



Identificação de mudanças florestais por ^{13}C e ^{15}N dos solos da Chapada do Araripe, Ceará

Luiz A. R. Mendonça¹, Horst Frischkorn², Marlúcia F. Santiago³, Plínio B. de Camargo⁴, José O. G. de Lima⁵ & Josué Mendes Filho³

RESUMO

A matéria orgânica (MO) encontrada no solo pode ser uma ferramenta auxiliar na identificação de uma vegetação remota. Na Floresta Nacional do Araripe e circunvizinhança, na Chapada do Araripe, realizou-se o presente estudo, em que as medidas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ da MO dos solos foram utilizadas para: (i) avaliar os valores atuais desses parâmetros; (ii) analisar a variabilidade natural do $\delta^{13}\text{C}$ no solo de diferentes formações florestais e (iii) indicar o declínio de florestas. Verificou-se que os solos das áreas hoje preservadas e cuja MO na superfície mostra $\delta^{13}\text{C}$ tipo C3, da vegetação atual, e uma mistura C3-C4 em profundidade, correspondem a ecossistemas antropizados no passado por uso agrícola; já os solos que mantiveram o $\delta^{13}\text{C}$ tipo C3 em todo o perfil se referem a ecossistemas antropizados, porém por uso não agrícola. Na caatinga, o perfil do $\delta^{15}\text{N}$ indicou um solo mais mineralizado e com menos MO. As áreas reflorestadas e preservadas apresentaram recuperação da MO.

Palavras-chave: Floresta Nacional do Araripe, caracterização isotópica de solos, ciclo fotossintético, empobrecimento florestal

Identification of forest changes using ^{13}C and ^{15}N of soils of the Araripe Plateau, Ceará

ABSTRACT

The organic matter (OM) of soils can be used as an auxiliary tool for the identification of past vegetation. In the Floresta Nacional do Araripe and its surroundings, on top of the Araripe Plateau, a study was made using measurements of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of soil OM in order to (i) assess present day values for these parameters; (ii) to analyse natural variations of $\delta^{13}\text{C}$ in soils from different formations of forest; (iii) and to indicate forest decline. It was found that soils from (at present) protected areas, the OM of which exhibits C3 type $\delta^{13}\text{C}$ of the present vegetation in surface samples but of the C3-C4 type in depth, correspond to ecosystems anthropized in the past through agriculture. Soils maintaining $\delta^{13}\text{C}$ of the C3 type throughout the entire profile refer to ecosystems anthropized through non-agricultural exploitation. "Caatinga" samples exhibit a $\delta^{15}\text{N}$ profile that indicates a soil more mineralized and with less OM, whereas reforested preserved areas show recovery of OM.

Key words: National Forest of Araripe, isotope soil characterization, photosynthetic cycle, forest decline

¹ Curso de Engenharia Civil/UFC, Campus do Cariri, Av. Tenente Raimundo Rocha S/N, Cidade Universitária, CEP 63000-000, Juazeiro do Norte, CE. Fone: (88) 3572-7200. E-mail: larm@ufc.br

² Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental/UFC, Campus do PICI, CP 6018, CEP 60451-970, Fortaleza, CE. Fone: (85) 3366-9775. Fax: (85) 3366-9627. E-mail: cariri@ufc.br

³ Departamento de Física/UFC. Fone: (85) 3366-9913. Fax: (85) 3366-4138. E-mail: marlucia@fisica.ufc.br

⁴ Laboratório de Ecologia Isotópica/Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Av. Centenário, 303, CEP 13416-000, Piracicaba, SP. Fone: (19) 3429-4068. Fax: (19) 3434-9210. E-mail: pcamargo@cena.usp.br

⁵ Faculdade de Educação de Crateús/UECE, Campus de Crateús, Rua José Furtado s/n, CEP 63700-000, Crateús, CE. Fone: (88) 3691-0822. Fax: (88) 3691-0822. E-mail: ossian@uece.br

INTRODUÇÃO

A matéria orgânica encontrada no solo pode ser uma ferramenta auxiliar na identificação do tipo da vegetação no passado, principalmente através da composição isotópica do carbono e do nitrogênio. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ no perfil refletem a dinâmica da vegetação local e fatores ambientais, como o conteúdo de argila e mineralogia, que influenciam na conservação da matéria orgânica humificada.

O carbono-13 é um bom indicador do tipo de vegetação existente ou que ocorreu em determinada área, pois $\delta^{13}\text{C}$ nas folhas das espécies vegetais varia em função do ciclo fotossintético usado para produzir carboidratos a partir de CO_2 e água. Plantas do ciclo Calvin, ou C3, têm os mais baixos valores de $\delta^{13}\text{C}$; as do ciclo Hatch-Slack, ou C4, os mais altos e as do tipo CAM mostram valores intermediários, razão pela qual o carbono-13 tem sido usado com êxito no estudo da dinâmica da matéria orgânica do solo em diferentes partes do mundo, pois permite determinar o tipo de vegetação que a produziu (Garten et al., 2000; Powers & Schlesinger, 2002; Pessenda et al., 2004; 2008; Zingore et al., 2005; Schwendenmann & Pendall, 2006; Vidotto et al., 2007; Dümig et al., 2008; Piccolo et al., 2008; Amorim et al., 2009).

O ciclo C3 ocorre em aproximadamente 85% das espécies de plantas dominantes em muitos ecossistemas terrestres e nelas $\delta^{13}\text{C}$ varia de -30 a -24‰ (PDB), com média de aproximadamente -27‰ (Vogel, 1993). Vegetações naturais de florestas tropicais, de regiões temperadas e de alta altitude são quase exclusivamente C3.

Nas plantas C4, $\delta^{13}\text{C}$ varia de -16 a -10‰, com média de aproximadamente -12,5‰. Espécies C4 representam menos que 5% nas florestas, mas são dominantes em ecossistemas quentes. Gramíneas do tipo savana e a maioria das plantas cultivadas nos trópicos e na zona temperada, como o milho, a cana-de-açúcar e o sorgo, fixam carbono via C4.

O ciclo fotossintético CAM é encontrado em aproximadamente 10% das plantas e é dominante em ecossistemas de deserto. Para fixar CO_2 , as plantas CAM mudam do ciclo fotossintético C3 durante o dia para o ciclo fotossintético C4 durante a noite. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ neste tipo se estendem em todo o alcance das plantas C3 e C4, mas usualmente são intermediários.

Nas florestas de vegetação tipo C3, o $\delta^{13}\text{C}$ do solo aumenta em profundidade através dos mecanismos descritos a seguir (Friedli et al., 1986; Fischer & Tieszen, 1995; Agren et al., 1996; Schweizer et al., 1999; Ehleringer et al., 2000; Santruckova et al., 2000): (i) discriminação, por microrganismos, durante a respiração; (ii) aporte de CO_2 proveniente da queima de petróleo (efeito Suess); (iii) mistura de carbono recente com carbono de material humificado. Durante o processo de humificação a matéria orgânica na superfície do solo passa por um fracionamento isotópico de até 4‰.

Paleovegetações e mudanças climáticas ocorridas durante o Pleistoceno e o Holoceno nas regiões Sudoeste e Centro-Oeste do Brasil foram estudadas por Gouveia et al. (2002) utilizando o ^{13}C , associado ao ^{14}C , na matéria orgânica do solo e em carvão. Os autores observaram que predominavam plantas C3 do início do Holoceno até 1700 a.C. e detecta-

ram a presença de plantas C4 numa faixa sudoeste, sugerindo que esta área era seca no Holoceno. A mesma mudança climática foi pesquisada no Nordeste brasileiro por Pessenda et al. (2005) usando pólen, carvão e ^{13}C na área de um lago no estado do Maranhão. Verificaram que a seqüência de paleovegetação inferida por pólen confere com a de $\delta^{13}\text{C}$; porém, este último parâmetro revelou um quadro mais detalhado em qualquer época.

Como a matéria orgânica do solo é um grande reservatório de nitrogênio, medidas de $\delta^{15}\text{N}$, associadas a medidas de $\delta^{13}\text{C}$, contribuem para a compreensão da dinâmica da vegetação. Estudos realizados por Gebauer & Schulze (1991) e Bustamante et al. (2004) mostraram que horizontes minerais têm maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ do que horizontes orgânicos; logo, solos de uma mesma área que apresentam variações em $\delta^{15}\text{N}$ podem indicar modificações na vegetação.

No presente trabalho, medidas de $\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica em solos da Chapada do Araripe foram utilizadas: (i) na avaliação das condições ambientais atuais e suas características isotópicas em termos de ^{13}C e ^{15}N ; (ii) na análise da variabilidade natural do $\delta^{13}\text{C}$ no solo em áreas de diferentes tipos de floresta e (iii) como indicadores de ações antrópicas e do tipo de vegetação atual e do passado.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi feito na Floresta Nacional do Araripe (383 km²) e circunvizinhança, na Chapada do Araripe, delimitada pelas coordenadas geográficas 39° 00' – 40° 50' e 7° 10' – 7° 50', extremo Sul do Estado do Ceará (Figura 1), no NE do Brasil. Esta chapada tem aproximadamente 8.000 km² e altitude variando de 700 m, no setor oeste, a 1.000 m, no setor leste (DNPM, 1996). Antes da implantação da Floresta Nacional do Araripe, em 1946, a área foi utilizada para agricultura.

O clima no setor leste da chapada, onde está localizada a floresta, é tropical chuvoso; a temperatura média, a umidade relativa média e a precipitação média anual são, respectivamente, 25 °C, 64% e 1.368 mm, classificado como Aw' (Köppen). O setor oeste apresenta clima quente e semi-árido, com valores anuais respectivos de 23 °C, 55% e 753 mm, classificado como BSw'h' (Köppen) (LAMEPE/ ITEP, 1994).

Os solos da Chapada do Araripe são classificados como Latossolos Vermelho Amarelo, com textura argilosa no setor leste e ligeiro acréscimo no teor de argila com a profundidade em toda a chapada (Jacomine et al., 1986). As formações florestais são dos tipos: (i) floresta úmida, com alta densidade arbórea, elevado porte das árvores e sub-bosque sem gramíneas; (ii) cerrado, com reduzida densidade arbórea e no porte das árvores, com aparecimento de gramíneas e arbustos no sub-bosque; (iii) cerrado, caracterizado por árvores esgalhadas, retorcidas e distantes uma da outra, e presença de gramíneas; (iv) caatinga, com plantas de porte baixo, xerófilas, geralmente espinhosas e com predominância de cipós (Figura 1).

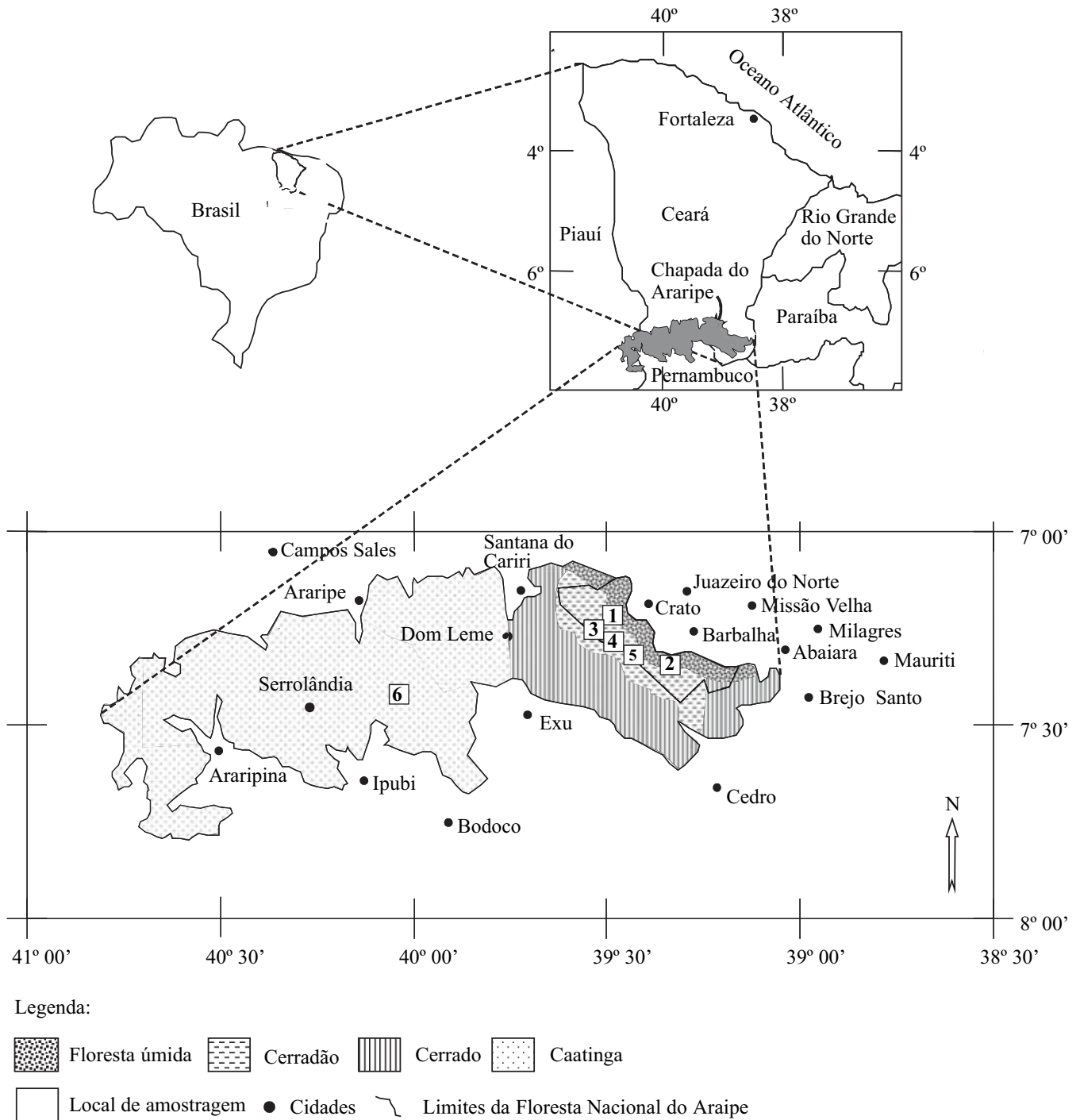


Figura 1. Localização da área de trabalho, formações florestais e locais de amostragem

Amostragem e análises

As amostragens de solos para análise de ¹³C e ¹⁵N foram feitas em quatro diferentes formações florestais: floresta úmida semi-perenifólia (Figura 1, Local 1), transição floresta úmida/cerradão (Local 2), cerradão (Locais 3, 4 e 5) e caatinga (Local 6). As amostragens foram feitas com um tradoespiral, nas profundidades: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80, 80-100, 100-120 e 120-140 cm. Amostras de folhas da vegetação circunvizinha foram coletadas de cada local de amostragem.

O enriquecimento ou empobrecimento das espécies iso-

tópicas ¹³C e ¹⁵N é medido em relação a um padrão e expresso em “delta por mil”:

$$\delta(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padrão}}} - 1 \right) \times 10^3,$$

com R sendo a razão isotópica do carbono (¹³C/¹²C) ou do nitrogênio (¹⁵N/¹⁴N) na amostra e no padrão. O padrão para o carbono é o PDB e para o nitrogênio é o ar atmosférico. A precisão das medidas é de respectivamente ± 0,3‰ e ± 0,5‰, para o ^{δ13}C e o ^{δ15}N.

As medidas de $\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{13}\text{C}$ e a determinação do percentual de carbono orgânico foram realizadas no Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA (Centro de Energia Nuclear na Agricultura) – Piracicaba.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No setor oriental (Locais 1 a 5), o solo possui textura argilosa com percentual médio de argila variando de 38%, no horizonte A, a 43%, no horizonte B, sugerindo proteção física da matéria orgânica do solo pelo alto teor mineral de argila. No setor ocidental (Local 6), o solo apresenta textura média com 15% de argila no horizonte A e 33% no horizonte B.

Encontraram-se, em todos os perfis de sondagem, da superfície à profundidade máxima (1,4 m), pedaços de carvão de tamanho milimétrico. As maiores concentrações de carvão foram verificadas nas áreas de floresta úmida, transição floresta úmida-cerradão e cerradão 2 e as menores nos locais de cerradão 1 e 3 e de caatinga.

A presença de carvão em todas as profundidades dos perfis de solo da Chapada do Araripe indica que a vegetação foi submetida a queimadas, naturais ou causadas pelo homem, após a ocupação da chapada, começando nas áreas de cultivo agrícola e se propagando sem controle para outras áreas.

Folhas de plantas nas vizinhanças de cada local foram amostradas e feitas determinações de $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ cujos valores estão apresentados na Tabela 1. As medidas de $\delta^{13}\text{C}$ mostram um valor médio de $-28,03 \pm 1,55\text{‰}$, com máximo de $-25,66\text{‰}$, para o arbusto “Pau d’óleo” (*Copaifera langsdorfii*), e míni-

mo de $-32,35\text{‰}$, para a árvore de grande porte “Balaio de Velho” (*Vernonia sp.*); esses valores da atual vegetação no topo da chapada são compatíveis com o ciclo fotossintético C3.

Carbono orgânico total

As percentagens de carbono orgânico total na superfície do solo são mais altas nas amostras da floresta úmida, da transição floresta úmida-cerradão e do cerradão 1 e mais baixas no cerradão 2 e 3 e caatinga (Figura 2). O solo da caatinga apresenta os menores valores percentuais de carbono em todas as profundidades. Constata-se diminuição da matéria orgânica no sentido leste-oeste da chapada; esta redução gradativa da matéria orgânica pode estar associada à diminuição da pluviosidade no mesmo sentido (1.368 mm a leste para 720 mm a oeste).

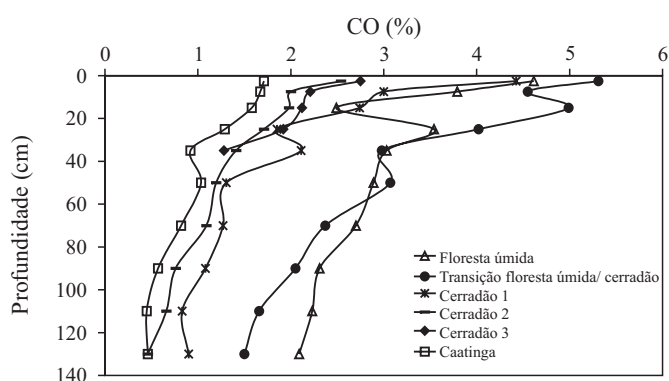


Figura 2. Percentagem de carbono orgânico (CO) total com a profundidade do solo

Em todas as áreas a concentração de carbono orgânico total reduz-se com a profundidade, como é comum devido a interação entre reposição e decomposição do material orgânico. As maiores reduções são observadas nas amostras cerradão 1, na floresta úmida e na transição floresta úmida-cerradão até a profundidade de 35 cm, indicativo de mudanças recentes na cobertura vegetal.

Carbono-13

Como a maioria das áreas amostradas possui solo de textura argilosa, os valores isotópicos em amostras abaixo da superfície são considerados estáveis; por isso, diferentes valores de $\delta^{13}\text{C}$ nas camadas mais profundas indicam a sucessão de diferentes coberturas vegetais no passado.

As mudanças mais significativas nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ ocorreram nos solos de floresta úmida, da transição floresta úmida-cerradão e do cerradão 1 (Figura 3) até a profundidade de 35 cm, indicando alterações recentes na cobertura vegetal que, em um passado recente, passou por uma transformação antrópica, mudando de vegetação do ciclo C4 para vegetação do ciclo C3.

Nos locais cerradão 2 e 3 e na caatinga, o perfil de $\delta^{13}\text{C}$ não apresenta alterações bruscas, indicando ocupação contínua por vegetação do ciclo C3; apenas a caatinga apresenta indícios de vegetações C3 e C4, a partir da profundidade de 1,10 m.

Tabela 1. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ da vegetação arbórea no topo da Chapada do Araripe

Nome comum	Nome científico	$\delta^{13}\text{C}$
Abacateiro	<i>Persea americana Mill</i>	-27,59
Acácia	<i>Senna sp.</i>	-27,33
Amarelo	<i>Platymenia reticulata Benth</i>	-26,56
Araticum	<i>Annona coreacea Mart</i>	-26,85
Balaio de velho	<i>Vernonia sp.</i>	-32,35
Bambural	<i>Hyptis sp.</i>	-29,05
Craiba	<i>Tabebuia caraiba</i>	-28,77
Eucalipto	<i>Eucalyptus sp.</i>	-26,55
Gonçalarão	<i>Astronium fraxifolium Schott.</i>	-28,14
Jatobá	<i>Hymenaea sp.</i>	-28,19
Jurubeba vermelha	<i>Solanum sp.</i>	-27,25
Mangueira	<i>Mangifera indica L.</i>	-26,98
Maracujá	<i>Passiflora sp.</i>	-27,19
Murici	<i>Byrsonima spp.</i>	-30,62
Papo de Urubu	<i>Aristolochia sp.</i>	-29,80
Pau d’óleo	<i>Copaifera sp.</i>	-25,66
Piquizeiro	<i>Caryocar coriaceum Wittm.</i>	-27,44
Piquizeiro	<i>Caryocar coriaceum Wittm.</i>	-26,35
Pitombeira	<i>Talisia esculenta Radlk</i>	-28,53
Timbaúba	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	-27,53
Visgueiro	<i>Parkia platycephala Benth</i>	-29,13
Visgueiro	<i>Parkia platycephala Benth</i>	-28,85
Média		$-28,03 \pm 1,55$

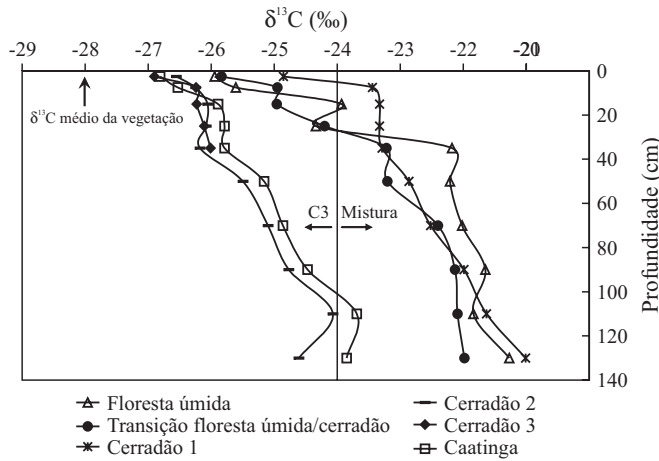


Figura 3. Variação de $\delta^{13}C$ com a profundidade do solo

A relação entre $\delta^{13}C$ e C (%), em escala logarítmica, é apresentada na Figura 4, que identifica o tipo de formação florestal verificado na área. Na Tabela 2 são apresentados os coeficientes angulares das retas correspondentes a cada tipo de vegetação.

Os maiores coeficientes angulares correspondem às áreas de floresta úmida e de transição floresta úmida-cerradão, locais onde houve mudança na vegetação após a implantação da Floresta Nacional do Araripe. Valores mais negativos de inclinação já foram identificados por Garten et al. (2000) como indicativo de mudança rápida no carbono do solo, o que ocorreu nessas áreas.

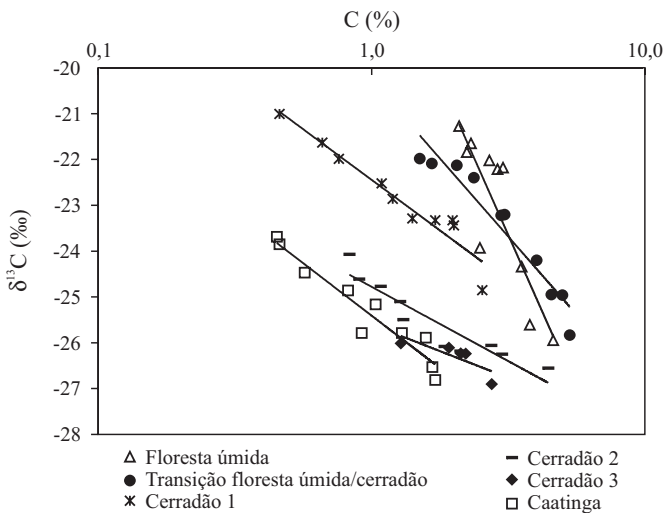


Figura 4. Variação de $\delta^{13}C$ com o logaritmo da concentração de C

Tabela 2. Correlações $\ln[C(\%)] \times \delta^{13}C$ (‰) obtidas para amostras de solos em diferentes formações florestais

Formação florestal	Equação da reta	r
Floresta úmida	$\delta^{13}C = -5,84 \ln[C(\%)] - 16,93$	0,87
Floresta úmida-cerradão	$\delta^{13}C = -2,96 \ln[C(\%)] - 20,27$	0,96
Cerradão 1	$\delta^{13}C = -1,92 \ln[C(\%)] - 22,45$	0,96
Cerradão 2	$\delta^{13}C = -1,41 \ln[C(\%)] - 24,78$	0,94
Cerradão 3	$\delta^{13}C = -1,01 \ln[C(\%)] - 25,60$	0,81
Caatinga	$\delta^{13}C = -1,99 \ln[C(\%)] - 25,41$	0,96

Nitrogênio-15

Os solos de floresta e do cerrado no setor oriental apresentam os menores valores de $\delta^{15}N$ (Figura 5) associados à maior quantidade de matéria orgânica (Figura 2). No setor ocidental, onde predomina a caatinga, a superfície do solo apresenta menor conteúdo de matéria orgânica e os maiores valores de $\delta^{15}N$, indício de mineralização. O nitrogênio mineralizado da matéria orgânica do solo tem origem no nitrogênio orgânico dos detritos das plantas e nos produtos de microrganismos.

Segundo Nadelhoffer & Fry (1994), somente uma pequena fração do nitrogênio orgânico total, geralmente menor que 2% por ano, é mineralizado via decomposição mediada por microrganismos. Os autores observaram que, em geral, ecossistemas transformados são tipicamente mais enriquecidos em ^{15}N que as florestas. O solo da caatinga apresenta característica de declínio na vegetação que o enriquece em ^{15}N mais do que nas camadas de elevada matéria orgânica produzida no solo de floresta e cerrado.

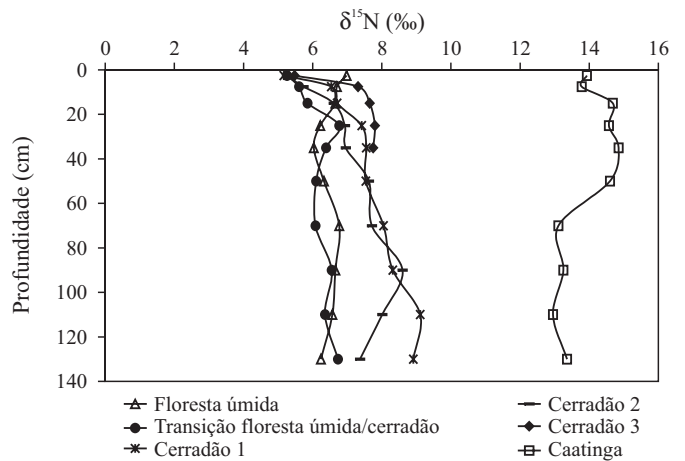


Figura 5. $\delta^{15}N$ com a profundidade do solo

CONCLUSÕES

1. Os valores de $\delta^{13}C$ do material orgânico dos solos em áreas com tipos diferentes de floresta se distinguem.
2. Mudanças no $\delta^{13}C$ com a profundidade indicam mudanças da vegetação no tempo, sejam elas por ações antrópicas ou naturais.
3. Os isótopos ambientais ^{13}C e ^{15}N são bons marcadores do tipo de vegetação atual e do passado e indicadores de declínio de florestas.

AGRADECIMENTOS

Ao IBAMA/Crato, na pessoa de Francisco Wiliam Brito Bezerra, e à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH/Crato), na pessoa de José Yarley de Brito, pelo apoio logístico; à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo suporte financeiro.

LITERATURA CITADA

- Agren, G. I.; Bosatta, E.; Balesdent, J. Isotope discrimination during decomposition of organic matter: a theoretical analysis. *Soil Science Society of America Journal*, v.60, p.1121-1126, 1996.
- Amorim, M. A.; Turcq, P. F. M.; Turcq, B. J.; Cordeiro, R. C. Origem e dinâmica da deposição dos sedimentos superficiais na Várzea do Lago Grande de Curuai, Pará, Brasil. *Acta Amazônica*, v.39, n.1, p.165-172, 2009.
- Bustamante, M. M. C.; Martinelli, L. A.; Silva, D. A.; Camargo, P. B.; Klink, C. A.; Domingues, T. F.; Santos, R. V. ^{15}N natural abundance in woody plants and soils of central Brazilian savannas (cerrado). *Ecological Applications*, v.14, n.4, p.S200-S213, 2004.
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto avaliação hidrogeológica da bacia sedimentar do Araripe. Recife: DNPM, 1996. 103p.
- Dümig, A.; Schad, P.; Rumpel, C.; Dignac, M. F.; Kögel-Knabner, I. Araucaria forest expansion on grassland in the southern Brazilian highlands as revealed by ^{14}C and $\delta^{13}\text{C}$ studies. *Geoderma*, v.145, p.143-157, 2008.
- Ehleringer, J. R.; Buchmann, N.; Flanagan, L. B. Carbon isotope ratios in belowground carbon cycle processes. *Ecological Applications*, v.10, p.412-422, 2000.
- Fischer, J. C. von; Tieszen, L. L. Carbon isotope characterization of vegetation and soil organic matter in subtropical forests in Luquillo, Puerto Rico. *Biotropica*, v.27, p.138-148, 1995.
- Friedli, H.; Lotscher, H.; Oeschger, H.; Siegenthaler, U.; Stauffer, B. Ice core record of the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric composition in the past two centuries. *Nature*, v.324, p.237-238, 1986.
- Garten, C. T.; Cooper, L. W.; Post, W. M.; Hanson, P. J. Climate controls on forest soil C isotope ratios in the southern Appalachian mountains. *Ecology*, v.81, p.1108-1119, 2000.
- Gebauer, G.; Schulze, E. D. Carbon and nitrogen isotope ratios in different compartments of a healthy and declining *Picea abies* forest in the Fichtelgebirge, NE Bavaria. *Oecologia*, v.87, p.198-207, 1991.
- Gouveia, S. E. M.; Pessenda, L. C. R.; Aravena, R.; Boulet, R.; Scheel-Ybert, R.; Bendassoli, J. A.; Ribeiro, A. S.; Freitas, H. A. Carbon isotopes in charcoal and soils in studies of paleovegetation and climate changes during the late Pleistocene and the Holocene in the southeast and centerwest regions of Brazil. *Global and Planetary Changes*, v.33, p.95-106, 2002.
- Jacomine, P. K. T.; Cavalcanti, A. C.; Pessoa, S. C. P.; Burgos, N.; Melo Filho, H. F. R.; Lopes, O. F.; Medeiros, L. A. R. L. Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado do Piauí. Convênio MA/DNPEA – SUDENE/DRN. Recife: SUDENE, 1986. Boletim Técnico, 36.
- LAMEPE/ITEP – Laboratório de Meteorologia/Instituto Tecnológico de Pernambuco. Dados climatológicos da estação experimental de Araripina. Recife: IPA, 1994. 137p.
- Nadelhoffer, K. J.; Fry, B. Nitrogen isotope studies in forest ecosystems. In: Lajtha, K.; Michener, R. H. (ed.). *Stable isotopes in ecology and environmental science*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1994. 137p.
- Pessenda, L. C. R.; Gouveia, S. E. M.; Ledru, M. P.; Aravena, R.; Branco, F. S. R.; Bendassoli, J. A.; Ribeiro, A. S.; Saia, S. E. M. G.; Sifeddine, A.; Menor, E. A.; Oliveira, S. M. B.; Cordeiro, R. C.; Freitas, A. M. M.; Boulet, R.; Filizola, H. F. Interdisciplinary paleovegetation study in the Fernando de Noronha Island (Pernambuco State), Northeastern Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, v.80, n.4, p.677-691, 2008.
- Pessenda, L. C. R.; Ledru, M. P.; Gouveia, S. E. M.; Aravena, R.; Ribeiro, A. S.; Bendassoli, J. A.; Boulet, R. Holocene palaeo-environmental reconstruction in northeastern Brazil inferred from pollen, charcoal and carbon isotope records. *The Holocene*, v.15, n.6, p.814-822, 2005.
- Pessenda, L. C. R.; Ribeiro, A. S.; Gouveia, S. E. M.; Aravena, R.; Boulet, R.; Bendassoli, J. A. Vegetation dynamics during the Late Pleistocene in the Barreirinhas region, Maranhão state, northeastern Brazil, based on carbon isotopes in soil organic matter. *Quaternary Research*, v.62, p.183-193, 2004.
- Piccolo, G. A.; Andriulo, A. E.; Mary, B. Changes in soil organic matter under different land management in Misiones province (Argentina). *Scientia Agricola*, v.65, n.3, p.290-297, 2008.
- Powers, J. S.; Schlesinger, W. H. Geographic and vertical patterns of stable carbon isotopes in tropical rain forest soils of Costa Rica. *Geoderma*, v.109, p.141-160, 2002.
- Santruckova, H.; Bird, M. I.; Lloyd, J. Microbial processes and carbon-isotope fractionation in tropical and temperate grassland soils. *Functional Ecology*, v.14, p.108-114, 2000.
- Schweizer, M.; Fear, J.; Cadisch, G. Isotopic (^{13}C) fractionation during plant residue decomposition and its implications for soil organic matter studies. *Rapid Communication Mass Spectrometry*, v.13, p.1284-1290, 1999.
- Schwendenmann, L.; Pendall, E. Effects of forest conversion into grassland on soil aggregate structure and carbon storage in Panama: evidence from soil carbon fractionation and stable isotopes. *Plant and Soil*, v.288, p.217-232, 2006.
- Vidotto, E.; Pessenda, L. C. R.; Ribeiro, A. S.; Freitas, H. A.; Bendassoli, J. A. Dinâmica do ecótono floresta-campo no sul do estado do Amazonas no Holoceno, através de estudos isotópicos e fitossociológicos. *Acta Amazônica*, v.37, n.3, p.385-400, 2007.
- Vogel, J. C. Variability of carbon isotope fractionation during photosynthesis. In: Ehleringer, J. R.; Hall, A. E.; Farquhar, G. D. (ed.). *Stable isotopes and plant carbon – Water relations*. San Diego: Academic Press, 1993. p.29-38.
- Zingore, S.; Manyame, C.; Nyamugafata, P.; Giller, K. E. Long-term changes in organic matter of woodland soils cleared for arable cropping in Zimbabwe. *European Journal of Soil Science*, v.56, p.727-736, 2005.