

GEOQUÍMICA DAS PAISAGENS TROPICAIS: O PAPEL DAS COBERTURAS PEDOLÓGICAS

René BOULET

Yves LUCAS

Emmanuel FRITSCH

Hélène PAQUET

(Tradução a partir do original *Géochimie des paysages: le rôle des couvertures pédologiques*, apresentado no *Colloque Sédimentologie et Géochimie de la Surface à la mémoire de Georges Millot*, publicado pela *Académie des Sciences et du CADAS*, p. 55-76, 1993. Tradução de Carlos Roberto Espindola, Universidade Estadual de Campinas. Revisado por Selma Simões de Castro, Universidade Federal de Goiás)

(Originally published as *Géochimie des paysages: le rôle des couvertures pédologiques*, presented in the *Colloque Sédimentologie et Géochimie de la Surface à la mémoire de Georges Millot*, published by the *Académie des Sciences et du CADAS*, p. 55-76, 1993. Translated by Carlos Roberto Espindola, Universidade Estadual de Campinas. Revised by Selma Simões de Castro, Universidade Federal de Goiás)

I INTRODUÇÃO

Já há muito tempo, as relações morfogênese-pedogênese têm sido objeto de investigações de geomorfólogos e pedólogos. Para TRICART & MICHEL (1965), “a pedologia encontra-se em relação à geomorfologia numa situação análoga à da geologia estrutural. A evolução geomorfológica fornece um quadro à formação e evolução do solo; é raro solos se formarem diretamente de uma rocha *in situ*, sendo mais frequente eles se desenvolverem a partir de formações superficiais, alteritas (no sentido de perfil de alteração ou saprolito, *nota do tradutor*), depósitos de vertentes, aluviões, colúvios, depósitos eólicos etc.”.

No bojo de um grande programa intitulado “Geoquímica da superfície e formas de relevo”, Georges Millot liderou pesquisas de uma equipe multidisciplinar composta por geólogos, geógrafos e geoquímicos, para estudar a zona tropical africana intermediária entre a floresta úmida e o deserto (MILLOT *et al.* 1976; BOCQUIER *et al.* 1977; BOULET *et al.* 1977; NAHON & MILLOT 1977; MILLOT 1979; MILLOT *et al.* 1979; MILLOT 1980a, b). Essas investigações ensejaram obter conhecimentos sobre os mecanismos de alteração supérgena e o ciclo geoquímico dos elementos, além de um grande número de informações sobre o

modo como a alteração superficial e a pedogênese agiam sobre a modelagem das formas de relevo. De acordo com MILLOT (1979), a ideia principal é que a alteração e a pedogênese apenas colocam em operação ações de dissolução e desagregação, antes que intervenham os agentes de ablação superficial. Com efeito, as alterações e os solos abrigam laboratórios subterrâneos ou hipodérmicos que transformam a natureza e a estrutura do manto de alteração antes de expô-los aos agentes de erosão superficial e da elaboração das formas de relevo.

Esses trabalhos foram posteriormente complementados por numerosos estudos nas zonas tropicais úmidas, cujo conjunto de dados mostra que as situações conhecidas constituem dois grandes conjuntos de coberturas pedológicas, onde as influências sobre a evolução do relevo são distintas.

O primeiro conjunto é constituído por associações cobertura-modelado que se aprofundam mutuamente, conservando uma estrutura constante, denominadas, por essa razão, *coberturas em equilíbrio*, apresentando-se como *coberturas sem discordância entre horizontes*, em que os horizontes são mais ou menos paralelos à superfície do terreno, exceto em posições inteiramente a jusante, onde o lençol freático se aproxima da superfície. As variações laterais são aí graduais, sendo possível caracterizá-las por uma sequência

vertical de organizações elementares que derivam umas das outras.

No segundo conjunto, a evolução morfo-pedogenética termina pela substituição progressiva de uma associação cobertura-modelado inicial por outra usualmente muito diferente. Estas são denominadas *sistemas de transformação*, que na grande maioria dos casos são *coberturas com discordância entre horizontes*, por comportarem duas ou mais seqüências de horizontes discordantes uns dos outros. A primeira associação, assim como nas coberturas em equilíbrio, é vertical, com horizontes razoavelmente paralelos à superfície do terreno, enquanto a segunda é oblíqua e progride lateralmente a partir do topo do perfil ou em profundidade, ou de ambas, interrompendo a seqüência, que deixa de ser funcional. Assim, a caracterização do sistema requer a representação de uma seção contínua, que vai do topo do interflúvio ao eixo da drenagem adjacente.

II COBERTURAS EM EQUILÍBRIO

As coberturas em equilíbrio evoluem em condições de pedoclimas suficientemente estáveis no tempo, de modo que a seqüência de transformações da rocha-mãe até a superfície do solo se mantém, criando uma sucessão constante de horizontes, mesmo que estejam em perpétua evolução. O pedoclima é determinado por diversos fatores: clima, vegetação, pedofauna, espaço poroso e nível de base local, estando os quatro últimos interligados. O nível de base está sob a dependência da evolução do modelado superficial, da tectônica e das variações eustáticas; as variações climáticas e as evoluções tectônica e geomorfológica são permanentes na escala de tempo pedológico, mas geograficamente variáveis. Podem ser esperadas, então, coberturas em equilíbrio em duas situações: de um lado, nas regiões onde as condições climáticas e tectônicas mostram-se insuficientes para a geração de condições de desequilíbrio e, de outro, quando as coberturas são suficientemente jovens, a ponto de não serem submetidas a tais desequilíbrios. Os exemplos a seguir estão ordenados em conformidade com o clima atual, do seco para o úmido.

1. Coberturas de solos brunos eutróficos e vertissolos sobre migmatitos em zona tropical sudanesa da África d'Oeste – A toposseqüência de Garango I

No centro-sul de Burkina Faso, sobre embasamento cristalino desprovido de alteritas caulínicas antigas e sob 900 mm de chuvas entre maio

e outubro, os migmatitos calcio-alcalínicos com biotita e anfibólio alteram-se predominantemente para os argilominerais montmorilonita e caulinita, com traços de illita (Figura 1a). O modelado correspondente é constituído por interflúvios curtos, com topos convexos e fracos declives (1,5 a 2%), coberturas de solos pouco espessos (2 m) com características vérticas que se acentuam na base das vertentes associadas aos solos brunos eutróficos vérticos a montante e vertissolos com nódulos calcários a jusante. Os horizontes são paralelos à superfície do terreno e apresentam variações laterais que progridem de montante a jusante e as cores passam de bruno vivo a bruno oliva; a nodulação calcária não ocorre nos vertissolos; nos brunos eutróficos o teor de montmorilonita compõe pouco mais da metade em relação ao da caulinita, mas torna-se quase exclusiva nos vertissolos.

Na base do perfil, observa-se pela microscopia a formação de um plasma argiloso da alteração dos minerais primários em um horizonte de estrutura petrográfica conservada. No horizonte B, uma pedoturbação, associada principalmente a alterações de umectação e dessecação, homogeneiza o material que adquire uma coloração bruna e uma estrutura prismática. No alto da vertente, a quantidade de argila diminui no topo do perfil, até atingir valores inferiores a 5%, constituindo um horizonte arenoso, pouco coeso e vulnerável à erosão mecânica (Figura 1b).

Em Garango I as medições de umidade em campo revelam que a cobertura pedológica torna-se mais úmida até a sua base e é funcional, aprofundando-se às custas do material de alteração, mas sofre erosão no topo da encosta, o que tende a diminuir os desnivelamentos.

Essas coberturas de alteração montmorilonítica desenvolvem-se sobre rochas graníticas ou migmatíticas nas condições de clima e vegetação da zona sudanesa do oeste africano, com uma temperatura média elevada de 28 °C, pluviosidade anual de 600 a 1.000 mm, concentrada na estação chuvosa de 5 meses, e uma vegetação natural do tipo savana arbórea rala. Essas coberturas apresentam uma *dinâmica vertical* em equilíbrio com as condições pedoclimáticas atuais, relativamente recentes, sempre posteriores às alterações caulínicas espessas que cobrem ainda grande parte da mesma região.

No item III-A-1 será mostrado que em direção ao norte, à medida que a pluviosidade diminui, essas coberturas entram em desequilíbrio e se transformam.

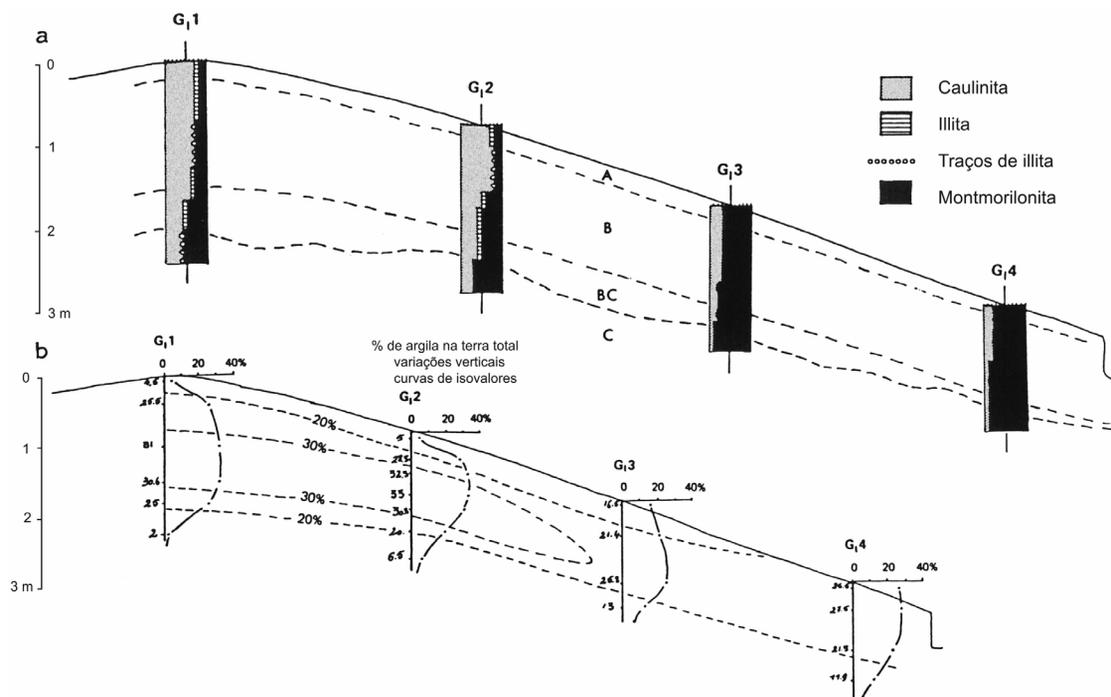


FIGURA 1 – Toposequência de Garango I. a – Organização em horizontes e mineralogia das argilas. b – Isoetes de argila e variações verticais em 4 perfis principais (BOULET 1974). Reproduzido com autorização de ORSTOM.

2. Cobertura de solos ferruginosos tropicais

Essas coberturas foram observadas no Noroeste centro-africano, em uma zona granito-gnáissica com uma antiga cobertura de alteração caulinitica erodida (LUCAS 1980). Situam-se nas proximidades dos eixos de drenagem principais, isto é, sobre as vertentes mais evoluídas nesta zona rejuvenescida, cujo clima atual tem uma pluviosidade anual de 1.200 a 1.300 mm e uma estação seca de 5 a 6 meses. O modelado possui declives inferiores a 4% e está pontuado por domos de afloramentos rochosos, cujos topos das vertentes são dominados por litossolos ou solos pouco evoluídos, em razão das ações erosivas. A maior parte das vertentes é associada a solos ferruginosos tropicais com carapaças ferruginosas, substituídos a jusante por solos hidromórficos de extensão reduzida. Os solos ferruginosos tropicais apresentam horizontes superiores beges a bruno-amarelados, arenosos nos primeiros 20 a 40 cm, tornando-se progressivamente mais argilosos em profundidade, com até 30% de argila. A 80-120 cm de profundidade, esses horizontes móveis sobrepõem-se a uma carapaça mosqueada, de cor vermelha a bege claro e que

aloja um lençol d'água (NA – nível d'água) na estação chuvosa. Os numerosos volumes com estrutura petrográfica conservada na carapaça tornam-se rapidamente mais abundantes abaixo e, a partir de 110-120 cm, formam um horizonte caulinitico. A carapaça representa, provavelmente, os primeiros estágios de formação das couraças, descritas no item seguinte, mediante agregação do ferro em condições temporariamente hidromórficas.

3. Coberturas com couraça ferruginosa

As couraças ferruginosas são quase onipresentes na África, ao sul do Saara. Todavia, na zona do Sahel, como na zona tropical úmida, elas mais se degradam do que se formam. Estudos coordenados por TARDY (1990), no âmbito do Programa PIRAT (*Programme Interdisciplinaire de Recherche de Biogéodynamique Intertropicale Périalantique*), possibilitaram localizar regiões onde o encouraçamento apresenta um balanço positivo. O perfil laterítico encouraçado desenvolve-se sob um clima tropical com estações contrastadas, com uma pluviosidade anual superior a 1.100 mm, que pode atingir 1.600 mm, uma temperatura média mensal

de 28 °C e uma estação seca de 6 meses por ano (TARDY 1993).

Uma das zonas de encouraçamento atual mais importantes situa-se na África central; outras foram identificadas no Noroeste da Costa do Marfim, sob 1.600 mm anuais de chuvas (ESCHENBRENNER 1987), e ao sul de Mali, com 1.100 mm de precipitação (FREYSSINET 1990).

O perfil laterítico encouraçado comporta, a partir da rocha-mãe, os seguintes horizontes (TARDY 1993):

- um *saprolito grosso*, nas rochas com quartzo alguns minerais estão inalterados e outros mais ou menos intemperizados, mas a textura arenosa permanece, enquanto nas rochas sem quartzo o material de alteração possui textura mais fina e fragmentos da rocha em alteração;
- um saprolito fino, horizonte de alteração conservado onde os minerais, com exceção do quartzo, estão alterados em caulinita, goethita ou hematita.
- um *horizonte mosqueado*, onde tem início uma nodulação e acúmulo de ferro, dos quais se avizinham domínios descolorados de eluvições de ferro e argila, com domínios de porosidade fina em que o ferro se acumula na forma de hematita, ou ainda, com poros preenchidos por argila eluviada, enriquecida em ferro na forma de goethita. A hematita acumula-se nos plasmas caulínicos de porosidade fina; ambos os minerais associam-se até o topo do horizonte couraçado;
- uma *couraça pouco endurecida*, mais rica em ferro do que a argila mosqueada, mas que conserva, entretanto, o tipo de organização, que representa uma transição entre o horizonte mosqueado e a couraça;
- um *horizonte de desmantelamento e degradação da couraça*, evidenciado principalmente por sua esfoliação superficial goethítica.

Mesmo quando as condições pedoclimáticas são favoráveis à sua formação, como na África Central, as coberturas encouraçadas expõem pontos de fraquezas em que se degradam e se desmantelam, tais como em talvegues, bordas e partes centrais dos platôs (BEAUVAIS 1991, TARDY 1993), sendo possível admitir que a cobertura encouraçada não mais esteja em equilíbrio. Por outro lado, a couraça e a sequência de horizontes desenvolvem-se a partir do saprolito fino e se destroem em seu topo, rebaixando-se nas paisagens e passando a funcionar, então, como coberturas em equi-

líbrio. Segundo TARDY (1993), a velocidade desse rebaixamento é da ordem de 1 metro em 100.000 anos. Esses sistemas resistem mais à erosão do que as coberturas móveis, conforme testemunhado por inúmeros morros residuais de zonas tropicais em que elas não mais se encontram em equilíbrio. Mas longe de serem indestrutíveis, o estado de equilíbrio (por aumento ou diminuição da pluviosidade) provoca seu desaparecimento por ação química (verificar item III-2-a), ou por transformação em material móvel, conforme mecanismos descritos por BEAUVAIS *et al.* (1991).

4. Coberturas de solos ferralíticos vermelhos

FAUCK (1972) estudou solos ferralíticos vermelhos (equivalentes aos latossolos, *nota do tradutor*) sobre arenito, muito abundantes na África d'Oeste (Casamança, Burquina Faso, Daomé, Nigéria etc.). Em pluviosidade de 1.200 a 1.800 mm, marcada por uma estação chuvosa, como em Casamança e Burquina Faso, ou duas estações chuvosas, como Daomé e Togo, e temperatura média mensal de 28 °C, esses solos constituem coberturas homogêneas que ocupam modelados de platôs de fraca declividade. CHAUVEL (1977, Figura 10, seção C) assinala, igualmente em Casamança, presença de platôs com cobertura ferralítica vermelha espessa e homogênea sob uma pluviosidade média anual de 1.200 mm. Couraças ocorrem, inclusive, sobre a rocha-mãe nas zonas de ocorrência desses solos e são muito abundantes em Casamança, raras no Daomé e ausentes em Burquina Faso. Todavia, elas não parecem ligadas à gênese dos solos vermelhos, sendo, provavelmente, mais antigas.

O perfil representativo mais frequente apresenta os seguintes horizontes:

- um *horizonte húmifero* de 10 a 20 cm de espessura, cinza pouco escurecido, arenoso a areno-argiloso, com tendência particularmente porosa;
- um *horizonte de transição* com variações na cor e textura gradual em relação ao superior, com uma espessura entre 20 e 60 cm;
- um *horizonte "rubeficado"* com mais de 2 m de espessura, podendo frequentemente passar de 5 m, de cor avermelhada homogênea e textura variável de areno-argilosa a argilosa, porosidade elevada e rico em microagregados coesos que resistem à dispersão, denominados inicialmente pseudo-areias, e depois micronódulos (CHAUVEL 1977). A porosidade é alta;

- um *horizonte de transição para a rocha-mãe*, mosqueado de cores vermelha, ocre e branca, contendo usualmente fragmentos de arenito mais ou menos alterados.

FAUCK (1972) assinala que a textura dos horizontes “rubeficados” é pouco influenciada pela rocha-mãe e que o enriquecimento em argila no solo decorre sobretudo de uma acumulação relativa de uma importante dissolução de quartzo, que, junto à alumina migrada pela hidrólise da caulinita do horizonte acima, gera a neoformação desta, embora essas manifestações sejam morfologicamente pouco evidentes.

A vegetação de floresta densa parece favorecer a formação e manutenção dessas coberturas em equilíbrio, posto que em outros tipos de cobertura vegetal, como savana arbórea, savana arbustiva e culturas, elas se degradam superficialmente. No solo sob cultivo de Casamança, CHAUVEL (1977) prenunciou transformações ligadas a variações pedoclimáticas para pluviosidades anuais inferiores a 1.000 mm, conforme discutido no item III-A-2-b.

Os solos ferralíticos vermelhos desenvolvem-se igualmente sobre rochas básicas, particularmente expressivos no Brasil sob climas tropicais e subtropicais úmidos, com pluviosidades e temperaturas médias variando, respectivamente, de 2.000 a 1.500 mm e 25 a 16 °C. Diferenciam-se daqueles derivados de arenito por suas texturas muito argilosas, frequente presença de gibbsita, elevados teores de ferro e uma microagregação intensa, conhecida como “pó de café”; desenvolvem-se sobre espessa alteração gibbsítico-caulinítica do basalto (MELFI 1968, CARVALHO 1970, PÉDRO *et al.* 1976). Estudos detalhados em curso mostram a frequente presença de uma couraça em via de desmantelamento entre a alterita basáltica e o solo, a qual representa, então, a rocha-mãe do solo vermelho. Essa formação de latossolos vermelhos a partir de couraças ferruginosas foi igualmente observada na Amazônia Meridional, no limite floresta-cerrado sob gnaisse (NAHON *et al.* 1989). A frequência das linhas ou níveis dos nódulos ferruginosos na base dos latossolos, assinaladas por VOLKOFF (1984, 1985), parece apontar que as coberturas encouraçadas tenham sido, no passado, abundantes no Brasil; porém, a baixa ocorrência atual é atribuída por TARDY *et al.* (1988) às temperaturas mais baixas do que as observadas nas regiões encouraçadas africanas, bem como ao fato de os respectivos paleoclimas terem evoluído para úmido na América do Sul e de úmido a semiárido na África d'Oeste e Central.

5. Coberturas de solos ferralíticos amarelos

As coberturas amarelas, espessas, do tipo ferralíticas, desenvolvidas em modelados de platôs mais ou menos ondulados, foram identificadas em numerosas regiões tropicais úmidas. A lista a seguir não chega a ser exaustiva: nos platôs da Amazônia média, em ambas as margens do rio Amazonas, sobre formações sedimentares quartzo-cauliníticas; em platôs ondulados sobre o embasamento cristalino, a nordeste da Guiana Francesa; em platôs da zona florestal ao sul da República dos Camarões; em platôs sobre xistos-calcários de Bouenza, no Congo, etc.

Nós tomamos como exemplo a cobertura pedológica dos platôs da Amazônia média, sob clima tropical úmido, com pluviosidade de 2.500 mm (LUCAS 1989). O perfil vertical comporta três associações principais (Figura 2). O conjunto inferior é representado pela alterita branca de um sedimento quartzo-caulinítico afetado por transformações pedológicas. No conjunto médio, de baixo para cima, verifica-se uma forte dissolução de quartzo e uma neoformação de caulinita na forma de um plasma argiloso compacto, além do desenvolvimento progressivo de nódulos ferruginosos e gibbsíticos. O conjunto superior é muito argiloso, vermelho-amarelo, com fase microagregada descontínua; em sua base exibe uma dissolução desses nódulos. A base de ambos os conjuntos superiores corresponde a frentes de transformação, nítidas ou difusas, cada qual se aprofundando no conjunto subjacente por efeito de determinados processos (Figura 3).

A evolução da cobertura pedológica no modelado é acompanhada do rebaixamento da respectiva superfície topográfica, em razão das perdas de matéria que acompanham as transformações. A importância e a velocidade desse aprofundamento podem ser avaliadas por cálculos baseados nas exportações dos elementos dissolvidos nas bacias hidrográficas elementares associadas (LUCAS *et al.* 1989). O rebaixamento da superfície topográfica correspondente à formação do perfil atual situa-se entre 21 e 222 m, com base nas hipóteses sobre o teor de quartzo no sedimento, sendo mais provável o valor correspondente a 40 m; a velocidade de decréscimo da topografia, nas condições de funcionamento atual, é da ordem de 100 mil anos. A própria pedogênese funciona, então, como um poderoso agente de aplainamento, sem que se produzam importantes modificações na cobertura dos solos, considerando à parte seu espessamento, que justifica a denominação *cobertura em equilíbrio*.

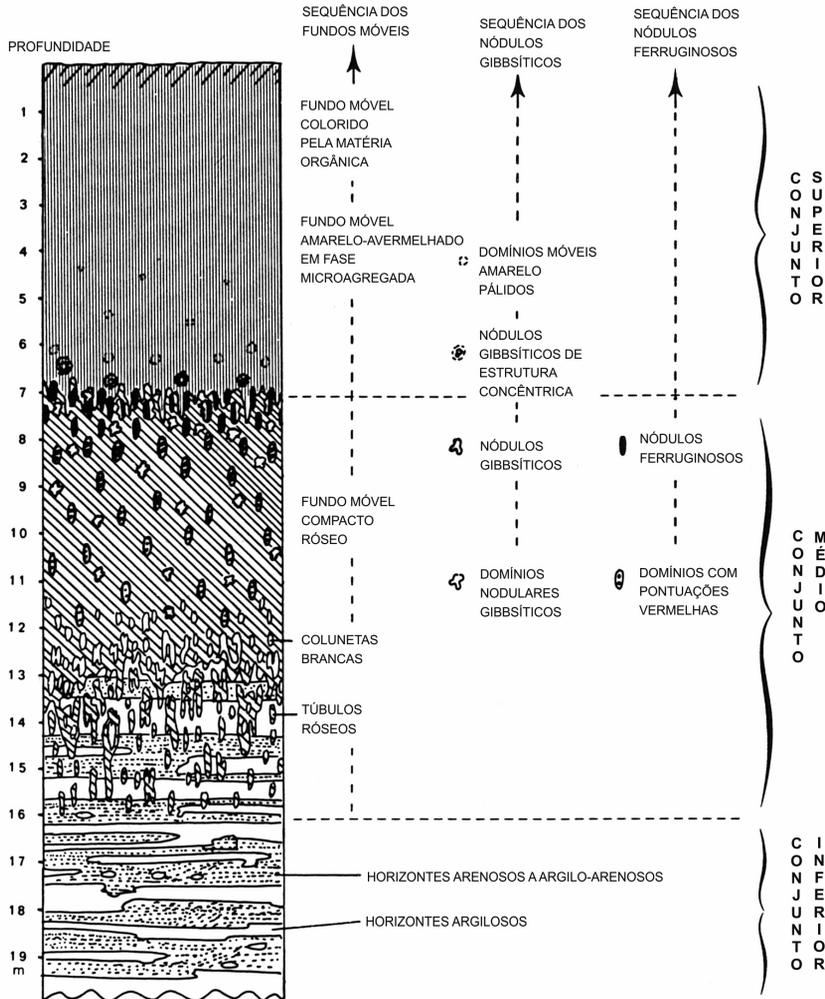


FIGURA 2 – Esquema da organização vertical dos solos de platôs da região norte de Manaus (LUCAS 1989).

Nesse tipo de cobertura, a maior parte das sequências genéticas da organização mostram-se contínuas da base ao topo do perfil (no exemplo presente, tratam-se de diferenciações progressivas dos plasmás e nódulos, seguidas de uma transformação em plasma móvel). Entretanto, podem permanecer no interior do perfil organizações pertencentes a sequências de organizações que já desapareceram; são as relíquias de evoluções antigas, diferentes da atual. Nas coberturas de Manaus observam-se, por exemplo, nódulos hematíticos negros ou blocos de couraça hematítica na parte superior do conjunto médio, para os quais não é possível identificar termos precursores. Seu estudo detalhado leva a considerá-los relíquias de uma couraça que hoje está quase inteiramente desaparecida. Contudo, na África intertropical reconhecem-se atualmente nume-

rosos exemplos dessas transformações (BITOM 1988, BEAUVAIS & TARDY 1991, BILONG *et al.* 1992).

III COBERTURAS EM DESEQUILÍBRIO OU SISTEMAS DE TRANSFORMAÇÃO

Quando os fatores que determinam o pedoclima mudam suficientemente para que a cobertura pedológica perca as condições de equilíbrio, ela se transforma em outra cobertura que tende a restabelecer um novo equilíbrio com as presentes condições pedoclimáticas. Essas mudanças têm início nos locais de transformações máximas do pedoclima, na maioria das vezes nas partes baixas das vertentes, mas também nos topos dos interflúvios, progredindo lateralmente; por isso, o conjunto cobertura inicial-cobertura transformada é considerado um *sistema de transformação*.

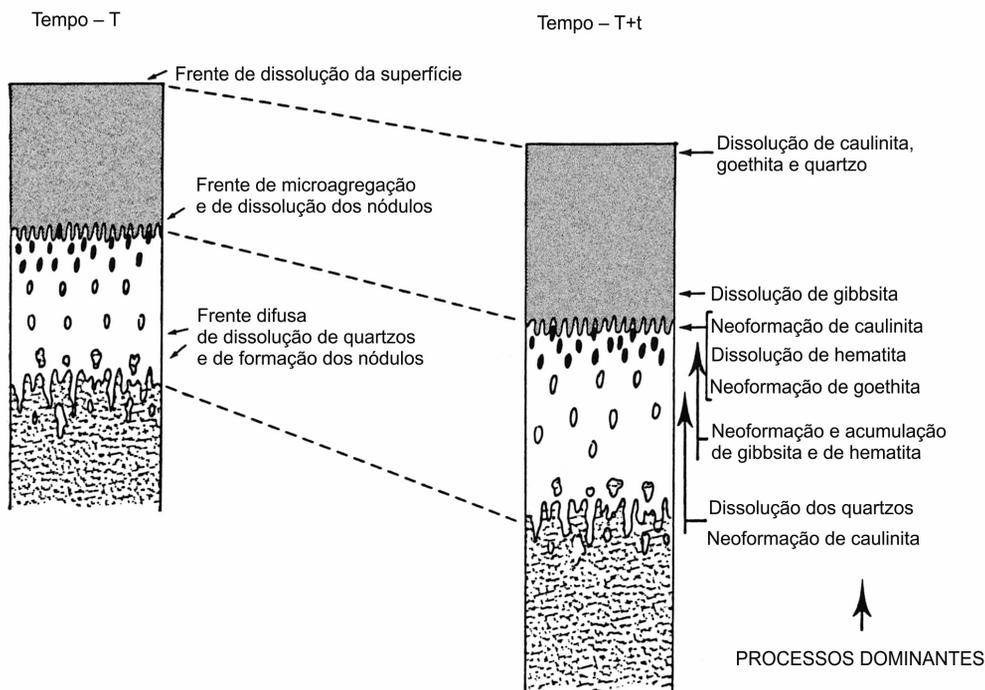


FIGURA 3 – Evolução dos solos por aprofundamento e processos geoquímicos no perfil vertical (solos de platôs da região norte de Manaus) (LUCAS 1989).

Esse tipo de cobertura foi identificado e bem descrito em zona tropical seca com estações contrastantes, mas também na zona tropical úmida. Na primeira, as transformações laterais desempenham um papel de aplainamento do relevo, cuja importância foi assinalada por Millot em diversas oportunidades (MILLOT 1980a, b; 1982).

A – SISTEMAS DE TRANSFORMAÇÃO NA ÁFRICA, ENTRE A ZONA TROPICAL ÚMIDA E O SAARA.

1. Sistemas de transformação superficial: relações eluviação-erosão

Nós tomamos como exemplo a transformação de coberturas esmectíticas da região seca do Sahel (BOULET 1974), que em Burquina Faso estão sobre granito em equilíbrio a pluviosidades anuais superiores a 600 mm; quando mais fracas, elas não se umedificam mais do que a uma profundidade inferior ao perfil diferenciado, que se transforma no topo. O sistema de transformação em questão é caracterizado pela alternância de dois tipos de solos ao longo das vertentes de fra-

ca declividade (em torno de 0,3%): os solonetz, com um horizonte superior arenoso sobrepondo um argiloso colunar, e os solos brunos subáridos, com um horizonte argiloso de estrutura cúbica (Figura 4). Os solos bruno subáridos derivam dos solonetz mediante erosão do horizonte superficial arenoso, por efeito da desconexão provocada pela circulação da água no contato areia-argila. As colunetas dos solonetz desnudadas adquirem, então, uma estrutura cúbica decorrente das alternâncias de umectação-ressecamento. A areia erodida acumula-se a uns 50 m adiante, devido à fraca competência do escoamento superficial, e as colunetas se refazem pela ação da água no contato areia-argila. Isso favorece igualmente a separação plasma-esqueleto do material argiloso, passando a alimentar o horizonte arenoso superior. Observa-se, então, uma relação pedogênese-erosão mecânica em que o primeiro mecanismo prepara os materiais arenosos para, a seguir, serem mobilizados pela circulação hipodérmica e posteriormente superficial da água. Como resultado, de um lado tem-se o adelgaçamento progressivo dos solos, e de outro, a formação de extensos *glacis* com declives muito fracos que emolduram as planícies desérticas.

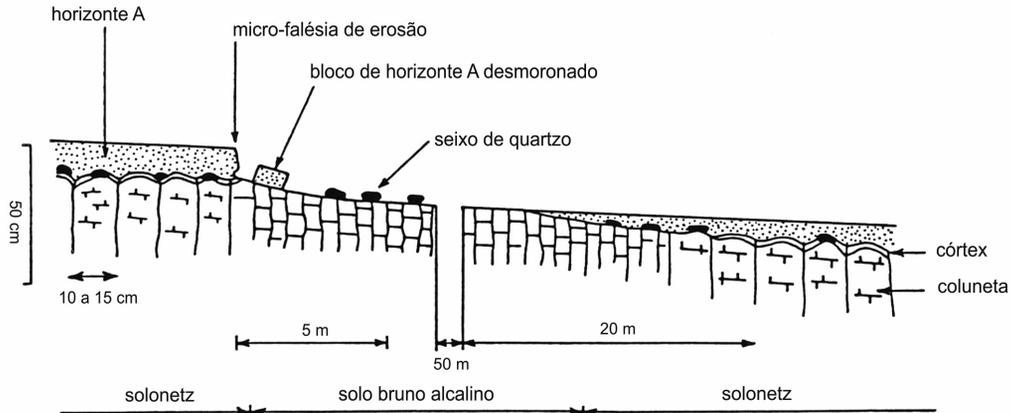


FIGURA 4 – Sistema com ligações eluviação-erosão em topossequência de Tassamakat, Burquina Faso (BOULET 1974). Reproduzido com autorização de ORSTOM.

2. Sistemas de transformação interna

A maior parte dos outros sistemas de transformação identificados até o presente na África, entre a zona tropical e o Sahel, é constituída por uma cobertura inicial caulinitica móvel ou encouçada que se transforma, seja por transferência de matéria no interior da vertente, seja por uma reorganização *in situ* ou a curta distância.

a) Sistemas com transferências laterais: os sistemas eluviais-iluviais

- Sistemas com cobertura móvel

Os primeiros estudos que identificaram coberturas com discordâncias entre horizontes foram realizados por BOULET (1974) em Burquina Faso, colocando em evidência a transformação de uma cobertura inicial caulinitica móvel, pela subtração de matéria a montante e acúmulo correlativo a jusante. A cobertura estudada em Garango, sob clima sudano-saheliano (900 mm anuais de chuva) está situada no sopé de um *inselberg* granítico, com um domínio ferralítico a montante (Figura 5 IV), caracterizado por uma sequência genética vertical de organizações elementares. A partir do quarto superior da vertente, este domínio passa lateralmente, de maneira rápida, a um material arenoso eluviado que surge na forma de bisel em profundidade. Essa transição constitui uma frente de transformação na qual se observa uma dissociação plasma-esqueleto, com exportação do plasma em direção a jusante, através do material arenoso e com certa concentração rela-

tiva do esqueleto. Essa frente de transformação progride de baixo para cima e de jusante a montante nos horizontes do solo ferralítico. O plasma exportado migra segundo dois itinerários: as partículas mais grossas decantam-se em um horizonte de acúmulo na base do material arenoso eluviado; as mais finas e as substâncias dissolvidas migram lateralmente em direção a jusante do material arenoso, acumulando-se em línguas que se estendem no sentido jusante-montante, propiciando uma neoformação massiva de esmectitas. A perda de matéria por eluviação, no domínio a montante, provoca um rebaixamento do modelado, que progride no sentido jusante-montante da paisagem e, além disso, libera um material arenoso propício à erosão hídrica superficial.

Observações disseminadas em latitude permitem atribuir a existência desses sistemas de transformação a uma condição de desequilíbrio das coberturas ferralíticas iniciais, atribuída a uma evolução do clima para condições secas. Ocupam uma extensão geográfica importante em Burquina Faso e ao norte da República do Togo, sobre arenito; foram igualmente caracterizados ao norte da República dos Camarões (BRABANT 1990, BRABANT & GAVAUD 1990) e reconhecidos a noroeste da África Central. No Nordeste brasileiro, sistemas correlatos foram identificados por SOUBIÈS & CHAUVEL (1984). No Chade, as topossequências estudadas por BOCQUIER (1971) comportam-se como sistemas de transformação da mesma natureza, mas que já consumaram a transformação do domínio caulinitico a montante, não mais existente.

- *Sistemas com cobertura ferruginosa endurecida*

Na zona desértica

Após ter estudado couraças e crostas calcárias no Senegal e na Mauritània, onde elas se desenvolvem de maneira individualizada a

600-700 mm anuais de precipitação média, em função do tipo de rocha-mãe (rica em ferro ou em cálcio), NAHON (1976) demonstrou, no clima desértico da Mauritània (20 a 40 mm anuais de chuvas), a interpenetraçãõ desses dois tipos de formas endurecidas sobre um mesmo tipo de rocha-mãe, um migmatito.

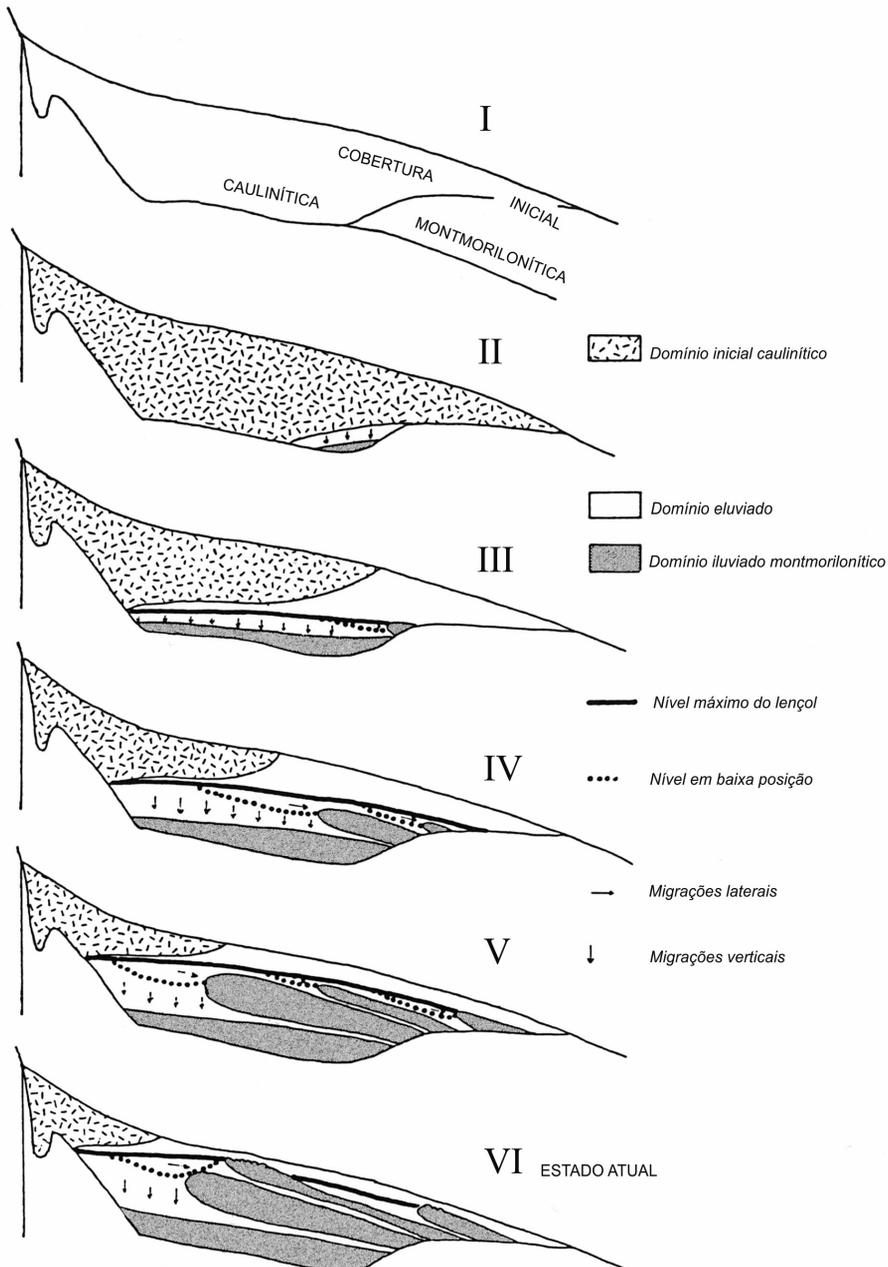


FIGURA 5 – Estádios de evolução da cobertura de Garango II (Burquina Faso), reconstituídas a partir da organização e dinâmica atuais (BOULET 1974). Reproduzido com autorização de ORSTOM.

Em Inkebdene, o local estudado apresenta um morro testemunho coroado por uma couraça desmantelada, cujos componentes finos contêm conjuntamente caulinita e esmectita, esta última aumentando em direção à base, onde se individualizam nódulos calcários e ilhotas da laje calcária muito endurecida envolvendo blocos ferruginosos (Figura 6). Esse nível em blocos passa a um horizonte esmectítico rico em seixos e areias quartzosas com nódulos calcários frequentes; abaixo, 2 a 3 m de material esmectítico com nódulos calcários sobrepõe-se à rocha muito dura e pouco alterada. Em relação aos perfis encouraçados meridionais, constata-se o desaparecimento do manto caulinitico, às vezes adelgado e invadido pela esmectita. Segundo LEPRUN (1977, 1979), o horizonte com seixos quartzosos poderia constituir o vestígio do horizonte de destruição da couraça por via geoquímica, tal como se observa em Burquina Faso (item A-2-a). Rumo ao norte, mais árido, as couraças ferruginosas desaparecem progressivamente. Apenas vestígios são encontrados sob a forma de fragmentos arredondados aprisionados nas crostas calcárias.

As couraças ferruginosas e crostas calcárias têm sido frequentemente consideradas armaduras de proteção das paisagens contra a erosão. Para NAHON (1976), esta situação é uma falsa proteção, uma vez que elas mais “corroem” as paisagens do que as protegem.

Na zona sudano-saheliana

As couraças ferruginosas sobre embasamento cristalino da África Ocidental seca estudadas por

LEPRUN (1977, 1979) são afetadas por uma “fonte geoquímica interna”, tanto a partir de sua base (Figura 7), como no seu interior. Essa destruição se processa pelas águas de percolação, cuja exportação do ferro reparte inicialmente a couraça em fragmentos, cada vez menores, deixando no local apenas minerais primários, principalmente quartzo na forma de seixos e areias esbranquiçadas; a argila liberada acumula-se na base do horizonte iluvial (Figura 7). O último estágio consiste no desaparecimento da couraça, restando apenas vestígios dos seus fragmentos.

De acordo com LEPRUN (1972), se a degradação superficial, de caráter mecânico dominante, desempenhar um papel na retificação do topo da couraça, isso parece mostrar que as degradações geoquímicas preponderam na destruição e desaparecimento das couraças. Esse “descouraçamento” não afeta igualmente todas as porções do modelado na zona sudano-saheliana estudada, mas poderá, como ocorre em Thion, provocar um desaparecimento remontante da couraça. No caso das couraças em franco declive, a meia encosta é afetada, com a porção montante evoluindo na forma de morro testemunho, enquanto a couraça a jusante se enterra; se o modelado encouraçado for convexo-côncavo, o que é mais raro, a montante transforma-se numa unidade fragmentária, enquanto a jusante ainda persiste a couraça. Entretanto, ao se deslocar para o norte, em direção ao deserto, acentua-se a destruição das couraças, até o seu desaparecimento por completo, excetuando-se alguns testemunhos na forma de blocos ou nódulos que se disseminam na superfície dos *regs* desérticos ou dos morros testemunhos.

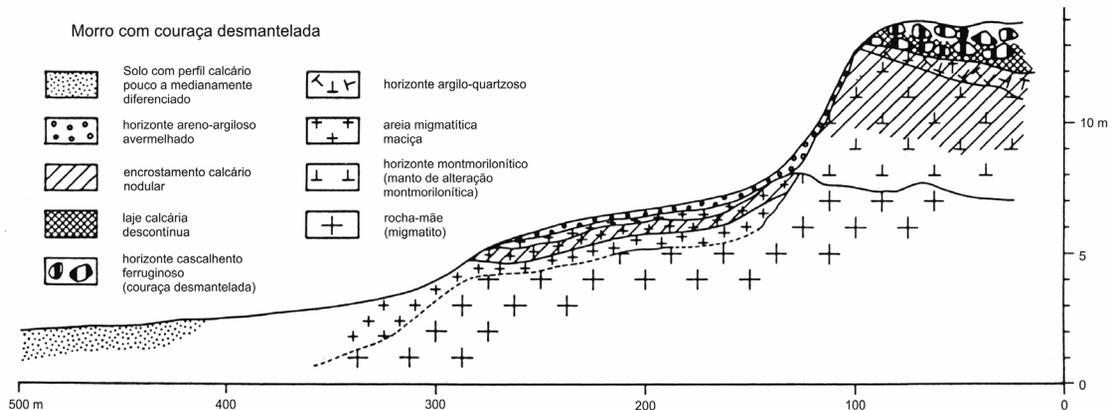


FIGURA 6 – Topossequência de Inkebdene, Mauritània (NAHON 1976). Reproduzido com autorização de *Sciences Géologiques*.

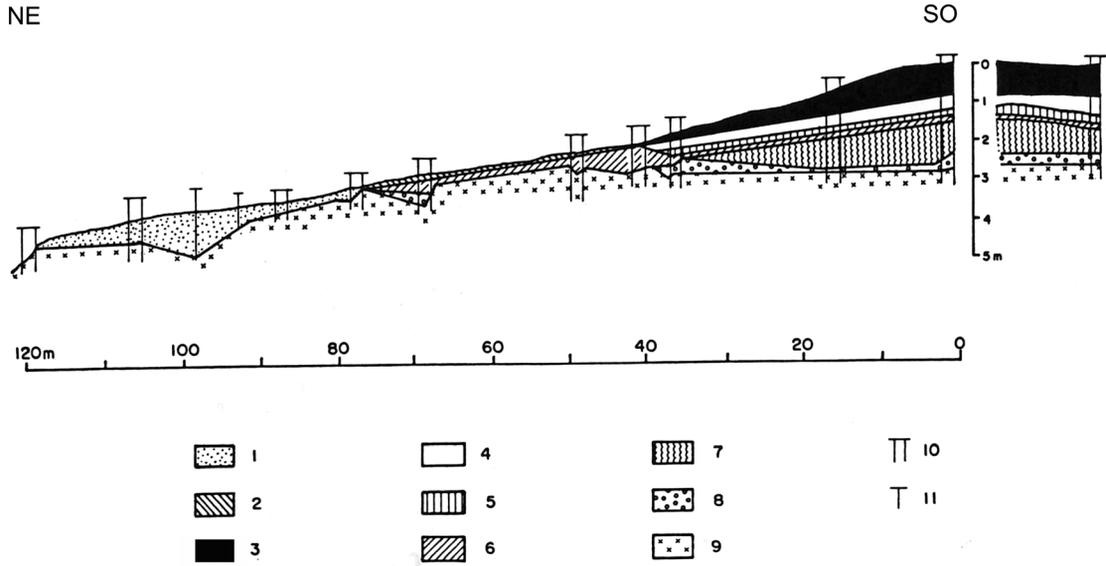


FIGURA 7 – Topossequência de Inkebdene, Mauritània (NAHON 1976). Reproduzido com autorização de *Sciences Géologiques*. 1 horizonte arenoso; 2 horizonte A1; 3 couraça ferruginosa; 4 horizonte eluvial; 5 horizonte iluvial; 6 horizonte poliédrico; 7 horizonte de alteração vértica com nódulos calcários; 8 areia; 9 migmatito; 10 trincheira de observação; 11 tradagem.

Na zona sudano-guineana

Ao norte da Costa do Marfim, o estudo multidisciplinar Hyperbav associou, em particular, hidrólogos e pedólogos, e analisou, de maneira completa, uma ba-

cia elementar de 1,35 Km² sobre gnaiss, a uma pluviosidade de 1.350 mm anuais. O estudo pedológico empreendido por FRITSCH *et al.* (1990) revelou que a cobertura do solo divide-se em dois domínios que comportam diversos sistemas (Figura 8).

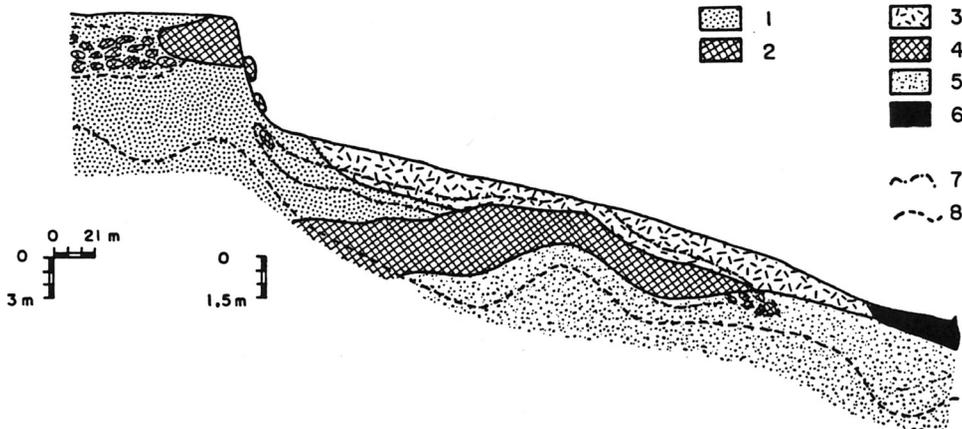


FIGURA 8 – Hyperbav – Costa do Marfim (FRITSCH *et al.* 1990). Reproduzido com autorização de ORSTOM. Domínio ferralítico: 1 - sistema de solo vermelho; 2 - sistema encouraçado de vertente
Domínio ferruginoso: 3 - sistema de degradação superficial; 4 - sistema encouraçado de vertente; 5 - sistema hidromórfico; 6 - sistema aluvial; 7 - conjunto cascalhento; 8 - topo da alterita.

O exame da figura 8 permite constatar que o *domínio ferralítico* a montante comporta um sistema de solo vermelho microagregado e um sistema encouaçado que constitui os restos de um platô encouaçado limitado por tálus, que ocupa igualmente a parte superior da vertente. O *domínio ferruginoso e hidromórfico* a jusante comporta um sistema de degradação superficial, um sistema encouaçado de vertente, um sistema hidromórfico e um sistema aluvial.

O *sistema de degradação superficial* dispõe-se em discordância sobre o domínio ferralítico a montante e se estende ao resto da vertente, mostrando de baixo a alto, sobretudo de montante a jusante, variações na cor, que passa de ocre a vermelha e depois a branca, com diminuição de componentes finos (caulinita e óxi-hidróxidos de ferro) e modificação na estrutura, que passa de fragmentar a maciça.

O *sistema encouaçado de vertente* apresenta-se em forma de diedro, aflorando ou sub-aflorando na meia encosta. A montante ele se forma em detrimento dos horizontes vermelhos e da porção

superior das alteritas do domínio ferralítico, em discordância no limite solo-alterita. Uma diferenciação ferruginosa progride das zonas espaiadas vermelhas e claras para uma carapaça e, em seguida, para uma couraça que se exhibe no topo do diedro, perto da superfície (couraça vermelha escura a negra) e a jusante, em profundidade (couraça amarelo ocre), que se desmantela quando invadida pelo sistema hidromórfico.

O *sistema hidromórfico* apresenta-se sob a forma de uma língua que aflora a jusante e se aprofunda na vertente a montante (Figura 9); forma-se em detrimento dos dois sistemas precedentes e do manto de alteração, recortando a transição solo-alterita a montante e o sistema couraçado a jusante. De montante a jusante, observa-se inicialmente uma sucessão de transformações com limites embutidos caracterizados por um embranquecimento e pela aquisição de uma textura cada vez mais arenosa. Na porção totalmente a jusante aparecem horizontes de acúmulo de argilas cauliniticas e esmectíticas em línguas superpostas, comparáveis às de Garango (item IIA-2-a).

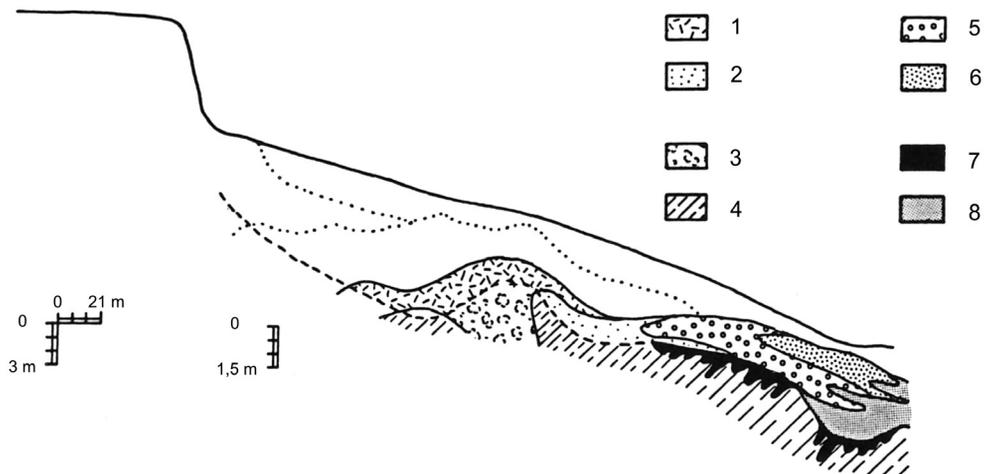


FIGURA 9 – Hyperbav. As alterações e diferenciações do sistema hidromórfico (FRITSCH *et al.* 1990). Reproduzido com autorização de ORSTOM. O *subsistema pseudo-glei e glei* revela as seguintes feições numeradas: 1 - horizonte mosqueado com retículo endurecido com praias brancas; 2 - horizonte mosqueado de amarelo, ocre ou vermelho, com fundo branco a cinza, argiloso a argilo-arenoso; 3 - isalterita marmórea: retículos vermelhos bordejados de amarelo em fundo branco; 4 - isalterita hidromórfica: camadas subverticais amarelas, branco vítreas, cinza esverdeadas ou azuladas. O *subsistema eluvial-iluvial* comporta: 5 - horizonte branco a cinza com marmorizações ocre, amarelas e amarelas pálidas; 6 - horizonte branco a cinza, com ou sem marmorizações amarelo pálidas; 7 - veios subverticais cinzentos de caráter vértico na isoalterita; 8 - horizonte cinza gris areno-argiloso a argilo-arenoso com cutãs de iluviação.

Dois tipos de processos podem ser distinguidos nessa cobertura complexa. Um deles responde por um acúmulo absoluto de ferro no sistema encouraçado, que os autores assinalam ser litodependente, situado acima de um compartimento de rocha-mãe mais rica em ferro. O outro tipo revela uma perda de constituintes finos (óxidos de ferro e depois argila), os quais são, na sua maioria, exportados para fora da bacia. Essas exportações são particularmente significativas na parte baixa da vertente, e, por rebaixamento da superfície topográfica, provocam a exposição de uma couraça e a formação de talvegues secundários. Segundo PLANCHON & JANEAU (1990), o funcionamento hidrodinâmico à escala de vertente mostra que o desenvolvimento de talvegues secundários decorre de um determinismo interno, cujo motor é a circulação no interior do solo, ao longo dos eixos preferenciais. Assim, a própria formação dos eixos de drenagem estaria sob a dependência da dinâmica interna da cobertura pedológica, que funcionaria como um elemento de conexão na sequência latitudinal dos sistemas de transformação, em que se constata, de fato, o surgimento de sistemas eluviais-iluviais, que ocupam para o norte uma extensão mais importante, invadindo a maior parte das paisagens.

b) Sistemas de reorganização *in situ* (CHAUVEL 1976)

A sudoeste de Casamança, a uma pluviosidade anual média de 1.200 mm, a paisagem é constituída por platôs com solos ferralíticos avermelhados microagregados sem discordância de horizontes (conforme II-D), assentados sobre arenitos com lentes argilosas. Deslocando-se para o nordeste, onde as condições climáticas são mais quentes e mais contrastadas, elas propiciam o aparecimento de solos beges nos centros ligeiramente deprimidos dos platôs, ficando os solos vermelhos limitados a ilhotas periféricas.

Trata-se de um sistema de transformação que tem início com a evolução do clima para um tipo seco, no qual os solos beges avançam lateralmente às custas dos solos vermelhos. A transformação é consequência: (1) da modificação da estrutura microagregada do solo vermelho sob o efeito de contrações hídricas na estação seca; (2) da mobilização do ferro fixado nos pontos de troca da caulinita; (3) da dispersão consecutiva da argila, que se redistribui no perfil. Resulta, assim, um solo bege cuja baixa permeabilidade facilita seu arraste erosivo, induzindo uma evolução do modelado esquematizada na figura 10.

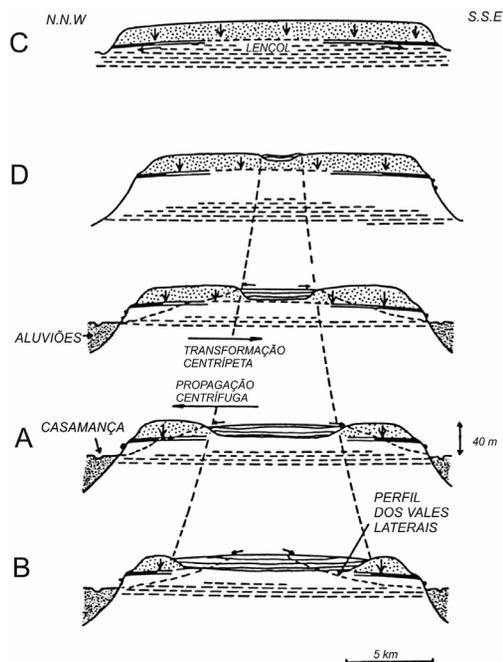


FIGURA 10 – Supostas etapas sucessivas da evolução de um platô da Média Casamança vista em corte (CHAUVEL 1977). Reproduzido com autorização de ORSTOM.

Os sistemas de regiões tropicais com estações contrastadas, acima descritos, atuam sobre o modelado de duas maneiras. A primeira é direta e resulta de processos internos da cobertura pedológica, tratando-se de degradações e transferências de matéria em formas dissolvidas ou de micropartículas, ou da transformação local com perda de volume. O balanço em volume da ação desses mecanismos não é forçosamente muito importante na escala de evolução da paisagem. A segunda é indireta e, certamente, mais importante em termos de balanço. Os processos internos liberam um material facilmente mobilizável para a erosão mecânica de superfície (essencialmente a erosão em lençol), no qual as ligações ferro-argila-esqueleto ou ferro-esqueleto já foram destruídas. Elas podem igualmente provocar uma diminuição da permeabilidade dos horizontes superficiais, o que favorece o escoamento superficial.

B – SISTEMAS DE TRANSFORMAÇÃO EM REGIÕES TROPICAIS ÚMIDAS

1. Sistemas de transformação solos ferralíticos-podzóis

a) Região de Manaus (LUCAS 1989)

Se os platôs da região de Manaus, sob 2.500 mm anuais de chuva, como visto acima, apresen-

tam uma cobertura em equilíbrio e sem discordância de horizontes, as vertentes que entalham vales com 25 a 30 m de desnível revelam um sistema de transformação que substitui gradualmente os solos ferralíticos argilosos por podzóis gigantes e o molhado de platô por outro, o de colinas baixas.

O início da transformação corresponde à formação de vertentes convexas com declives íngremes (Figura 11a), sobre as quais se desenvolve uma perda progressiva de argila (Figura 12) e a consequente instalação de um sistema eluvial que possibilita a exportação lateral de soluções das alterações. Nesse estágio, os escoamentos nos fundos de vale chatos dão-se unicamente de maneira sub-superficial, na base dos horizontes arenosos pouco espessos, sem escoamento superficial. A forma convexa das vertentes e a natureza dos escoamentos de fundo de vale indicam uma evolução de relevo essencialmente geoquímica, interpretação esta em

conformidade com as estimativas de arrastes obtidas por umidimetria com sonda de nêutrons ao longo de vertentes da mesma região (PIMENTEL DA SILVA *et al.* 1992), que não evidenciam qualquer redistribuição de água por arrastes superficiais sob floresta. Como a transformação progride, os solos empobrecidos da baixa vertente evoluem no sentido jusante-montante e o embranquecimento podzólico surge a partir de um determinado limite granulométrico (2 a 4% da fração argila). A importante migração de matéria numa grande espessura do solo, relacionada a esta evolução, provoca a formação progressiva de vertentes alongadas, ligeiramente convexas (Figura 11c). Dessa forma, a paisagem de platôs é gradualmente substituída por uma paisagem na qual o platô inicial apenas subsiste em formas residuais, com a maior parte da paisagem dominada por baixas vertentes sob podzolização (quarto SW da carta, na figura 13).

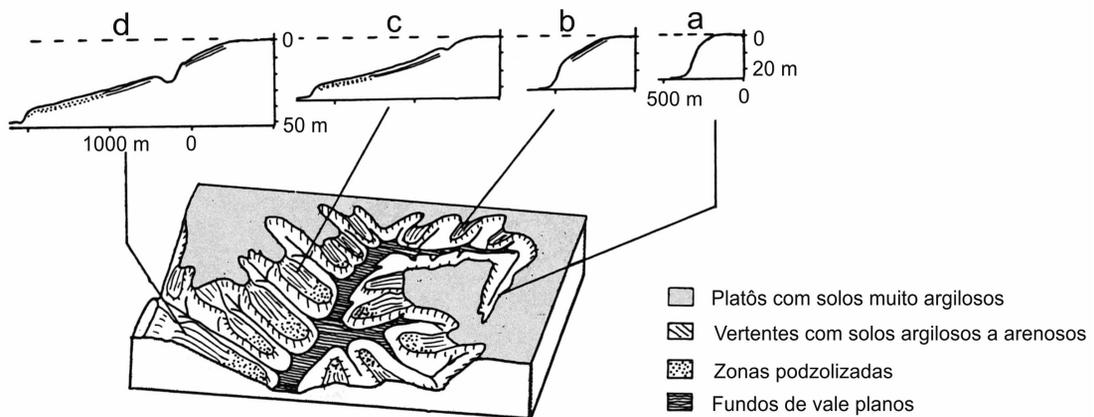


FIGURA 11 – Representação esquemática dos diferentes tipos de vertentes da região norte de Manaus (LUCAS 1989).

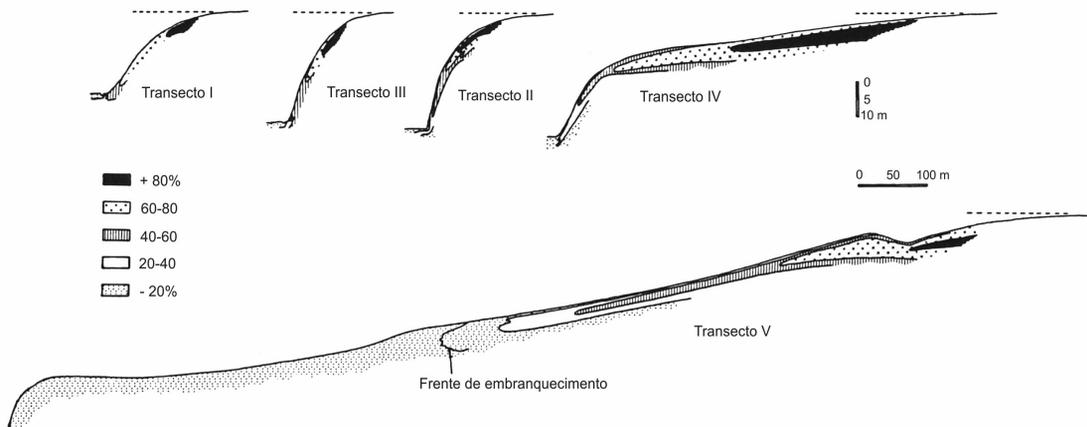


FIGURA 12 – Distribuição da fração menor que 2 micra nos solos de vertentes da região norte de Manaus. Mesma escala para todos os transectos (LUCAS 1989).

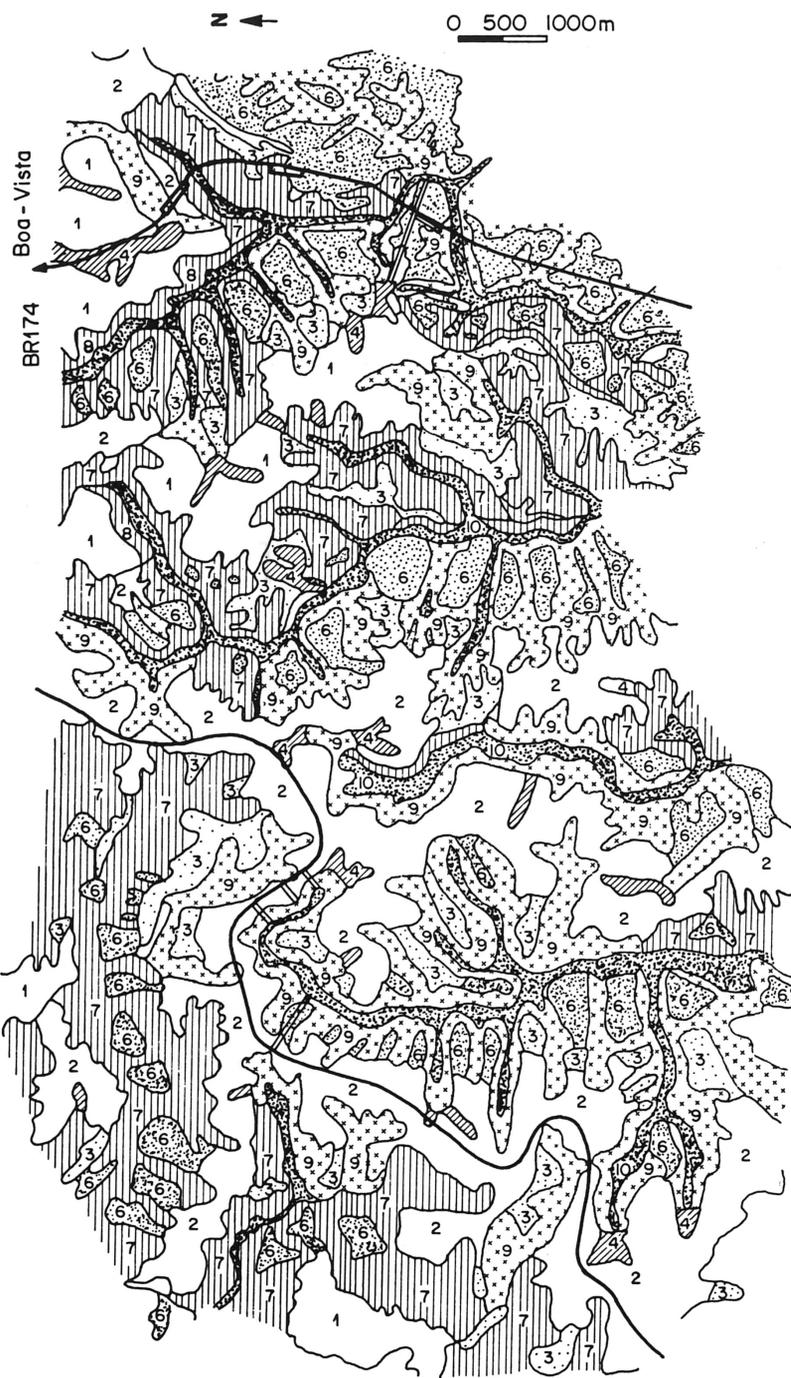


FIGURA 13 – Morfologia da região norte de Manaus a partir de fotografias aéreas na escala 1: 50.000 (LUCAS 1989).

1 - platôs de superfície muito plana; 2 - platôs em superfície suavemente ondulada; 3 - restos de platô em continuidade, abaulado e ligeiramente inclinado para o eixo da drenagem; 4 - vale interior dos platôs com declives e desnivelamentos fracos; 5 - vertente entre platô e superfície intermediária com forte declive regular e desnivelamentos em torno de 20 m; 6 - superfície intermediária ligeiramente abaulada quando estreita, ou côncava quando expandida, ligeiramente inclinada para o eixo da drenagem, com altitude inferior à do planalto; 7 - vertentes irregulares com numerosos pequenos eixos de drenagem secundários e declives e desnivelamentos médios a fortes; 8 - vertentes regulares com declives e desnivelamentos médios a fortes; 9 - vertentes com declives e desnivelamentos médios a fracos; 10 - vale de fundo chato. Declives – fortes: 20% ou mais; médios: 10 a 20%; fracos: menores que 10%. Desniveamentos – fortes: 20 m ou mais; médios: 10-20 m; fracos: menores que 10 m.

Essa transformação corresponde a um rebaixamento médio da paisagem da ordem de uns 20 m. No estado atual de conhecimentos é difícil avaliar a velocidade de evolução desses sistemas de transformação, mas, pela própria existência das vertentes, essa velocidade é evidentemente superior à do rebaixamento geoquímico dos platôs. Uma ordem de grandeza pode ser estimada por extrapolação de datações efetuadas em sistemas ferralíticos da Guiana Francesa, que mostram a progressão lateral de uma transformação de 0,5 a 2 m em 100 anos (TURENNE 1975). Em sendo a extensão das vertentes podzolizadas da região de Manaus de ordem quilométrica, sua evolução iria demandar, então, de 500 mil a 2 milhões de anos.

b) Guiana Francesa

Sistemas solos ferralíticos-podzóis são desenvolvidos na Guiana Francesa sob uma pluviosidade anual de 2.000 a 3.500 mm, tanto sobre o embasamento cristalino (VEILLON 1990), como

em sedimentos marinhos costeiros (TURENNE 1975, LUCAS *et al.* 1987); em ambos os casos, atinge-se um aplainamento mais expressivo para o embasamento, onde a espessura dos materiais afetados é maior. Nos platôs ondulados ou nas colinas amplas do embasamento (Figura 4), a transformação dos solos ferralíticos argilo-arenosos em podzóis arenosos tem início no centro dos interflúvios (Figura 14B), com a migração de argilas provocando seu considerável abatimento geoquímico (Figura 14C). Essa subsidência provoca o afloramento do lençol freático no meio do interflúvio, dando origem a eixos de drenagem encharcados e precariamente hierarquizados (Figura 14D). A progressão da transformação do centro para a borda do interflúvio induz a formação de um modelado suavizado, quase inteiramente podzolizado, com colinas reliquiais de solos ferralíticos muito transformados, posto que agora se tratam de areias vermelhas com pouca argila (Figura 14E), cujo modelado podzolizado está rebaixado uns 20 m em relação ao relevo inicial.

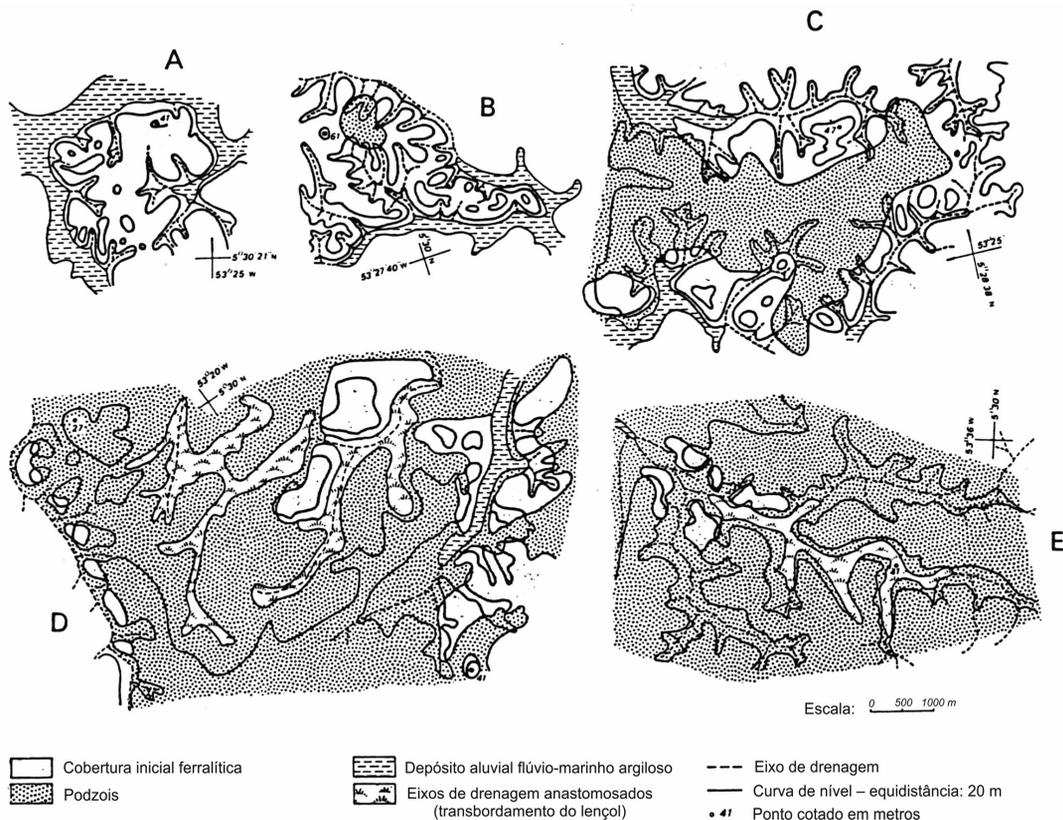


FIGURA 14 – Exemplos de unidades de modelado em diversos estádios de evolução do sistema de transformação solos ferralíticos-podzóis na Guiana Francesa (região de Organabo), sobre embasamento cristalino (BOULET *et al.* 1984). Reproduzido com autorização de AFES.

c) Bacia do Alto Rio Negro

Os trabalhos realizados na bacia do Alto Rio Negro por DUBROEUCQ & BLANCANEUX (1987) possibilitam associar uma seqüência de coberturas pedológicas às diversas formas de relevo da bacia, para as condições locais de 3.000 mm de chuvas por ano (DUBROEUCQ *et al.* 1991). Partindo do modelado mais elevado para o mais rebaixado, observa-se a seqüência mostrada na figura 15: colinas altas com solos ferralíticos amarelo-avermelhados muito profundos; colinas aplainadas com solos ferralíticos amarelos argiluvitados com horizontes nodulares; colinas muito aplainadas com solos ferralíticos amarelos pouco profundos e humíferos; planície com podzóis e solos ferralíticos amarelos com gibbsita frequentemente em ilhotas residuais. Com base em dados cartográficos, esta sucessão de

coberturas é interpretada como uma seqüência evolutiva, cuja ação geoquímica provoca um rebaixamento do relevo de 70 m.

2. Sistemas de transformação sobre embasamento cristalino com basculamento de drenagem

Sistemas dessa categoria evoluem pela substituição de uma cobertura ferralítica, onde a dinâmica da água é essencialmente vertical, por uma cobertura ferralítica de dinâmica superficial e lateral. Foram identificadas em paisagens “meias-laranjas” da Guiana Francesa, sobrepondo rochas xistosas ou migmatitos, em pluviosidade de 3.000 mm anuais (BOULET 1978, BOULET *et al.* 1979, FRITSCH 1979, BOULET 1983). As coberturas pedológicas sobre xistos ordenam-se conforme a seqüência genética esquematizada na figura 16.

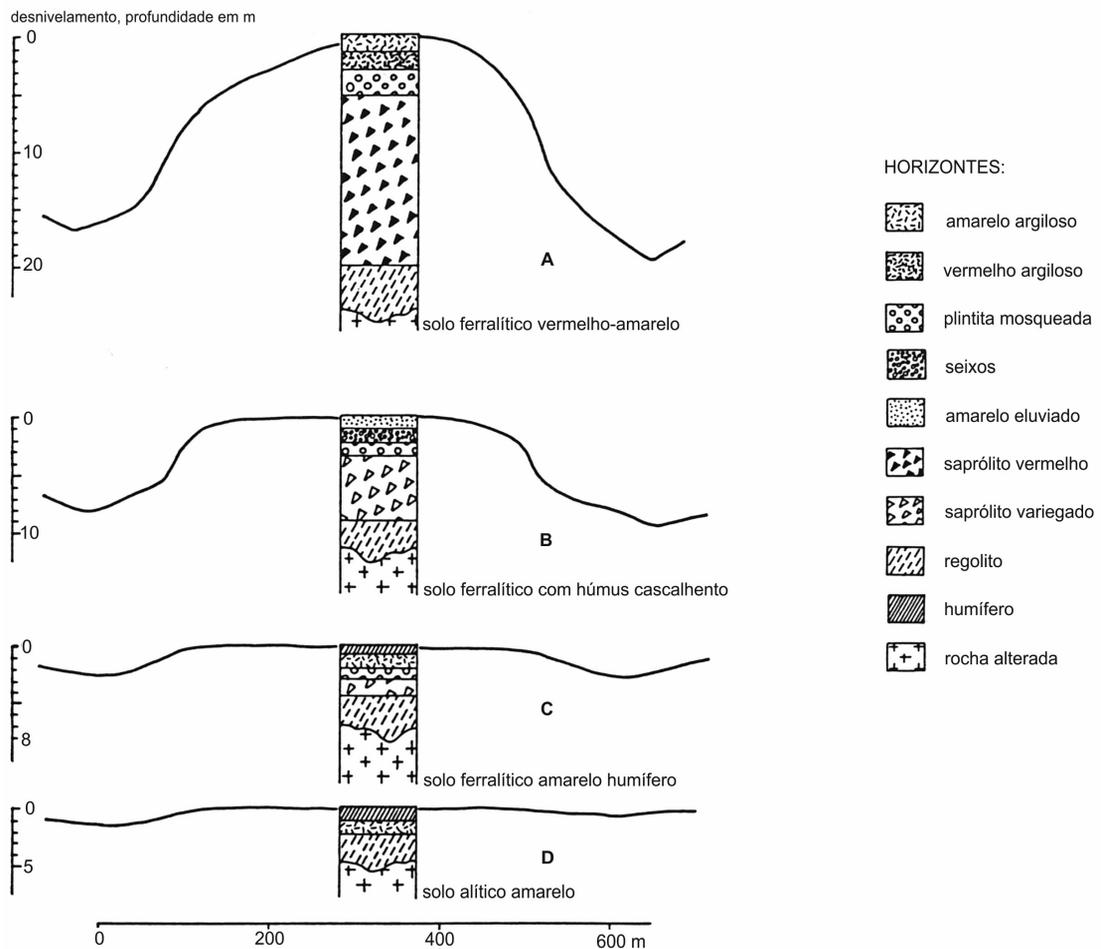


FIGURA 15 – Bacia do Alto Rio Negro (DUBROEUCQ *et al.* 1991): A - colina convexa; B – colina aplainada; C – superfície fracamente ondulada; D – superfície plana. Reproduzido com autorização da *Académie des Sciences*.

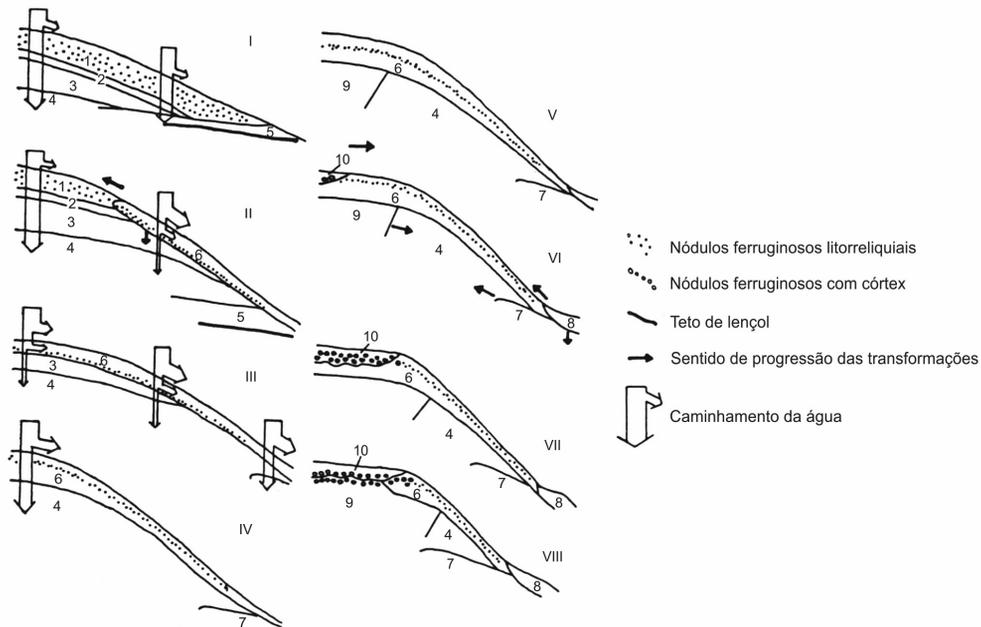


FIGURA 16 – Esquema dos diferentes estádios de evolução da cobertura pedológica sobre xistos da Guiana Francesa – Estádios I a IV: BOULET (1977) e estádios V a VIII: FRITSCH (1984).

1 - horizonte bruno-avermelhado microagregado rico em nódulos litorrelíquias; 2 - horizonte de transição; 3 - horizonte argiloso vermelho com porosidade fina; 4 - saprolito fino vermelho; 5 - reservatório de lençol freático; 6 - horizonte amarelo argilo-arenoso; 7 - saprolito fino branco; 8 - horizonte cinza pálido arenoso; 9 - saprolito fino descolorado (vermelho pálido), localmente amarelado; 10 - horizonte argilo-arenoso vermelho vivo na base e areno-argiloso amarelo-esverdeado pálido no topo.

O estágio I corresponde a uma cobertura ferrálica inicial em equilíbrio, onde a circulação da água é vertical e alimenta um lençol freático profundo. Os solos exibem um conjunto superior de horizontes argilosos bruno-avermelhados microagregados com grande porosidade, sobrepondo um conjunto inferior de horizontes argilosos com estrutura maciça e com porosidade muito fina, e um saprolito vermelho fino subjacente rico em muscovita. No estágio II, a montante, o conjunto superior microagregado é idêntico ao estágio I, com espessura superior a 1,50 m, mas se adelgaça rumo a jusante, até uma espessura da ordem de 60 cm, quando adquire uma coloração amarela. Segundo estudos hidrodinâmicos de HUMBEL (1978) e GUEHL (1981), essa transição lateral corresponde a um forte retardamento da percolação vertical de água, com instalação de um fluxo hídrico lateral suspenso no interior do horizonte amarelo de porosidade muito fina. Simultaneamente, o arraste em superfície aumenta na proporção de 1% para 25%, pela erosão mecânica medida em parcelas experimentais, mantendo-se,

todavia, muito fraca sob floresta – menor que 450 kg/ha/ano (SARAILH 1983).

Os estádios III e IV caracterizam-se por um aprofundamento progressivo do horizonte amarelo com circulação lateral na cobertura inicial, com desaparecimento progressivo dos horizontes a jusante. A partir do estágio III, nos declives menores que 10% (topos, colo) surgem depressões fechadas de 1 m a alguns metros de largura e 50 a 70 cm de profundidade, onde a água se acumula por ocasião das chuvas, seguida por lenta infiltração. Conforme estudos hidrodinâmicos em curso, o desaparecimento do horizonte argiloso vermelho com porosidade fina aparenta restabelecer uma drenagem vertical mais significativa, a despeito do arraste permanecer ainda elevado. A partir do estágio V aparecem novas transformações, conforme descrito a seguir (FRITSCH 1984).

A montante: *em profundidade* o saprolito fino vermelho transforma-se num material mais claro, com a perda parcial do ferro e caulinição das muscovitas. *No topo*: um conjunto de hori-

zontes transforma-se num horizonte amarelo com cerca de 70 cm de espessura; o mais superficial, amarelo-esverdeado pálido areno-argiloso, constitui sítio de perda de argila e ferro; o mais profundo (amarelo vivo e argilo-arenoso com nódulos ferruginosos) é o sítio de acúmulo absoluto de ferro. As presenças de volumes cinza claros arenosos no horizonte superior e de núcleos bruno-ocres no inferior denunciam o início de uma podzolização (FRITSCH *et al.* 1986). Depressões fechadas surgidas nos setores aplainados do estágio III generalizam-se no topo aplainado do interflúvio, podendo anastomozar-se e formar canais.

A jusante: *em profundidade* o saprolito fino vermelho transforma-se em um saprolito branco com litorrelíquias vermelhas aureoladas de tons ocres, em razão da desferruginização total do plasma, mas parcial das litorrelíquias, e com uma caulnização das muscovitas. *No topo do perfil*, um volume cinza claro arenoso transforma, de maneira remontante, o horizonte amarelo, e de maneira descendente o saprolito fino branco subjacente, mediante perda total do ferro e da maior parte da caulinita.

Cada uma dessas transformações provoca uma erosão geoquímica tanto mais pronunciada quanto mais avançada a transformação. Do estágio I ao IV, a evolução do sistema de transformação promove uma acentuação dos declives; do V em diante, produz-se um aplainamento e rebaixamento do topo do interflúvio, bem como um recuo das vertentes. O estágio VIII corresponde à unidade de modelado estudada por FRITSCH (1984). É evidente que a continuidade dessas transformações deve provocar um aplainamento bem mais acentuado. O estado de equilíbrio da cobertura inicial de dinâmica vertical é devido a um abaixamento relativo do nível de base atribuído a uma ligeira elevação epirogenética do embasamento da Guiana Francesa, em resposta à subsidência das bacias sedimentares adjacentes de Berbice e do Amazonas (BOULET *et al.* 1979). A consequente retificação do modelado é essencialmente devido à evolução do sistema de transformação por erosão geoquímica coadjuvada pela erosão mecânica, que, em parcelas experimentais em floresta primária, passa de 70 kg/ha/ano, na cobertura inicial, a 100-140 kg/ha/ano, sob a dinâmica principalmente superficial e lateral (SARRAILH 1983). Esse próprio aumento da erosão, devido a uma maior expressão do escoamento superficial, que passa de 0,6% a 15% em média, é consequência do basculamento da drenagem e, portanto, das transformações pedológicas.

IV CONCLUSÕES

Dois grandes conjuntos de coberturas pedológicas foram distinguidos – as coberturas em equilíbrio e os sistemas de transformação, cujos inventários estão ainda incompletos. Tentou-se mostrar o papel da pedogênese na formação do relevo em cada uma dessas categorias. Parece, antes de tudo, que nas regiões tropicais com estações contrastantes o papel da erosão geoquímica no aplainamento seja preponderante nas coberturas móveis em equilíbrio. Ela é igualmente importante nos sistemas de transformação, porém a erosão mecânica é mais facilitada pela destruição das ligações argila-esqueleto ou argila-hidróxidos de ferro, provocada pela transformação. Estudos recentes mostram que o papel direto da erosão geoquímica no aplainamento é particularmente evidente nas regiões tropicais úmidas, seja por aprofundamento contínuo das coberturas ferralíticas em equilíbrio, provocando uma lenta subsidência da superfície topográfica, seja por transformação lateral dessas mesmas coberturas.

As coberturas pedológicas em equilíbrio correspondem, de fato, a coberturas zonais, por estarem em equilíbrio com o clima atual. Entretanto, no estado atual de conhecimentos, não se pode ainda estabelecer uma sequência latitudinal contínua dessas coberturas; não se sabe com clareza como se dá a passagem entre elas, exceto no que diz respeito à dos solos ferruginosos para coberturas encouraçadas. O ideal seria efetuar uma sequência longitudinal numa mesma rocha – se possível, um granito mesocrático – diminuindo, tanto quanto possível, a participação das heranças paleoclimáticas. A África não apresenta as melhores condições para isso, por duas razões: a primeira é a presença do Saara entre as zonas mediterrânea e tropical, onde a pedogênese se perde; a segunda é que a história paleoclimática da África, desde a Era Secundária, vai na direção do úmido para o seco, como demonstram TARDY *et al.* (1988), o que favorece as heranças. Na América do Sul, história análoga estende-se do árido para o úmido, o que tende a apagar as heranças. Um transecto N-S no Brasil parece, então, fundamentalmente importante, pela condição de se poder deparar com superfícies suficientemente jovens. Dois transectos N-S deverão se esclarecer mutuamente: um na África Ocidental e outro na América do Sul.

As coberturas ferralíticas espessas e monótonas das regiões úmidas são, há muito tempo, habitualmente associadas ao modelo “meia-laranja”,

constituídas pelas colinas de formas convexas que MILLOT (1980a), com razão, considerou como uma condição que se opõe ao aplainamento. Com efeito, as vertentes dessas colinas chegam a atingir, em suas bases, declives de 50%; as coberturas em equilíbrio aqui descritas em regiões úmidas correspondem às dos modelados em platôs. Depara-se aí com uma contradição que não se pode desprezar no momento, que é a falta de um número suficiente de estudos detalhados nas regiões tropicais úmidas de modelados em meias-laranjas. Porém, é possível que a monotonia das coberturas pedológicas dessas regiões seja apenas aparente; na Guiana Francesa, por exemplo, tal modelado sobre o embasamento na zona costeira corresponde à instalação de sistemas de transformação (item III-B-2). Em Manaus, o entalhe dos platôs ferralíticos de vertentes convexas está associado ao surgimento de discordâncias entre horizontes e à instalação de sistemas de transformação (item III-B-1-a). Parece prudente, pois, para completar essa tentativa de ensaio, aguardar que se disponha de um maior número de estudos detalhados sobre a estrutura e o funcionamento das coberturas pedológicas nas regiões com modelados “meias-laranjas”.

V AGRADECIMENTOS

No trabalho original, os agradecimentos foram dirigidos ao Dr. Yves Tardy, pelas críticas muito judiciosas e construtivas.

Pela tradução, o reconhecimento é dirigido à Dra Hélène Paquet, Académie des Sciences de Paris, com a generosa intermediação do Dr. Christian Feller, do IRD – Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (antes, ORSTOM). À Dra. Selma Simões de Castro, Instituto de Estudos Sócio-Ambientais da Universidade Federal de Goiás, pela revisão da tradução.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEAUVAIS, A. 1991. Paléoclimats et dynamique d'un paysage cuirassé du Centrafrique. Morphologie, pétrologie et géochimie. Université de Poitiers, Poitiers, Thèse, 315 p.
- BEAUVAIS, A.; TARDY, Y. 1991. Formation et dégradation des cuirasses ferrugineuses sous climat tropical humide à la lisière de la forêt équatoriale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 313: 1539-1545.
- BILONG, P.; BELINGA, S.E.; VOLKOFF, B. 1992. Séquence d'évolution des paysages cuirassés et des sols ferrallitiques en zone forestière tropicale d'Afrique centrale. Place des sols à horizon d'argile tachetée. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 314: 109-115.
- BITOM, D. 1988. Organisation et évolution d'une couverture ferrallitique en zone tropicale humide (Cameroun). Université de Poitiers, Poitiers, Thèse, 164 p.
- BOCQUIER, G. 1971. Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse Sci. et Mémoire ORSTOM 62, 1973, 350 p.
- BOCQUIER, G.; ROGNON, P.; PAQUET, H.; MILLOT, G. 1977. Géochimie de la surface et formes du relief. II. Interprétation pédologique des dépressions annulaires entourant les inselbergs. *Sciences géologiques. Bulletin*, Strasbourg, 30: 245-253.
- BOULET, R. 1974. Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Équilibre et déséquilibre pédobioclimatique. Thèse Sci. Strasbourg et Mémoire ORSTOM 85, 1978, 272 p.
- BOULET, R. 1978. Existence de systèmes à forte différenciation latérale en milieu ferrallitique guyanais: un nouvel exemple de couverture pédologique en déséquilibre. *Science du Sol*, 2: 75-82.
- BOULET, R. 1983. Organisation des couvertures pédologiques des bassins versants ECEREX. Hypothèses sur leur dynamique. In: “Le projet ECEREX (Guyane)”, p. 23-52 et In: J.M. Sarrailh. Mise en valeur de l'écosystème guyanais, Coll. Écologie et Aménagement Rural, INRA, 1990.
- BOULET, R.; BOCQUIER, G.; MILLOT, G. 1977. Géochimie de la surface et formes du relief. I. Déséquilibre pédobioclimatique dans les couvertures écologiques de l'Afrique tropicale de l'Ouest et son rôle dans l'aplanissement des reliefs. *Sciences géologiques. Bulletin*, Strasbourg, 30: 235-243.
- BOULET, R.; BRUGIÈRE, J.M.; HUMBEL, F.X. 1979. Relation entre organisation des sols et dynamique de l'eau en Guyane

- septentrionale: conséquences agronomiques d'une évolution déterminée par un déséquilibre d'origine principalement tectonique. *Science du Sol*, 1: 3-18.
- BOULET, R.; CHAUVEL, A.; LUCAS, Y. 1984. Les systhèmes de transformation en pédologie. In: Livre Jubilaire du Cinquantenaire de l'Association Française pour l'Étude du Sol – AFES. Paris, AFRES, p. 167-179.
- BRABANT, P. 1990. Les sols des forêts claires du Cameroun. Exemple d'étude d'un site représentatif en vue de la cartographie des sols et de l'évaluation des terres. ORSTOM, Paris, 2 vol., 530 p. et 278 p.
- BRABANT, P.; GAVAUD, M. 1990. Les sols et les ressources en terre du Nord-Cameroun. ORSTOM, Paris, 285 p. (Notice Explicative 103).
- CARVALHO, A. 1970. Study of Terra Roxa Estruturada and Latossolo Roxo on a topographic sequence in São Paulo State, Brazil. University of Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne, Master Science Thesis, 93 p.
- CHAUVEL 1977. Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Thèse Sci. Strasbourg, Trav et Doc. ORSTOM 62, 1977, 532 p.
- CHAUVEL, A.; PÉDRO, G. 1978. Genèse des sols beiges (ferrugineux tropicaux) par transformation des sols rouges (ferrallitiques) de Casamance (Sénégal). Modalités de leur propagation *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 16: 231-249.
- DUBROEUQ, D.; BLANCANEAUX, P. 1987. Les podzols du Haut Rio Negro, région de Maroa, Venezuela. Environnement et relations lithologiques. In: D. Righi; A. Chauvel (eds.). Podzols et podzolisation. AFES-INRA, Paris, p. 37-52.
- DUBROEUQ, D.; VOLKOFF, B.; PÉDRO, G. 1991. La couverture pédologique du Bouclier du Nord de l'Amazonie (bassin du Haut Rio Negro). Séquence évolutive des sols et son rôle dans l'aplanissement généralisé des zones tropicales perhumides. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 312(2): 663-671.
- ESCHENBRENNER, V. 1987. Les glébules des sols de Côte d'Ivoire. Université de Bourgogne, Dijon, Thèse Sci., 2 vols., 498 p. et 282 p.
- FAUCK, R. 1972. Contribution à l'étude des sols des régions tropicales. Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale. Thèse Sci. Strasbourg et Mémoire ORSTOM 61, 257 p.
- FREYSSINET, P. 1990. Géochimie de l'or dans les couvertures latéritiques. Université Pasteur, Strasbourg, Thèse, 269 p.
- FRITSCH, E. 1979. Étude des organisations pédologiques et représentation cartographique détaillé de quatre bassin versants expérimentaux sur schiste Bonidoro de Guyane Française (piste de Saint Elie). Rapport ORSTOM, Cote P. 183, 30 p.
- FRITSCH, E. 1984. Les transformations d'une couverture ferrallitique: analyse minéralogique et structural d'une toposéquence sur schistes en Guyane Française. Université Paris VII, Paris, Thèse 3e cycle, 138 p.
- FRITSCH, E.; BOCQUIER, G.; BOULET, R.; DOSSO, M.; HUMBEL, F.X. 1986. Les systèmes transformants d'une couverture ferrallitique de Guyane Française. Analyse structural d'une formation supergène et mode de representation. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 22: 361-395.
- FRITSCH, E.; CHEVALIER, P.; JANEAU, J.L. 1990. Le fonctionnement hydrodynamique du bas de versant. Études et Thèses, Ed. ORSTOM, p. 185-206.
- FRITSCH, E.; VALENTIN, C.; MOREL, B.; LEBLOND, P. 1990. La couverture pédologique: interactions avec les roches, le modelé et les formes de dégradation superficielles. In: Structures et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide. Études et Thèses, Ed. ORSTOM, p. 31-57.
- GUEHL, J.M. 1984. Dynamique de l'eau dans le sol en forêt tropicale humide guyanaise. Influence de la couverture pédologique. *Annales des Sciences Forestières*, 41(2): 195-236.

- HUMBEL, F.X. 1978. Caractérisation, par des méthodes physiques, hydriques et d'enracinement de sols de Guyane Française à dynamique de l'eau superficielle. *Sciences du Sol*, 2: 83-93.
- LEPRUN, J.C. 1972. Cuirasses ferrugineuses autochtones et modelés des bas-reliefs des pays cristallins de Haute-Volta orientale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 275: 1207-1210.
- LEPRUN, J.C. 1977. Géochimie de la surface et forme du relief. IV. La dégradation des cuirasses ferrugineuses. Étude et importance du phénomène pédologique en Afrique de l'Ouest. *Sciences géologiques. Bulletin* Strasbourg, 30: 265-273.
- LEPRUN, J.C. 1979. Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins d'Afrique Occidentale sèche. Genèse, transformations, dégradations. Thèse Sci. Strasbourg et Sci. Géol. et Mémoire Strasbourg, 58, 224 p.
- LUCAS, Y. 1980. Systèmes pédologiques de la région de Paoua. Une carte à 1/20 000 et notice. Centre ORSTOM de Bangui, 127 p.
- LUCAS, Y. 1989. Systèmes pédologiques en Amazonie brésilienne. Équilibre, déséquilibre et transformations. Thèse Sci. Poitiers, 157 p.
- LUCAS, Y.; BOULET, R.; CHAUVEL, A.; VEILLON, L. 1987. Systèmes sols ferrallitiques-podzols en région amazonienne. In: D. Righi & A. Chauvel (eds.). Podzols et podzolisation. AFES-INRA, Paris, p. 53-65.
- LUCAS, Y.; KOBIELESEK, B.; CHAUVEL, A. 1989. Structure, genesis and present evolution of Amazonian bauxites developed on sediments. *Travaux ICSOBA*, 19: 81-94.
- MELFI, A. 1968. Contribution à l'étude des "Terras Roxas Legítimas" du Brésil: caractéristiques géochimiques et minéralogiques des formations de Campinas. *Bulletin de L'Association Française pour l'Étude du Sol*, 6: 31-39.
- MILLOT, G. 1977. Géochimie de la surface et formes du relief. Présentation. *Sciences géologiques. Bulletin*, Strasbourg, 30: 229-233.
- MILLOT, G. 1979. Présentation de la mémoire "Phénomènes de transport de matière dans l'écorce terrestre". *Sciences géologiques, Mémoires*, Strasbourg, 53: 1-2.
- MILLOT, G. 1980a. Géochimie de la surface et forme du relief. In: "Exposés de géologie", *Acad. Sci.*, 290, *Supplément à Vie Académique*, p. 1-18.
- MILLOT, G. 1980b. Les grands aplanissements des socles continentaux dans les pays subtropicaux et désertiques. *Mémoire Hors Série de la Société Géologique de France*, 10: 295-305.
- MILLOT, G. 1982. Planation of continents by intertropical weathering and pedogenetic processes. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo, *Proceedings*, 53-63.
- MILLOT, G. 1983. Planation of continents by intertropical weathering and pedogenic processes. In: A.J. Melfi & A. Carvalho (orgs.). INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, São Paulo, *Proceedings*, p. 53-63.
- MILLOT, G.; BOCQUIER, G.; PAQUET, H. 1976. Géochimie et paysages tropicaux. *La Recherche*, C.N.R.S., 7: 236-244.
- MILLOT, G.; BOCQUIER, G.; BOULET, R.; CHAUVEL, A.; LEPRUN, J.C.; NAHON, D.; PAQUET, H.; PÉDRO, G.; ROGNON, P.; RUELLAN, A.; TARDY, Y. 1979. Géochimie de la surface, pédogenèse, aplanissement et formes du relief dans les pays méditerranéens et tropicaux. *Sciences géologiques, Mémoires*, Strasbourg, 53: 39-43.
- NAHON, D. 1976. Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs, structures, relais et coexistence. Thèse Sci. Aix-Marseille III et *Sciences géologiques, Mémoires*, Strasbourg, 44, 232 p.
- NAHON, D.; MILLOT, G. 1977. Géochimie de la surface et formes du relief. V. Enfoncement géochimique des cuirasses ferrugineuses par épigénie du manteau d'altération des roches mères gréseuses. Influence sur le paysage. *Sciences géologiques. Bulletin*, Strasbourg, 30: 275-282.
- NAHON, D.; MELFI, A.J.; CONTE, C.N. 1989. Présence d'un vieux système de cuirasses

- ferrugineuses latéritiques en Amazonie du Sud, sa transformation *in situ* en latosol sous forêt équatoriale actuelle. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 308: 755-760.
- PÉDRO, G.; CHAUVEL, A.; MELFI, A.J. 1976. Recherche sur la constitution et la genèse des Terra Roxa Estruturada du Brésil. *Annales Agronomiques*, 27: 265-294.
- PIMENTEL DA SILVA, L.; HODNETT, M.G.; ROCHA, H.R.; CRUZ SENNA, R. 1992. A comparison of dry season soil water depletion beneath central amazonian pasture and rainforest. In: SBMET, CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 7, São Paulo, *Anais*, p. 308-313.
- PLANCHON, O.; JANEAU, J.L. 1990. Le fonctionnement hydrodynamique à l'échelle du versant. In: Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide. Études et Thèses, Ed. ORSTOM, p. 165-183.
- SARRAITH, J.M. 1983. Les parcelles élémentaires d'étude du ruissellement et d'érosion (Programme ECEREX). Synthèse après quatre années d'étude. In: "Le Projet ECEREX (Guyane)", p. 394-403.
- SOUBIÈS, F.; CHAUVEL, A. 1984. Présentation de quelques systèmes de sols observés au Brésil. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 21: 237-251.
- TARDY, Y. 1990. Recueil des documents relatifs à l'opération "Latérites d'Afrique" du Programme PIRAT-INSU-ORSTOM, Paris, Strasbourg, I et II. INSU-ORSTOM, Paris.
- TARDY, Y. 1993. Pétrologie des latérites et des sols tropicaux. Masson, Paris, 461 p.
- TARDY, Y.; MELFI, A.J.; VALENTON, I. 1988. Climats et paléoclimats périatlantiques. Rôle des facteurs climatiques et thermodynamiques: température et activité de l'eau sur la répartition et la composition minéralogique des bauxites et des cuirasses ferrugineuses au Brésil et en Afrique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 306: 289-295.
- TRICART, J.; MICHEL, P. 1965. Morphogenèse et pédogenèse. I. Approche méthodologique: géomorphologie et pédologie. *Science du Sol*, 1: 69-85.
- TURÈNNE, J.F. 1975. Mode d'humification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises. Thèse Sci. Nancy et Mém. ORSTOM 84, 173 p.
- VEILLON, L. 1990. Sols ferrallitiques et podzols en Guyane septentrionale. Relations entre systèmes de transformations pédologiques et évolution historique d'un milieu tropical humide et forestier. Université Paris VI, Paris, Thèse, 194 p.
- VOLKOFF, B. 1984/85. Organisations régionales de la couverture pédologique du Brésil. Chronologie des différenciations. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 21: 225-236.

Endereço dos autores:

René Boulet – À época do artigo, em Missão de Pesquisa ORSTOM no Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, CEP 05508-080, São Paulo, SP, Brasil. *In memoriam*.

Yves Lucas – À época do artigo, em Missão de Pesquisa ORSTOM no Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, CEP 05508-080, São Paulo, SP, Brasil. Atualmente, na Universidade de Toulon, La Garde. *E-mail*: Lucas@univ-Tln.fr

Emmanuel Fritsch – À época do artigo, CSIRO, Division of Soils, Private Bag 2, Glen Osmond, Austrálie 5064. Atualmente, no Institut de Recherche pour le Développement (IRD). *E-mail*: Emmanuel.Fritsch@ird.fr

Hélène Paquet – Centre de Géochimie de la Surface (C.G.S.), Institut de Géologie, 1 rue Blessing, 67084 Strasbourg Cedex, France. *E-mail*: helene.paquet@academie-sciences.fr