leitura

DESJARDINS, T.; FILHO, A.C.; MARIOTTI, A.; CHAUVEL, A. & GIRARDIN, C. ‘Changes of the forest-savanna boundary in Brazilian Amazonia during the Holocene revealed by isotope ratios of organic carbon’, in *Oecologia*, v. 108, p. 749, 1996.

NICOLA, J. ‘Biodiversidade na Amazônia’, *Folha de S. Paulo* (caderno *Mais*, 11 de fevereiro), p. 24, 2001.

PESSENDA, L.C.R.; BOULET, R.; GOMES, B.M.; ARAVENA, R.; GOUVEIA, S.E.M.; RIBEIRO, A.S. & LAMOTTE, M. ‘Origin and dynamics of soil organic matter and vegetation changes during the Holocene in a forest-savanna transition zone, southern Amazonas State, Brazilian Amazon region’, in *The Holocene*, v. 11(2), p. 250, 2001.