

SEÇÃO V - GÊNESE, MORFOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

EVOLUÇÃO QUANTITATIVA DE PLANOSSOLOS DO AGRESTE DO ESTADO DE PERNAMBUCO⁽¹⁾

Roberto da Boa Viagem Parahyba⁽²⁾, Mauro Carneiro dos Santos⁽³⁾ & Fernando Cartaxo Rolim Neto⁽⁴⁾

RESUMO

A pedogênese dos solos planossólicos, especialmente da região do Agreste de Pernambuco, tem sido pouco estudada, havendo indicações e dúvidas relativas a alguns aspectos como a possível dualidade ou retrabalhamentos diferenciados na formação do material de origem, total das perdas e ganhos e a relativa mobilidade dos principais elementos constitutivos durante a evolução dos solos. Foram estudados três solos com marcantes contrastes texturais em uma topossequência da região. Foram estudados três solos com marcantes contrastes texturais em uma topossequência no Agreste de Pernambuco. Os objetivos da pesquisa foram averiguar a compatibilidade dos solos com os materiais geológicos subjacentes e avaliar quantitativamente as perdas e os ganhos ocorridos durante a pedogênese. Para isso foram realizadas análises química total e de zircônio (Zr) e quartzo, tomados como base para determinação de um índice de intemperização, em todos os horizontes dos solos e no material de origem. Verificou-se que os solos são constituídos por materiais autóctones, com apenas pequenas indicações de retrabalhamento dos materiais mais superficiais. Durante o processo de intemperização ou pedogênese, verificou-se perda de, aproximadamente, 50 % do peso original do solo. As perdas referentes aos principais elementos constituintes dos solos apresentaram a seguinte ordem: $MgO > CaO > Fe_2O_3 > Al_2O_3 > SiO_2$. Os nítidos contrastes texturais, devido à argilização dos horizontes Bt, parecem ser principalmente resultado de uma combinação de outros processos, que não simples eluviação-iluviação.

Termos de indexação: B plânico, pedogênese quantitativa, índices de intemperização, zircônio, quartzo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor. Recebido para publicação em agosto de 2008 e aprovado em maio de 2009.

⁽²⁾ Pesquisador da Unidade de Execução de Pesquisa do Recife, Centro Nacional de Pesquisa de Solos – EMBRAPA. Rua Antônio Falcão 402, Boa Viagem, CEP 51020-240 Recife (PE). E-mail: parahyba@uep.cnps.embrapa.br

⁽³⁾ Professor Adjunto aposentado, Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. Rua Dom Manoel de Medeiros s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900 Recife (PE). E-mail: mcs@terra.com.br

⁽⁴⁾ Professor Adjunto, Departamento de Tecnologia Rural, UFRPE. E-mail: fcartaxo@dtr.ufrpe.br

SUMMARY: QUANTITATIVE EVOLUTION OF PLANOSOLS FROM THE AGRESTE REGION OF PERNAMBUCO STATE, BRAZIL

The pedogenesis of Planosolic soils, especially of the semi-arid "Agreste" region of Pernambuco State, Brazil, has not been properly studied. There are indications and doubts with regard to some aspects such as possible duality or differentiated reworked parent material, total of gains and losses and the relative mobility of the main constituent elements during soil evolution. Three soils with strong texture contrast were studied in a topossequence of the region. Three soils with a strong textural contrast on a topossequence in the Agreste region of the State of Pernambuco, Brazil were studied. The main objectives of the study were to investigate the compatibility of the soils with the underlying geological material and to quantitatively evaluate losses and gains in the soils during pedogenesis. Total chemical analysis, as well as the determination of zirconium and quartz contents were performed for all horizons and parent material to determine a weathering index. It was concluded that the soils were autochthonous with minor indications of surface reworked material. During the weathering process, approximately 50 % of the original soil weight was lost. The mobility of the main elemental constituents decreased as follows: $MgO > CaO > Fe_2O_3 > Al_2O_3 > SiO_2$. The sharp textural contrasts between the A and B horizons were not only due to clay eluviation-illuviation (lessivage), but rather a result of other weathering processes.

Index terms: B planic, quantitative pedogenesis, weathering indices, zirconium, quartz.

INTRODUÇÃO

Os Planossolos que ocorrem na região Agreste de Pernambuco apresentam importância econômica fundamental, tanto pela sua magnitude de ocupação, compreendendo aproximadamente 5.743,20 km² ou 5,78 % do total da área do Estado, quanto pela sua utilização intensiva, especialmente com atividades agropecuárias (Silva et al., 2001).

Identificou-se, por meio de caracterizações macromorfológicas, físicas, químicas, mineralógicas e, especialmente, micromorfológicas, o caráter autóctone dos materiais de origem dos três perfis de solos coletados ao longo de uma topossequência (Parahyba, 1993). Esse autor também constatou que as marcantes diferenciações texturais, típicas destes solos, são mais uma consequência do processo de intemperização de biotitas, com formação "*in situ*" de argilas, associado a perdas superficiais de argila por dissolução e movimentações laterais, do que dos processos de eluviação e iluviação, como é mais comumente aceito.

Os estudos pedogenéticos, baseados em resultados analíticos e observações morfológicas, muitas vezes, fornecem fortes indícios da compatibilidade ou não dos solos com os supostos materiais de origem e, por vezes, permitem a identificação de muitos processos operantes. Dados mais confiáveis são obtidos quando se estabelece, com o maior grau de segurança possível, a natureza dos materiais de origem dos solos e, especialmente, quando se obtém quantitativamente o balanço de perdas e ganhos durante a pedogênese (Michelon, 2006).

O estudo da gênese do solo a partir da determinação do grau de intemperismo durante sua formação envolve a comparação do *solum* com o seu material de origem (Barshad, 1964; Chadwick et al., 1990).

Marshall (1940) e Marshall & Haseman (1942) propuseram um método para avaliar alterações, especialmente ganhos e perdas, que podem ocorrer durante o desenvolvimento de um solo, usando elementos químicos que ocorrem em minerais resistentes ao intemperismo. Tais elementos constituem índices de intemperização, cujo uso, especialmente a razão entre dois deles, proporciona um meio de estabelecer a uniformidade original dos materiais. Esse critério tem se mostrado eficaz para separar as alterações devidas à estratificação daquelas produzidas unicamente por processos pedogenéticos (Reaside, 1959).

Baseado nesses elementos, com a assunção de que são verdadeiramente resistentes, é possível reconstituir quantitativamente as perdas e ganhos ocorridos durante a pedogênese. Diversos componentes têm sido utilizados, sendo os mais comuns o zircônio (Zr), quartzo, Ti e os constituintes de um resíduo obtido após ataque do solo com três ácidos fortes (HCl, HNO₃ e H₂SO₄) em temperaturas elevadas (Evans & Adams, 1975). Melhores resultados foram obtidos com a utilização de quartzo e Zr, como constatado por diversos autores, dentre os quais Sudom & St. Arnaud (1971), Evans (1982), Santos (1984) e Luz et al. (1992).

O método mostrou-se eficaz na intemperização pedogenética de solos do semiárido nordestino, como constatado por Luz et al. (1992), e do Agreste de Pernambuco, com verificado por Rolim Neto & Santos (1994). Outros métodos quantitativos que utilizam o Ti e o Zr como minerais resistentes em estudos de intemperismo são descritos em trabalhos de Brimhall & Dietrich (1987), Brimhall et al. (1991a,b) e White (1995). Para Michelin (2006), o emprego do Ti pareceu ser o mais adequado como elemento índice no estudo realizado em seis perfis solos de distintos, no que diz respeito ao balanço geoquímico.

Neste trabalho, utilizando os resultados da análise química total dos principais elementos constituintes dos solos e aplicando Zr e quartzo como índices de intemperização, procurou-se averiguar a compatibilidade dos solos com o material geológico subjacente e avaliar, quantitativamente, as perdas e ganhos ocorridos durante a pedogênese.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram abertas três trincheiras para a descrição dos perfis e coleta de amostras de solos classificados como Planossolos, em área localizada no Sítio Ipueiras, que fica no município de São Caetano, a 18,6 km do entrocamento (viaduto) da PE – 232 com a BR – 423, que dá acesso ao município de Cachoeirinha, na região do Agreste do Estado de Pernambuco. Essa região é caracterizada por clima semiárido, muito quente; segundo Köppen corresponde a um domínio de BSs'h' (Brasil, 1973). A estação chuvosa adianta-se para outubro, antes do inverno. A temperatura média anual varia de 22 a 24 °C. A precipitação pluvial média anual predominante na área varia de 600 a 800 mm, com cinco a oito meses secos, além de irregularidades de chuvas (Brasil, 1973).

A região do Agreste está situada no Planalto da Borborema, que constitui o mais elevado bloco contínuo do Nordeste brasileiro, apresentando uma parte com predomínio de relevo suave ondulado, com altitudes de 300 a 600 m. Outra parte da região, que possui relevo ondulado a forte ondulado, conhecida como “Brejos”, são serras de clima úmido, com altitudes compreendidas entre 650 e 1000 m.

A cobertura vegetal do Agreste apresenta predomínio de caatinga hipoxerófila (Brasil, 1973). O substrato geológico é constituído por rochas do cristalino do período do Pré-Cambriano, formado predominantemente pelo Complexo Migmatítico-granitoide (Lins, 1989). Especificamente, no local de coleta dos perfis de solos, o substrato geológico é constituído por rocha biotita gnaisse. Os três perfis de solos ocuparam diferentes posições na toposequência de uma encosta longa, com declividade média de 8 %, com as seguintes coordenadas geográficas: perfil 1: 24L UTM – 806827 e 9064135; perfil 2: 24L UTM – 0806810 e 9064091; e perfil 3: 24L UTM - 0806779 e 9064010. A altitude média aproximada é de 557 m.

Amostras deformadas de todos os horizontes foram coletadas para as análises químicas. Os perfis de solos foram descritos de acordo com Santos et al. (2005), com a nomenclatura de horizontes segundo as normas da Embrapa (1988). As análises química total e de Zr foram realizadas por meio da técnica de fluorescência de raio X, utilizando-se discos fundidos com tetraborato de Li, analisados em espectrofotômetro de fluorescência de raios X Philips PW 1270, totalmente

automatizado. Os resultados foram transformados em concentrações elementares, por programas de computador, criados e usados como modelos pelo Dr. E.G. Nisbet, do Departamento de Ciências Geológicas da Universidade de Saskatchewan, Canadá, e em parte descritos em Nisbet et al. (1979). O conteúdo de quartzo foi quantitativamente determinado pela técnica de difração de raios X, segundo método descrito por St. Arnaud & Whiteside (1963).

Para a avaliação da pedogênese quantitativa, utilizou-se o método proposto por Barshad (1964) e Marshall & Haseman (1942), que tem como princípio básico a reconstrução de perdas e ganhos ocorridos nos solos, empregando-se um método baseado no pressuposto de Brewer (1964). O balanço é estabelecido conhecendo-se a concentração dos elementos de interesse e de um elemento índice de baixíssima mobilidade, tendo-se como base um mineral estável integrante da porção mineral do solo. Utilizaram-se o quartzo e o Zr como índice de intemperização e os cálculos de perdas e ganhos foram baseados no conteúdo de quartzo do solo total, de acordo com o sugerido por Marshall (1940) e Marshall & Haseman (1942). Para tal, utilizou-se a comparação entre o peso atual do solo e de seus constituintes e o peso original de cada um, estimados com a utilização de mineral índice (quartzo) da fração mineral do solo.

Na realização dos cálculos de perdas e ganhos do solo e de seus constituintes, consideraram-se uma seção plana e paralela à superfície, com 1 cm², e o horizonte Crn com uma espessura de 20 cm de um perfil padrão.

O método preconizado por Marshall (1940) e Marshall & Haseman (1942), considerando uma seção de 1 cm² no perfil, baseia-se nas seguintes determinações: (1) peso atual da camada (Wa) = densidade do solo (g cm⁻³) x espessura (cm) do horizonte ou camada x 1 cm²; (2) peso original (Wa') = Wa (peso atual do horizonte de referência) x f (do horizonte pretendido); em que $f = Ra/Rb$ Ra = % ocorrência do mineral índice do horizonte em questão x peso atual deste horizonte/100; Rb = % ocorrência do mineral índice no horizonte tomado como referência x peso atual deste horizonte/100; (3) determina o peso atual do perfil = Wa (do horizonte ou camada A) + Wb (do horizonte ou camada B) + demais horizontes ou camadas; (4) determina o peso original do perfil = Wa' (do horizonte ou camada A) + Wb' (do horizonte ou camada B) + demais horizontes ou camadas.

A interpretação dos resultados baseia-se nas mudanças químicas que ocorrem durante a formação do solo, sendo expressa pela equação:

$$\text{formação do solo} = \text{perdas do perfil} + \text{transformações do perfil} + \text{ganhos do perfil}$$

Com essas medidas, avaliam-se as perdas que ocorrem nos solos com a água de drenagem, as

transformações que ocorrem com os minerais e os ganhos provenientes principalmente dos processos de oxidação dos constituintes mineralógicos do solo.

Para este estudo foram selecionados três perfis de solos, elegendo-se como horizonte padrão o Crn (saprolito) do perfil 3, que se encontrava muito pouco alterado, semibrando, atendendo ao objetivo do estudo. Os valores obtidos são relativos ao Crn (saprolito) coletado, e as percentagens de ganho (valores positivos) ou de perda (valores negativos) são referentes aos elementos ao longo do perfil do solo, em relação ao Crn (saprolito).

O estudo da relação entre minerais índices foi realizado através da razão entre os valores de Zr e quartzo obtidos na análise química total de cada horizonte dos três perfis estudados, em que as variações entre os horizontes adjacentes ou não, obtidas por diferença, são expressas em percentual. O cálculo foi da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \text{razão Zr/quartzo no horizonte desejado} = \\ \text{g kg}^{-1} \text{ de Zr no horizonte desejado} \div \text{g kg}^{-1} \\ \text{de quartzo no horizonte desejado} = \\ \text{resultado} \times 10^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{variação entre horizonte desejado e seu} \\ \text{adjacente} = \text{razão Zr/quartzo no horizonte} \\ \text{desejado} - \text{razão Zr/quartzo no horizonte} \\ \text{adjacente} \times 100 \div \text{razão Zr/quartzo no} \\ \text{horizonte desejado. As demais variações} \\ \text{entre os horizontes seguem o mesmo} \\ \text{procedimento} \end{aligned}$$

O fato de o saprolito ser bastante espesso, apresentando características típicas de biotita gnaíse, não possibilitou a coleta da rocha intacta, pois, apesar de ter sido realizada uma escavação profunda no local, em uma segunda incursão ao campo, não se chegou à rocha intacta. Dessa forma, todos os perfis dos solos foram considerados do mesmo material de origem biotita gnaíse, e examinados criteriosamente pelos pesquisadores responsáveis pela descrição e coleta do material.

Os componentes mineralógicos das frações maiores que a do silte (fração grosseira) foram identificados utilizando-se processos óticos, através do uso do microscópio petrográfico Zeiss, lupa binocular e microtestes químicos (Embrapa, 1979).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mineralogia

O material de origem nos perfis, representado pelo saprolito, apresentou característica de biotita gnaíse, pertencente ao Complexo Migmatítico-granitóide do embasamento cristalino Pré-Cambriano de Pernambuco. Os principais minerais constituintes do material de origem (biotita gnaíse) dos três perfis

de solos estudados, verificados com lupa e microscópio petrográfico nas lâminas delgadas, foram: feldspatos, micas (biotita), quartzo, anfibólio e hornblenda. A mineralogia das frações maiores que a do silte, analisada com lupa e microscópio petrográfico nas lâminas delgadas, indica homogeneidade nos três perfis, em termos qualitativos, semiquantitativos e no grau de intemperização, quando comparados com horizontes similares do *solum* e saprolito. Quartzo, micas e feldspatos são os principais minerais que constituem a fração grosseira, ocorrendo algum anfibólio e traços de zircão, turmalina, rutilo, epidoto e piroxênios.

Análise química total

A distribuição e a variação dos macroelementos nos três perfis e entre eles indicam que os solos foram submetidos aos mesmos processos de formação (Quadro 1).

Os valores percentuais dos elementos são bastante similares, tanto quando se comparam horizontes homólogos entre si quanto se comparam as variações dentro desses perfis. Essas variações são, de certa forma, previstas para solos com marcantes contrastes texturais e de natureza autóctone. Dessa forma, pode-se observar que elementos considerados de mais fácil mobilização, como Fe, Ca, Mg e Mn, tendem a diminuir seus percentuais de ocorrência na direção dos horizontes superiores, mais intemperizados. Mesmo o Ti, componente de minerais considerados extremamente resistentes em muitos ambientes, mostra variações similares às aquelas citadas. Santos et al. (1986), Luz et al. (1992) e Rolim Neto & Santos (1994) constataram mobilização similar de Ti em ambientes semiáridos e agrestes do Nordeste do Brasil. A sílica total, o mais abundante do elemento, acumula-se ou mantém-se e, com isso, aumenta-se a concentração relativa, na direção dos horizontes superiores, por perda dos outros minerais silicatados, especialmente na forma de quartzo (Quadro 2), já que a sílica de outros silicatos, especialmente dos argilo-minerais silicatados, pode ter sido perdida por erosão superficial, solubilização, mobilização lateral e, ou, eluviação, concentrando-se, neste último caso, nos horizontes Bt desses solos. Alumínio, menos móvel que a sílica, embora bem uniforme ao longo dos perfis, mostra pequena perda superficial, provavelmente devido às mobilizações dos alumínio-silicatos referidas.

Uniformidade entre solo e material de origem

O elevado gradiente textural típico dos Planossolos quase sempre sugere influência de mais de um material de origem contribuindo para sua formação, ou, pelo menos, que a parte superficial do solo tenha sido influenciada por um possível retrabalhamento do seu material de origem via ciclos de erosão-transporte-deposição, característicos de regiões semiáridas. A utilização dos elementos quartzo e Zr, componentes

Quadro 1. Análise química total dos solos

| Horizonte | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | CaO | MgO | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | MnO | Quartzo | Zr |
|--------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-----|-----|------------------|-------------------------------|-----|---------|------|
| g kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |
| Perfil 1 | | | | | | | | | | | | |
| Ap | 768 | 122 | 20 | 34 | 25 | 16 | 8 | 3 | 0,6 | 0,7 | 376 | 0,54 |
| Bt | 733 | 139 | 36 | 33 | 25 | 16 | 10 | 5 | 0,4 | 0,7 | 295 | 0,42 |
| Btn | 698 | 147 | 55 | 29 | 24 | 18 | 19 | 7 | 1,0 | 0,8 | 162 | 0,25 |
| Cn | 653 | 144 | 68 | 29 | 29 | 24 | 36 | 8 | 2,3 | 0,8 | 120 | 0,17 |
| Crn | 609 | 135 | 79 | 31 | 29 | 43 | 60 | 8 | 3,8 | 1,2 | 134 | 0,21 |
| Perfil 2 | | | | | | | | | | | | |
| Ap | 779 | 119 | 18 | 33 | 26 | 15 | 6 | 3 | 0,6 | 0,4 | 345 | 0,68 |
| Bt | 742 | 136 | 38 | 30 | 23 | 14 | 10 | 5 | 0,4 | 0,5 | 262 | 0,40 |
| Btn | 727 | 136 | 41 | 28 | 26 | 16 | 18 | 6 | 0,7 | 0,7 | 278 | 0,40 |
| Cn | 719 | 133 | 44 | 29 | 26 | 18 | 23 | 6 | 1,3 | 0,7 | 203 | 0,46 |
| Crnz | 667 | 137 | 56 | 33 | 30 | 27 | 37 | 7 | 3,4 | 0,9 | 135 | 0,19 |
| Perfil 3 | | | | | | | | | | | | |
| Ap | 790 | 107 | 20 | 34 | 22 | 14 | 8 | 3 | 0,6 | 0,5 | 327 | 0,82 |
| Bt | 730 | 140 | 44 | 29 | 21 | 15 | 14 | 6 | 0,5 | 0,7 | 297 | 0,38 |
| Btn | 685 | 142 | 58 | 28 | 25 | 23 | 28 | 8 | 1,7 | 0,7 | 207 | 0,28 |
| Crnz | 638 | 136 | 66 | 32 | 30 | 34 | 50 | 9 | 3,4 | 1 | 130 | 0,21 |

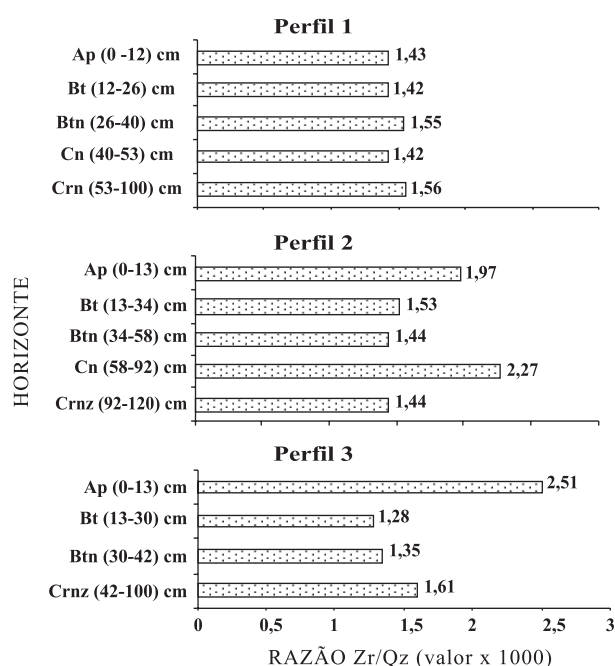
Quadro 2. Conteúdo da sílica total, do quartzo e de outros silicatos

| Horizonte | SiO ₂ total | Quartzo | Sílica de outros silicatos |
|--------------------|------------------------|---------|----------------------------|
| g kg ⁻¹ | | | |
| Perfil 1 | | | |
| Ap | 778,1 | 375,7 | 402,4 |
| Bt | 695,5 | 295,2 | 400,3 |
| Btn | 684,1 | 161,6 | 522,5 |
| Cn | 646,6 | 119,8 | 526,8 |
| Crn | 602,4 | 80,8 | 521,6 |
| Perfil 2 | | | |
| Ap | 767,8 | 344,9 | 422,9 |
| Bt | 730,1 | 262,1 | 468,0 |
| Btn | 714,0 | 277,7 | 436,3 |
| Cn | 711,0 | 202,8 | 508,2 |
| Crnz | 673,4 | 135,4 | 538,0 |
| Perfil 3 | | | |
| Ap | 793,9 | 327,2 | 466,7 |
| Bt | 722,1 | 175,5 | 546,6 |
| Btn | 672,2 | 134,9 | 537,3 |
| Crnz | 629,4 | 87,1 | 542,3 |

de minerais resistentes ao intemperismo, foi procedida no sentido de averiguar possíveis diversidades de materiais de origem nos três solos. A validade da aplicação desses elementos chamados índices de intemperização tem sido constatada na região por Luz et al. (1992) e Rolim Neto & Santos (1994). A figura 1 mostra a variação das razões entre Zr e quartzo, determinados no solo total por meio da fração terra fina.

Os valores das variações percentuais dessas razões em cada perfil, para horizontes consecutivos ou não, são apresentados no quadro 3.

Os níveis verificados estão bem abaixo dos reconhecidos na literatura, especialmente por Chapman & Horn (1968) e Drees & Wilding (1973), como indicadores de descontinuidade no solo e entre solo e o material geológico subjacente. As maiores

**Figura 1. Valores da razão zircônio/quartzo nos três perfis.**

Quadro 3. Variações percentuais da relação zircônio/quartzo entre os horizontes dos três solos estudados

| Perfil | Razão de horizonte | Valor Zr/quartzo |
|--------|--------------------|------------------|
| 1 | Ap/Bt | 0,70 |
| | Ap/Btn | -8,39 |
| | Ap/Cn | 0,69 |
| | Ap/Crn | -9,09 |
| | Bt/Btn | -9,15 |
| | Bt/Cn | 0,00 |
| | Bt/Crn | -9,86 |
| | Btn/Cn | 8,39 |
| | Btn/Crn | 0,64 |
| 2 | Cn/Crn | 9,86 |
| | Ap/Bt | 22,33 |
| | Ap/Btn | 26,90 |
| | Ap/Cn | -15,23 |
| | Ap/Crnz | 28,93 |
| | Bt/Btn | 5,88 |
| | Bt/Cn | 48,37 |
| | Bt/Crnz | 8,50 |
| | Btn/Cn | -57,64 |
| 3 | Btn/Crnz | 2,78 |
| | Cn/Crnz | 38,32 |
| | Ap/Bt | 49,00 |
| | Ap/Btn | 46,24 |
| | Ap/Crnz | 35,86 |
| | Bt/Btn | -5,47 |
| | Bt/Crnz | -25,78 |
| | Btn/Crnz | -19,26 |

Percentagem da relação Zr/quartzo entre horizontes = razão Zr/quartzo do horizonte eleito no numerador ÷ razão Zr/quartzo do horizonte subsequente no denominador; os sinais (+) e (-) representam, respectivamente, ganhos e perdas.

variações estão nos horizontes Ap dos perfis 2 e 3, possivelmente devido a algum retrabalhamento de material ao longo da encosta. Variações deste tipo foram verificadas por Luz et al. (1992) em áreas de Luvisolos Crômicos no Sertão de Pernambuco e são devidas a ciclos de erosão, transporte e deposição típicos da região semiárida do Nordeste.

A variação maior no horizonte Cn do perfil 2 não parece refletir alguma diferença de natureza genética ou retrabalhamento de material, uma vez que outras características na sequência de horizontes, especialmente nos estudos micromorfológicos realizados por Parahyba (1993), mostraram grande uniformidade deste horizonte com o restante do perfil. Essa mesma característica de uniformidade foi observada também nos dois outros perfis de solos.

De qualquer forma, a maior diferença percentual da relação Zr/quartzo do horizonte Cn do perfil 2 está relacionada com o sobrejacente Btn, sendo da ordem de magnitude de 57,6 %, ou seja, bem abaixo dos 100 % considerados necessários para indicar descontinuidade, como proposto por Chapman & Horn (1968) e Drees & Wilding (1973). Constata-se, dessa forma, a natureza autóctone dos três perfis, com provável indício de retrabalhamento nos horizontes superficiais e pouca

influência do relevo na diferenciação deles, ao menos em função da pendente estudada.

Mudanças pedogênicas quantitativas

O total de perdas e ganhos em peso nos diferentes horizontes dos três perfis estudados foi calculado para as frações granulométricas e para os principais óxidos (Quadros 4, 5 e 6). Utilizou-se o quartzo como constituinte estável, e os cálculos foram efetuados segundo método exposto por Barshad (1964).

Considerando-se o peso total do solo, os três perfis apresentaram, durante o processo evolutivo, perdas totais não muito divergentes e em torno dos 50 % do peso original (Quadro 5). Perdas menores foram verificadas em solos de regiões temperadas por Sudom & St Arnaud (1971), também utilizando quartzo como mineral índice. Há, no entanto, tendência de essas perdas serem mais acentuadas nos perfis situados na meia encosta e na parte mais baixa (perfis 2 e 3, respectivamente). Embora o perfil 1 do topo apresente perdas totais menores que os outros dois, verifica-se que são predominantemente superficiais e correspondentes ao horizonte Ap. Esta tendência, provavelmente, advém do fato de haver iluviação de materiais finos no horizonte Bt, eluviado do horizonte Ap, minimizando as perdas totais deste horizonte e, ou, de haver menores perdas laterais em subsuperfície.

Os cálculos de ganhos e perdas para a soma das frações granulométricas areia e silte mostram perdas totais similares nos três perfis, indicando mesmo grau de intemperização nas três posições dos solos no relevo. Esse fato é corroborado pelos estudos de Parahyba (1993), quando analisou os dados micromorfológicos, químicos e mineralógicos.

Quadro 4. Características granulométricas dos perfis estudados

| Horizonte | Areia | Silte | Argila |
|--------------------|-------|-------|--------|
| g kg ⁻¹ | | | |
| Perfil 1 | | | |
| Ap | 650 | 240 | 110 |
| Bt | 550 | 210 | 240 |
| Btn | 460 | 180 | 360 |
| Cn | 540 | 240 | 220 |
| Crn | 810 | 110 | 80 |
| Perfil 2 | | | |
| Ap | 650 | 240 | 110 |
| Bt | 540 | 180 | 280 |
| Btn | 590 | 170 | 240 |
| Cn | 740 | 50 | 210 |
| Crnz | 720 | 150 | 130 |
| Perfil 3 | | | |
| Ap | 710 | 180 | 110 |
| Bt | 460 | 220 | 320 |
| Btn | 430 | 250 | 320 |
| Crnz | 550 | 300 | 150 |

Quadro 5. Estimativa de ganhos e perdas do peso total do solo e dos percentuais de areia + silte e argila

| Horiz. | Peso atual do solo | Peso original do solo | Ganho ou perda de solo | | Peso atual areia + silte | Peso original areia + silte | Ganho ou perda de areia + silte | | Peso atual de argila | Peso original de argila | Ganho e perda de argila | |
|----------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|--------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|
| | g/horiz. | | % | | g/horiz. | | % | | g/horiz. | | % | |
| Perfil 1 | | | | | | | | | | | | |
| Ap | 20,76 | 59,90 | -39,14 | -65,34 | 18,47 | 55,10 | -36,63 | -66,48 | 2,28 | 4,79 | -2,51 | -52,40 |
| Bt | 26,18 | 59,52 | -33,34 | -56,01 | 19,89 | 54,75 | -34,86 | -63,67 | 6,28 | 4,76 | +1,52 | +31,92 |
| Btn | 25,90 | 32,26 | -6,36 | -19,71 | 16,57 | 29,67 | -13,10 | -44,15 | 9,32 | 2,58 | +6,74 | +261,25 |
| Cn | 22,88 | 21,12 | +1,76 | +8,33 | 17,84 | 19,43 | -1,59 | -8,18 | 5,03 | 1,69 | +3,34 | +197,63 |
| Crn | 38,40 | 38,40 | - | - | 35,82 | 35,32 | - | - | 3,07 | 3,07 | - | - |
| Solum | 72,84 | 151,68 | -78,84 | -51,98 | 54,93 | 139,52 | -84,59 | -60,63 | 17,88 | 12,13 | +5,75 | +47,40 |
| Perfil 2 | | | | | | | | | | | | |
| Ap | 22,36 | 59,14 | -36,78 | -62,19 | 19,90 | 51,45 | -31,55 | -61,32 | 2,45 | 7,68 | -5,23 | -68,10 |
| Bt | 38,43 | 77,18 | -38,75 | -50,21 | 27,67 | 67,15 | -39,48 | -58,79 | 10,76 | 10,03 | +0,73 | +7,28 |
| Btn | 43,92 | 93,70 | -49,78 | -53,13 | 33,38 | 81,52 | -48,14 | -59,08 | 10,54 | 12,17 | -1,63 | -13,39 |
| Cn | 65,28 | 101,76 | -36,48 | -35,85 | 51,56 | 88,54 | -36,98 | -41,77 | 13,71 | 13,22 | +0,49 | +3,71 |
| Crnz | 38,40 | 38,40 | - | - | 33,41 | 33,41 | - | - | 4,99 | 4,99 | - | - |
| Solum | 104,71 | 230,02 | -125,31 | -54,48 | 80,95 | 200,12 | -119,17 | -59,55 | 23,75 | 29,88 | -6,13 | -29,51 |
| Perfil 3 | | | | | | | | | | | | |
| Ap | 22,49 | 56,45 | -33,96 | -60,16 | 20,02 | 47,98 | -27,96 | -58,27 | 2,47 | 8,47 | -6,0 | -70,84 |
| Bt | 32,98 | 75,26 | -42,28 | -56,18 | 22,42 | 63,97 | -41,55 | -64,95 | 10,55 | 11,29 | -0,74 | -6,55 |
| Btn | 22,68 | 36,10 | -13,42 | -37,17 | 15,42 | 30,68 | -15,26 | -49,74 | 7,26 | 5,41 | +1,85 | +34,19 |
| Crnz | 38,40 | 38,40 | - | - | 32,64 | 32,64 | - | - | 5,76 | 5,76 | - | - |
| Solum | 78,15 | 167,81 | -89,66 | -53,43 | 57,86 | 142,63 | -84,77 | -59,43 | 20,28 | 25,17 | -4,89 | -19,43 |

g/horiz: grama por horizonte; (+): ganho; (-): perda.

Nos cálculos com a argila, ficaram evidenciadas grandes concentrações desta fração no horizonte Bt do perfil 1, quando comparadas a ganhos bem menos acentuados, e até mesmo perdas, nos horizontes similares dos outros perfis. A despeito da concentração de argila nos horizontes Bt do perfil 1, verifica-se que o horizonte Ap deste solo é o que menos perdeu argila. Este fato leva à suposição de que a diferenciação textural pode não ser, pelo menos em predominância, devida à iluviação. Também os percentuais extremamente elevados, correspondentes aos ganhos de argila, parecem sugerir que há outras fontes desta fração, além da intemperização do silte e da areia. Esse fato também corrobora as observações micromorfológicas de intemperização de biotitas com produção “*in situ*” de argila, observadas por Parahyba (1993).

Nessas observações, ficou bem claro que as transformações diretas são também a partir da intemperização de frações granulométricas maiores que a areia e, dessa forma, não consideradas nos cálculos efetuados. Pelo exposto, as diferenciações texturais dos perfis parecem estar mais relacionadas com maiores ou menores perdas laterais, em superfície, que se processam por arraste mecânico ou dissolução. Essas perdas se manifestariam em profundidade, ou em todo perfil, em função do seu posicionamento no relevo. É possível que haja diferenciações texturais por eluviação-iluviação,

porém, pelas indicações discutidas, parecem exercer influência bem menor que a intemperização “*in situ*” das biotitas, e do que as perdas impostas pelo condicionamento do relevo.

Não foram observadas as características micromorfológicas que dêem suporte ao processo de ferrólise, conforme Parahyba (1993). As perdas de argila no horizonte Btn do perfil 2 e no Bt do perfil 3 (Quadro 5) estão mais relacionadas com perdas laterais, em subsuperfície, que se processam por arraste mecânico ou dissolução em função do seu posicionamento no relevo. Os resultados da granulometria, por exemplo do Bt do perfil 3, mostram um acréscimo oriundo não só pela eluviação-iluviação, mas pela influência da intemperização “*in situ*” das biotitas, verificada em lâminas micromorfológicas desses horizontes dos referidos perfis, conforme observado em Parahyba (1993). Transformações diretas ocorrem também a partir da intemperização de frações granulométricas maiores que a da areia e, dessa forma, não são consideradas nos cálculos efetuados.

Com relação aos principais elementos químicos, verificou-se uma grande uniformidade na evolução pedogenética dos três perfis (Quadro 6).

A ordem de mobilidade desses elementos durante a evolução pedogenética foi a seguinte:

Quadro 6. Estimativa de perdas dos principais óxidos⁽¹⁾ no *solum* dos três perfis estudados

| <i>Solum</i> | SiO ₂ | | Al ₂ O ₃ | | Fe ₂ O ₃ | | K ₂ O | | Na ₂ O | | CaO | | MgO | | TiO ₂ | | P ₂ O ₅ | | MnO | |
|--------------|------------------|------------------|--------------------------------|-----|--------------------------------|-----|------------------|-----|-------------------|-----|------|-----|------|-----|------------------|-----|-------------------------------|-----|------|-----|
| | g ⁽²⁾ | % ⁽²⁾ | g | % | g | % | g | % | g | % | g | % | g | % | g | % | g | % | g | % |
| Perfil 1 | -39,2 | -42 | -10,4 | -51 | -9,2 | -76 | -2,4 | -50 | -2,6 | -59 | -5,4 | -81 | -8,2 | -90 | -0,8 | -67 | -0,5 | -92 | -0,1 | -75 |
| Perfil 2 | -75,6 | -49 | -17,6 | -56 | -9,2 | -71 | -4,4 | -59 | -4,4 | -63 | -4,7 | -75 | -7,3 | -85 | -1,1 | -67 | -0,7 | -92 | -0,2 | -75 |
| Perfil 3 | -49,6 | -46 | -12,5 | -55 | -7,9 | -71 | -3,0 | -56 | -3,2 | -65 | -4,5 | -77 | -7,1 | -85 | -1,1 | -71 | -0,5 | -87 | -0,1 | -72 |

⁽¹⁾ Os cálculos foram realizados com base nos percentuais dos óxidos obtidos na análise química total da fração mineral total. ⁽²⁾ Os resultados de perdas (-) expressos em gramas e percentuais foram obtidos em relação ao peso original do solo por horizonte.

Perfil 1: MgO > CaO > Fe₂O₃ > MnO > TiO₂ > Na₂O > Al₂O₃ > K₂O > SiO₂

Perfil 2: MgO > MnO > CaO > Fe₂O₃ > TiO₂ > Na₂O > K₂O > Al₂O₃ > SiO₂

Perfil 3: MgO > CaO > MnO > Fe₂O₃ = TiO₂ > Na₂O > K₂O > Al₂O₃ > SiO₂

A mobilidade verificada reflete as perdas dos elementos do solo como um todo. As poucas inversões verificadas entre os três perfis envolvem elementos que ocorrem em quantidades muito pequenas como Mn, Ti, Na e K. Estes valores numéricos quantitativos muitos baixos podem promover erros acentuados nas diferenças percentuais. Dessa forma, pode-se observar que há homogeneidade nos três perfis, relativa aos elementos mais abundantes e que se processa na seguinte ordem: MgO > CaO > Fe₂O₃ > Al₂O₃ > SiO₂. Sequência similar foi encontrada, por Busacca & Singer (1989), em solos derivados de sedimentos aluviais em clima semiárido na Califórnia. A ordem oposta foi precisamente constatada por Bravard & Righi (1989) em solos derivados de sedimentos do Grupo Barreiras na Amazônia. A sequência retrata portanto as diferentes suscetibilidades à intemperização e movimentação dos elementos constitutivos dos minerais, em função, especialmente, das condições climáticas vigentes, ou, mais especificamente, das diferentes combinações entre os fatores de formação dos solos, características do local.

CONCLUSÕES

1. Os três perfis têm natureza autóctone, apenas com indícios de retrabalhamento superficial dos seus materiais constitutivos.

2. Durante o processo de intemperização, aproximadamente 50 % do peso original do solo foram perdidos.

3. Observaram-se perdas totais similares das frações areia e silte, nos três perfis, considerando-se

uma indicação que o grau de intemperização dos solos é bastante similar.

4. As diferenciações quantitativas das perdas e dos ganhos de argila dentro dos perfis e entre eles indicaram que não apenas eluviação-iluviação foram os processos atuantes na formação dos horizontes Bt. Perdas laterais por dissolução e, ou, arraste mecânico superficial e em profundidade, provavelmente, foram os principais processos.

5. As perdas referentes aos principais elementos constitutivos dos solos, durante a pedogênese, apresentaram a seguinte ordem: MgO > CaO > Fe₂O₃ > Al₂O₃ > SiO₂.

LITERATURA CITADA

- BARSHAD, I. Chemistry of soil development. In: BEAR, F.T., ed. Chemistry of the soil. New York, Reinhold Publ. Corp., 1964. p.1-41.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento Exploratório-reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco. Recife, 1973. v.1. 359p. (Boletim Técnico, 26. SUDENE-DRN/Série Pedologia, 14)
- BRAVARD, S. & RIGHI, D. Geochemical differences in an Oxisol-Spodisol toposequence from Amazonia, Brazil. Geoderma, 44:29-42, 1989.
- BREWER, R. Fabric and analysis of soils. Nova York, John Wiley & Sons, 1964. 470p.
- BRIMHALL, G.H. & DIETRICH, W.E. Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: Results on weathering and pedogenesis. Geochim. Cosmochim. Acta, 51:567-587, 1987.
- BRIMHALL, G.H.; CHRISTOPHER J.L.; FORD, C.; BRATT, J.; TAYLOR, G. & WARIN, O. Quantitative geochemical approach to pedogenesis: Importance of parent material reduction, volumetric expansion, and eolian influx in lateritization. Geoderma, 51:51-91, 1991a.

- BRIMHALL, G.H.; CHADWICK, O.A.; LEWIS, C.J.; COMPTON, W.; WILLIAMS, I.S.; DANTI, K.J.; DIETRICH, W.E.; POWER, M.E.; HENDRICKS, D. & BRATT, J. Deformational mass transport and invasive processes in soil evolution. *Science*, 255:695-702, 1991b.
- BUSACCA, A.J. & SINGER, M.J. Pedogenesis of a chronosequence in the Sacramento Valley, California, U.S.A. II. Elemental chemistry of silt fractions. *Geoderma*, 44:43-75, 1989.
- CHAPMAN, S.L. & HORN, M.E. Parent material uniformity and origin of silty soils in Northwest Arkansas based on zirconium – titanium contents. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32:265-171, 1968.
- CHADWICK, O.A.; BRIMHALL, G.H. & HENDRICKS, D.M. From a black to a gray box — A mass balance interpretation of pedogenesis. *Geomorphology*, 3:369-390, 1990.
- DREES, L.R. & WILDING, L.P. Elemental variability within a sampling unit. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37:82-87, 1973.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Definição e notação de horizontes e camadas do solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1988. 54p. (Documentos SNLCS, 3)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979. n.p.
- EVANS, L.J. Characteristics of some loamy-textured Podzols in Northeastern Ontário. *Can. J. Soil Sci.*, 61:79-89, 1982.
- EVANS, L.J. & ADAMS, W.A. Quantitative pedological studies on soil derived from Silurian mudstones. IV uniformity of parent material and evaluation of internal standards. *J. Soil Sci.*, 26:319-326, 1975.
- LINS, R.C. Áreas de execução do Agreste de Pernambuco. Recife, SUDENE, 1989. 327p.
- LUZ, L.R.Q.P.; SANTOS, M.C.D. & MERMUT, A.R. Pedogênese em uma topossequência do semiárido de Pernambuco. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:95-102, 1992.
- MARSHAL, C.E. A petrographic method for the study of soil formation process. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 5:100-103, 1940.
- MARSHAL, C.E. & HASEMAN, J.F. The quantitative evaluation of soil formation and development by heavy mineral studies: A grundy silt loam profile. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 7:448-453, 1942.
- MICHELON, C.R. Balanço químico em seis conjuntos solos-saprolito do Rio Grande do Sul. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2006. 68p. (Tese de Mestrado)
- NISBET, E.G.; DIETRICH, V.J. & ESENWEIN, A. Routine trace element determination in silicate minerals and rocks by X-ray fluorescence. *Fortschritte Mineral.*, 57:264-279, 1979.
- PARAHYBA, R.B.V. Gênese de solos Planossólicos do Agreste de Pernambuco. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1993. 152p. (Tese de Mestrado)
- REASIDE, J.D. Stability of index minerals in soils with particular reference to quartz, zircon, and garnet. *J. Sedim. Petrol.*, 29:493-502, 1959.
- ROLIM NETO, F.C. & SANTOS, M.C.D. Gênese de solo arenoso com lamela e fragipã no Agreste de Pernambuco. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:243-253, 1994.
- SANTOS, M.C.D. Pedogenesis of Luvisolic soils in East-Central Saskatchewan. Canadá. University of Saskatchewan, Canadá, 1984. 196p. (Tese de Doutorado)
- SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C. & ANJOS, L.H.C. Manual de descrição e coleta de solos no campo. 5.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.
- SANTOS, M.C.D.; St. ARNAUD, R.J. & ANDERSON, D.W. Quantitative evaluation of pedogenic changes in Boralfs (Gray Luvisols) of East-Central Saskatchewan. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:1013-1019, 1986.
- SILVA, F.B.R.; SANTOS, J.C.P.; SILVA, A.B.; CAVALCANTI, A.C.V.; SILVA, F.H.B.B.; BURGOS, N.; PARAHYBA, R.B.V.; OLIVEIRA NETO, M.B.; SOUZA NETO, N.C.; ARAÚJO FILHO, J.C.; LOPES, O.F.; LUZ, L.R.Q.P.; LEITE, A.P.; SOUZA, L.G. M.C.; SILVA, C.P.; VAREJÃO SILVA, M.A. & BARROS, A.H.C. Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco - ZAPE. Recife, Embrapa Solos/Governo do Estado de Pernambuco - Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária, 2001. CD-ROM. (Embrapa Solos. Documentos, 35)
- St. ARNAUD, R.J. & WHITESIDE, E.P. Physical breakdown in relation to soil development. *J. Soil Sci.*, 14:267-281, 1963.
- SUDOM, M.C. & St. ARNAUD, R.J. Use of quartz, zirconium and titanium as weathering indices in pedogenic studies. *Can. J. Soil Sci.*, 51:385-396, 1971.
- WHITE, A.F. & VELBEL, M.A. Weathering and pedogenesis at the watershed scale: Some recent lessons from studies of acid-deposition effects. *Chem. Geol.*, 107:3-4, 1993.
- WHITE, A.F. Chemical weathering rates of silicate minerals in soils. In: WHITE, A.F. & BRANTLEY, S.L., eds. *Reviews in mineralogy*. Washington, Mineralogical Society of America, 1995. p.407-461.

