

ELAINE DE SOUSA TRINDADE

**CROSTAS BIOLÓGICAS: PEDOGÊNESE, BIOGEOQUÍMICA E
COLONIZAÇÃO EXPERIMENTAL EM SAPROLITOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2000

*Para
vovô Geraldo,
vovó Ed,
tia Kátia,
Célia e
Jejé.*

AGRADECIMENTO

Neste ensejo, gostaria de agradecer ao Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da UFV, pela oportunidade de realização deste curso, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Expresso aqui também meu agradecimento ao Prof. Carlos Ernesto Schaefer pela convivência agradável e entusiasmo constante, tornando o desenvolvimento deste trabalho menos embaraçado e mais prazeroso. Sem dúvida alguma, minhas percepções e descobertas aleatórias não teriam se traduzido numa tese sem a sua paciência e competente orientação.

Ao Prof. Walter Abrahão pelos valiosos comentários quando da discussão do enfoque a ser adotado na pesquisa. A ele agradeço a paciência e companheirismo.

À Prof^a Miriam Abreu Albuquerque pela assistência indispensável na compreensão dos aspectos relacionados à microbiologia do solo bem como pela confiança que sempre demonstrou em relação à relevância do tema escolhido.

Aos professores Jaime Wilson V. de Mello, Tania Mara Dussin e Liovando Marciano da Costa pela leitura atenciosa do trabalho e pelos comentários e sugestões apresentados, importantes na reavaliação final do texto.

Ao Dr. Gilmar Valente, do Departamento de Biologia Vegetal da UFV, e à Dra. Olga Yano, do Instituto de Botânica de São Paulo, pelo auxílio na identificação de espécies componentes das crostas biológicas analisadas no primeiro capítulo. Também ao Prof. Kiyoshi Matsuoka, por nos permitir utilizar o Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Fitopatologia da UFV.

A Zélia, Jorge, Brás, Bené, Cláudio, Carlos, Chico e Carlinhos pelo apoio oferecido durante a realização das atividades de laboratório.

Aos amigos Manoel Ricardo e Felipe Simas pela ajuda indispensável na execução de análises específicas em laboratório. Também devo lembrar aqui a assistência oferecida por Janela, Deise e Paulo César na fase inicial do trabalho.

A todos os colegas e amigos que me incentivaram e que contribuíram para a realização deste trabalho através do entusiasmo demonstrado em relação à pesquisa e da sugestão de leituras pertinentes, em especial a Luiz Leite, Momade, Marcelo Gaggero, João Herbert, Renato, Paulo Gabriel, Vinícius, Hérica, Ecila, Hedinaldo, Airton, Cristiane, Isaías, Felipe Andrade, Guilherme Donagemma, Guilherme Candinelli, Oldair, Valdinar, Márcio, Milson, Clodoaldo, Arimura, Eduardo, Fernando Cartaxo, Socorro, Fernando Freire e Betânia. Também aos professores Antônio Magalhães Jr., Geraldo Magela Costa, Oswaldo Bueno A. Filho, Maria Elizabeth Bueno, Maria Aparecida Tubaldini e Allaoua Saadi (IGC/UFMG), e a Adriana, Denise, Gilmar, Danilo, Olinto, Angelita, Fernando e Anastácia.

Finalmente, gostaria de agradecer a Gualter e Ermelinda, e ainda a Luciano e Yara, pelo companheirismo, tornando menos angustiantes os dias compridos passados em Viçosa.

BIOGRAFIA

ELAINE DE SOUSA TRINDADE, filha de Geraldo Justino da Trindade e Edina Maria de Sousa Trindade, nasceu no dia 15 de setembro de 1975, na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais.

Em 1994, ingressa no curso de Geografia, modalidade bacharelado, oferecido pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, graduando-se em 1997.

Em outubro de 1998, inicia o curso de mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, pela Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o a 26 de junho de 2000.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3

CAPÍTULO 1

CROSTAS BIOLÓGICAS DE SAPROLITOS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS: CICLAGEM BIOGEOQUÍMICA E MICROMORFOLOGIA

RESUMO	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUÇÃO.....	7
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
3.1. Ciclagem biogeoquímica	13
3.1.1. Saproilito: teores disponíveis	13

3.1.2. Crosta biológica e camada intermediária: teores disponíveis	14
3.1.3. Teores totais	15
3.2. Observações micropedológicas.....	16
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	21
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

CAPÍTULO 2

CROSTAS BIOLÓGICAS EM SAPROLITOS DE GNAISSE: CICLAGEM BIOGEOQUÍMICA, MICROMORFOLOGIA E ENSAIO DE COLONIZAÇÃO

RESUMO	24
ABSTRACT	25
1. INTRODUÇÃO.....	27
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
2.1. Descrição das áreas de amostragem.....	30
2.2. Análises físicas, químicas e mineralógicas.....	32
2.3. Micropedologia	36
2.4. Cultura de algas e inoculação de saprolitos	37
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
3.1. Atributos físicos	39
3.2. Atributos químicos.....	41
3.3. Microelementos e metais pesados.....	44
3.4. Teores totais de macro, microelementos e metais pesados.....	45
3.5. Frações de Fe e Al na camada micropedogenizada	48
3.6. Mineralogia da camada micropedogenizada.....	51
3.7. Fracionamento das substâncias húmicas.....	52
3.8. Micropedologia	53
3.9. Desenvolvimento de algas em blocos indeformados.....	62
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

RESUMO

TRINDADE, Elaine de Sousa. M.S., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2000. **Crostras biológicas: pedogênese, biogeoquímica e colonização experimental em saprolitos.** Orientador: Carlos Ernesto G. R. Schaefer. Conselheiros: Jaime Wilson V. de Mello e Elpídio Inácio Fernandes Filho.

A despeito do reconhecimento do papel pioneiro da microbiota no processo de sucessão ecológica, pouca atenção tem sido atribuída à sua participação nos mecanismos pedogenéticos, em associação com outros organismos do solo. O presente trabalho teve como objetivo o estudo das interações envolvidas no intemperismo biogeoquímico e reorganização estrutural decorrentes da ação biológica em ambiente supergênico. As amostragens foram realizadas em cortes de saprolitos colonizados por algas, fungos, líquens e briófitas, expostos na região do Quadrilátero Ferrífero-MG e adjacências. Na primeira fase do trabalho, procedeu-se a caracterização preliminar das ocorrências de crostras biológicas em diferentes substratos, enfatizando-se os efeitos da ciclagem biogeoquímica promovida pelos organismos na mobilidade de macro e micronutrientes bem como o estudo das feições micropedológicas da

crosta e da camada micropedogenizada subjacente. Foram analisadas amostras referentes a saprolitos de gnaiss, diabásio, itabirito e xisto, além de depósito de rejeito de mineração de ouro. Os resultados obtidos indicaram um efeito mais expressivo da ciclagem biogeoquímica nos substratos quimicamente mais pobres, optando-se, então, por privilegiar o estudo dos saprolitos de gnaiss no segundo capítulo. Populações mistas de algas fotoautotróficas foram isoladas e inoculadas em saprolitos estéreis provenientes das áreas de amostragem, visando o estudo da viabilidade de sua utilização na proteção de taludes expostos, através da aceleração do processo natural de sucessão ecológica. De modo geral, os efeitos da ciclagem biogeoquímica foram condicionados pelos atributos químicos, grau de intemperismo e/ou maficidade do material parental. Os elementos mais concentrados nas crostas, segundo os teores disponíveis, foram o K, Fe, Al, Zn, Mn, Pb e Ni, sendo K o elemento mais consistentemente associado à ciclagem biogeoquímica. O mesmo ocorreu em relação a Ca e Mg, exceto nos saprolitos mais máficos, onde a reserva maior mascarou a eficiente ciclagem biogeoquímica associada à crosta. Os teores de Fe disponível e total foram maiores na transição crosta/camada micropedogenizada. A ocorrência generalizada de pontuações hematíticas neste microhorizonte sugere uma forte participação microbiótica na oxidação de Fe. As fotomicrografias produzidas em microscópio eletrônico de varredura ilustraram de modo inequívoco o papel da mucilagem de polissacarídeos na estruturação de agregados, unindo a matéria orgânica fresca à parte mineral. As espécies de algas isoladas em meio de cultura e inoculadas sob condição de luminosidade natural, em laboratório, mostraram-se eficientes em colonizar os saprolitos, abrindo a perspectiva do uso de inóculo de algas na recuperação de superfícies minerais expostas.

ABSTRACT

TRINDADE, Elaine de Sousa. M.S., Universidade Federal de Viçosa, June 2000.
Biological crusts: pedogenesis, biogeochemistry and experimental colonization in saprolite. Adviser: Carlos Ernesto G.R. Schaefer. Committee members: Jaime Wilson V. de Mello and Elpídio Inácio Fernandes Filho.

In spite of the recognition of the pioneer paper of the microorganisms in the process of ecological succession, little attention has been attributed to its participation in the pedogenetic mechanisms, in association with other organisms of the soil. The present work had as objective the study of the interactions involved in the biogeochemical weathering and current of the biological action structural reorganization in saprolites. The samplings were accomplished in saprolites courts colonized by algae, fungi, lichens and mosses, exposed in the region of the Quadrilátero Ferrífero-MG. In the first phase of the work, took place the preliminary characterization of the occurrences of biological crusts in different substrate, and the effects of the biogeochemical cycling promoted by the organisms in the macro and micronutrients being emphasized as well as the

study of the micromorphological features of the crust and of the basal layer. Samples by gneiss, diabase, itabirite, schist and gold-mining spoil-pile from Morro Velho were analyzed. The obtained results indicated a more expressive effect of the biogeochemical cycling in the chemically poorer substrate, being opted, then, for privileging the study of the gnaiss saprolite in the second chapter. In laboratory, mixed populations of photoautotrophic algae were isolated and inoculated in sterile saprolites of the sampling areas, seeking the study of the viability of its use in the protection of exposed surface, through the acceleration of the natural process of ecological succession. In general, the effects of the biogeochemical cycling were conditioned by the chemical attributes, degree of weathering and/or maficity of the origin material. The most concentrated elements in the crusts, according to the available levels, were K, Fe, Al, Zn, Mn, Pb e Ni, being K the element more clearly associated to the biogeochemical cycling. The same happened in relation to Ca and Mg, except in the saprolites more maficity, where the larger reservation masked the efficient biogeochemical cycling associated to the crust. The levels of available and total Fe were larger in the transition crust/basal layer. The expressive occurrence of oxics punctuations in this microhorizon suggests a important microbiotic participation in the oxidation of the Fe. The photomicrographs of crusts produced in scanning electron micrographs illustrates in an unequivocal way the paper of the polysaccharide mucilage in the formation of aggregates, uniting the fresh organic matter to the mineral part. The species isolated in algal cultures and incubated under natural light conditions were efficient colonizers of undisturbed saprolites, opening the perspective of the use of inoculant of algae in the recovery of exposed mineral surfaces.

INTRODUÇÃO

A importância da vida microbiana no contexto dos estudos pedológicos é freqüentemente reduzida, senão mesmo negligenciada, pela obviedade das características e propriedades do solo como teor de argila, areia, teor de matéria orgânica e fertilidade natural. Se os elementos biológicos são às vezes considerados, não vão além de atividade de minhoca ou larvas de artrópodos (HARRIS, 1998). A natureza microscópica, e portanto não diretamente visível, é a razão primária da pouca atenção com que a pedologia tratou e trata a enorme complexidade, diversidade e dinâmica desses microrganismos.

Não obstante, o funcionamento dos processos pedogenéticos é diretamente dependente dos níveis da atividade biológica de bactérias, fungos, algas, protozoários, líquens, briófitas, micro e mesofauna. Sem a mediação biológica, o solo tornar-se-ia o repositório inerte de restos vegetais e animais, inexistindo a ciclagem de nutrientes vitais como N, P e C.

As crostas biológicas têm um significativo efeito sobre vários fenômenos que ocorrem no processo de formação do solo, como a liberação de elementos nutrientes, necessários à instalação de plantas superiores, e agregação e estabilização de partículas minerais, com conseqüente aumento da aeração e infiltração. Constituídas de algas, fungos, líquens e plantas inferiores, as crostas

ocorrem nos mais diversos ambientes, dos trópicos às regiões polares, variando em sua composição.

O pioneirismo em relação à sucessão ecológica e o caráter cosmopolita tornam-se fortes argumentos para a utilização de crostas biológicas na recuperação e estabilização de superfícies, o que já vem sendo explorado em ambientes costeiros e em áreas degradadas por incêndio (NEUMAN, MAXWELL e BOULTON, 1996).

Neste trabalho, assume-se que os processos pedogenéticos são parte de um quadro hierárquico, onde processos dominantes em uma determinada escala adquirem também diferentes papéis sobre outras escalas (VILES e PENTECOST, 1994). É nesse sentido que procurou-se compreender os mecanismos das interações organo-minerais associadas à ocorrência de crostas biológicas e as suas repercussões na dinâmica de formação do solo e, portanto, na própria dinâmica hídrica e erosiva das vertentes.

No primeiro capítulo, procedeu-se a caracterização preliminar das ocorrências de crostas biológicas em diferentes substratos, enfatizando-se os efeitos da ciclagem biogeoquímica promovida pelos organismos na mobilidade de macro e micronutrientes bem como o estudo das feições micropedológicas da crosta e da área sob direta influência.

Os resultados obtidos na primeira fase do trabalho indicaram um efeito mais expressivo da ciclagem biogeoquímica nos substratos quimicamente mais pobres, optando-se, então, por privilegiar o estudo dos saprolitos de gnaiss no segundo capítulo.

Populações mistas de algas fotoautotróficas, obtidas a partir da repicagem das crostas estudadas, foram isoladas e inoculadas em saprolitos estéreis provenientes das áreas de amostragem, visando o estudo da viabilidade de produção de inóculo em laboratório para uma possível utilização na recuperação de áreas degradadas através da aceleração do processo natural de sucessão ecológica em superfícies minerais expostas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HARRIS, P. J. The microbial population of the soil. In: WILD, A. (Ed.). **Russell's soil conditions and plant growth**. Harlow: Longman Scientific & Technical, p. 449-471, 1988.
- NEUMAN, C. M., MAXWELL, C. D. e BOULTON, J. W. Wind transport of sand surfaces crusted with photoautotrophic microorganisms. **Catena**, 27: 229-247, 1996.
- VILES, H. e PENTECOST, A. Problems in assessing the weathering action of lichens with an example of epiliths on sandstone. In: ROBINSON, D. A. e WILLIAMS, R. B. G. (Eds.). **Rock weathering and landform evolution**. Chichester: John Wiley & Sons, p. 99-116, 1994.

CROSTAS BIOLÓGICAS DE SAPROLITOS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS: CICLAGEM BIOGEOQUÍMICA E MICROMORFOLOGIA

RESUMO

O papel das crostas biológicas na ciclagem de nutrientes e gênese de estrutura em saprolitos, nas condições tropicais, é pouco conhecido. Este trabalho reporta o intemperismo biogeoquímico e a reorganização estrutural decorrente da ação biológica em diferentes cortes de saprolitos em taludes da região do Quadrilátero Ferrífero-MG e adjacências, abrangendo diabásio (DB), gnaiss (GN), itabirito (IT), xisto (XT) e depósito de rejeito da mina de Morro Velho (MV), correspondente a metassedimentos do Supergrupo Rio das Velhas. Na composição das crostas, foram identificados algas cianobactérias, fungos, líquens e briófitas. Com base no estudo biogeoquímico, os elementos mais concentrados nas crostas, segundo os teores disponíveis, foram o K, seguido do Zn e Mn. Os teores de Fe disponível foram maiores na porção inferior da crosta, constituindo possivelmente concentração secundária pela migração e precipitação de Fe por fluxos laterais. Não houve uma tendência clara de distribuição para Ca e Mg, que se apresentaram mais ligados à parte orgânica (crosta) nos substratos de IT e XT, e na camada intermediária, nos substratos de DB e GN. Em MV, é possível que a dinâmica de Ca tenha sido fortemente afetada pela oxidação de sulfetos, devido à drenagem ácida da barragem de rejeitos. Em relação aos teores totais, a maior riqueza em Mn, Fe, Mg, Cu e Zn foi observada no saprolito de DB, pela maior maficidade do material de origem, em notável contraste com a rocha encaixante, representado pelo saprolito gnáissico, que mostrou-se pobre em Fe, Mn, Mg e Cu. Os substratos mais ricos (DB, MV e XT) mostraram tendência de aumento dos teores totais em profundidade, enquanto os mais pobres (GN e IT) apresentaram teores de alguns elementos mais elevados na camada orgânica, em relação ao saprolito. As feições micropedológicas das crostas apresentaram-se

notavelmente ricas e variadas, com níveis micropedogenizados enterrados, microhorizontes sápricos e hísticos, além de microestratificação com definição de zonas ferruginizadas, à semelhança de “micropans” ferruginosos ou mangânicos. As crostas biológicas recobriram de forma conspícua os saprolitos, sendo responsáveis por feições micropedogenéticas evidentes e pelo processo de estruturação biológica da superfície exposta dos taludes. Este processo é capaz de alterar a dinâmica hídrica e erosiva da vertente, o que tem importante implicação geomorfológica e ambiental.

Palavras-chave: crosta biológica, pedogênese, ciclagem biogeoquímica, micromorfologia

**BIOLOGICAL CRUSTS IN SAPROLITES IN THE
QUADRILÁTERO FERRIFERO REGION, MINAS GERAIS:
BIOGEOCHEMICAL CYCLING AND MICROMORPHOLOGY**

ABSTRACT

The role of biological crusts in nutrient cycling and soil structure genesis in saprolites, in tropical conditions, is little known. This work reports on the biochemical weathering and structural reorganization resulting from the biological crusts action in different saprolites of the Quadrilátero Ferrífero and neighbor areas, MG. These road exposures were oriented to the south, encompassing a diabase (DB), gneiss (GN), itabirite (IT), schist (XT) and gold-mine spoil-pile from Morro Velho (MV), comprising metasediments of the Rio das Velhas supergroup. There were collected and identified cyanobacteria, fungi,

lichens and mosses. Based on the biogeochemical study, the exchangeable levels of K, Mn and Zn were preferably concentrated in the crust. The exchangeable Fe levels were higher in the altered under zone, constituted possibly by secondary Fe-migration and precipitation through lateral fluxes. There were no clear trend of Ca and Mg distribution, although they were apparently concentrated in the crust in the IT and XT substrates, and in the altered zone in the DB. In MV spoil, the Ca dynamic was affected by sulfide oxidation, following acid drainage. In terms of total levels Mn, Fe, Mg, Cu and Zn were higher in the DB saprolite, due to its maficity, in a clear contrast with the host gneiss, represented by the GN saprolite, with low levels of Fe, Mn, Mg and Cu. The richer substrates (DB, MV e XT) showed a trend of increasing total levels with depth, whilst the nutrient poor substrates (GN e IT) had higher levels of some elements in the crust, compared with the saprolite. The micropedological features are notably rich and varied, showed buried micropedogenetic horizons, sapric and histic microhorizons, micro-stratification, ferruginous zones similar to Fe/Mn micropans, amongst others. The biological crusts efficiently covered the saprolites, being responsible to micropedogenetic features and a clear process of biological microstructuration of the exposed saprolites. This process is capable of altering the moisture balance and erosion dynamic of the slope, with important geomorphological and environmental implications.

Key-words: biological crusts, pedogenesis, biogeochemical cycling, micromorphology

1. INTRODUÇÃO

Grande parte dos estudos voltados para o entendimento das interações entre microrganismos e substrato inorgânico tem sido conduzida por biólogos e geólogos, sobretudo no que se refere à atividade de líquens. Conseqüentemente, pouco do significado da ciclagem biogeoquímica na gênese do solo sob crostas biológicas foi até agora esclarecido.

Por crosta biológica entende-se uma fina camada orgânica, com espessura entre 5 e 50 mm (PÉREZ, 1997), formada à superfície de substratos de diversas naturezas (rocha inalterada, saprolito ou solo) em função da instalação e desenvolvimento de comunidades de microrganismos e plantas inferiores, que podem compreender bactérias, fungos, algas, líquens, briófitas e, ou, pteridófitas.

Trabalhos específicos sobre o tema apontam para o papel da microbiota no intemperismo biofísico do substrato mineral, principalmente através da penetração de hifas e filamentos e conseqüente desagregação associada aos ciclos de hidratação–desidratação (WIERZCHOS e ASCASO, 1998; BARKER, WELCH e BANFIELD, 1998). Por outro lado, há trabalhos que ressaltam a importância dessas comunidades pioneiras na estabilização de solos sobre os quais são esparsas ou ausentes plantas superiores (NEUMAN, MAXWELL e BOULTON, 1996; PÉREZ, 1997). Nesse sentido, são levantadas como principais

causas do aumento da resistência à erosão, em relação aos sítios descobertos, o aumento da infiltração e manutenção de umidade, condicionados pela rugosidade e concentração de compostos orgânicos na superfície do encrostamento, e maior coesão das partículas do solo, proporcionada por cimentantes orgânicos (principalmente, polissacarídeos) e crescimento de corpos filamentosos. Inúmeros trabalhos confirmam a ênfase dada ao papel das associações organo-minerais na agregação e estabilidade estrutural dos solos, embora não sejam específicos sobre encrostamentos orgânicos (MARTIN e WAKSMAN, 1940; PEELE e BEALE, 1941; TISDALL e OADES, 1982; LYNCH e ELLIOTT, 1983; CHENU, 1989 e 1993; DORIOZ, ROBERT e CHENU, 1993; EMERSON, 1995; FARIA, 1996).

Além do relevante papel na estabilização da incipiente estrutura do solo formado, as algas cianofíceas ou cianobactérias são importantes colonizadores fotoautotróficos da superfície externa, sintetizando compostos orgânicos, que podem ser utilizados por outros organismos, e fixando nitrogênio atmosférico (ZIMMERMAN, 1993).

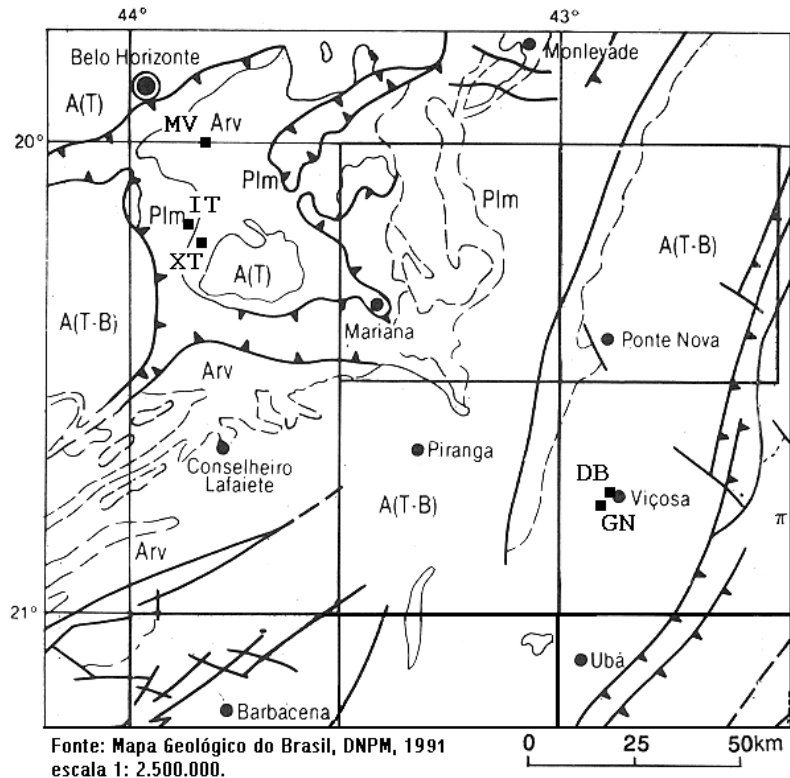
Os efeitos da atividade biológica no processo de intemperismo bioquímico têm sido atribuídos à excreção de ácidos orgânicos e formação de quelatos com componentes inorgânicos do substrato imediato, propiciando a decomposição e neossíntese de minerais de argila na interface substrato-crosta (WEED, DAVEY e COOK, 1969; ISKANDAR e SYERS, 1972; BROWN, 1976; WILLIAMS e ROBINSON, 1994; VILES e PENTECOST, 1994; BARKER, WELCH e BANFIELD, 1998; WIERZCHOS e ASCASO, 1998; EHRLICH, 1998). Em geral, informações disponíveis na literatura sobre ciclagem biogeoquímica associada a microrganismos referem-se, entretanto, a organismos específicos, atuando sobre substratos também específicos. Dados encontrados sobre o comportamento de líquens normalmente são de interesse para o campo da microbiologia. Em relação a bactérias e fungos, atenção maior tem sido dirigida para seu papel na decomposição de resíduos orgânicos e, conseqüentemente, na ciclagem de carbono e nitrogênio, em áreas submetidas a diferentes sistemas de preparo do solo.

No presente capítulo, estudou-se a ciclagem biogeoquímica e a microestruturação biológica em microambientes associados à presença de crostas biológicas, com o objetivo de identificar sua relevância na gênese incipiente do solo em cortes de saprolitos expostos em taludes de estradas situadas na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, e adjacências. Na escolha das áreas de amostragem, considerou-se a diversidade litológica existente em curto trajeto, o que atende as exigências de um trabalho preliminar, de caráter mais abrangente.

Foram avaliados teores de macro e micronutrientes de cinco diferentes sítios cobertos por crostas, considerando-se, *a priori*, que substratos diferentes quanto à natureza química determinam interações contrastantes entre componentes biológicos e substratos inorgânicos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os sítios estudados no presente trabalho localizam-se na região do Quadrilátero Ferrífero-MG e adjacências, estando compreendidos entre as coordenadas 19°58'51"/20°45'02" S e 42°52'04"/43°52'02" WGr (Figura 1).



A (T) - Arqueano indiferenciado retrabalhado no Ciclo Transamazônico
A (T-B) - Arqueano indiferenciado retrabalhado nos Ciclos Transamazônico e Brasiliano; (T) charnoquito
Arv - Supergrupo Rio das Velhas
Plm - Supergrupo Minas

MV – Morro Velho	IT – itabirito
XT – xisto	GN – gnaiss
DB – diabásio	

Figura 1 – Locais selecionados para amostragem.

Os diferentes substratos referem-se a saprolitos desenvolvidos de itabirito-IT (20°11'31"S/43°52'02"W); xisto-XT (20°13'04"S/43°49'33"W); diabásio-DB (20°42'55"S/42°52'04"W); gnaiss-GN (20°45'02"S/42°52'13"W); e depósito de rejeito de mineração de ouro da mina de Morro Velho-MV (19°58'51"S/43°49'27"W), rico em sulfato de cálcio, correspondendo a

metassedimentos do Supergrupo Rio das Velhas (Ladeira, 1980, citado por DNPM, 1991).

Apenas os taludes de exposição sul foram amostrados, tendo sido observado um desenvolvimento mais expressivo das crostas nesta orientação. As coletas foram feitas através de microtrincheiras, sendo discriminadas amostras da cobertura orgânica propriamente dita, camada intermediária (aproximadamente 0-5 mm de profundidade) e saprolito (abaixo de 50 mm). As briófitas foram os organismos dominantes na composição das crostas¹ (Quadro 1), exceto sobre o substrato gnáissico, sendo a *Cladonia sp.* a única espécie de líquen identificada.

Quadro 1. Caracterização dos taludes e composição das crostas biológicas.

Substrato	Altitude (m)	Direção talude	Eixo talude	Inclinação talude	Composição da crosta
MV	728	SW	N70W	35°	<i>Dicranella hilariana</i> (Mont.) Mitt. <i>Cladonia sp.</i>
IT	1250	SE	N80E	80°	<i>Polytrichum juniperinum</i> Willd. Ex Hedw. <i>Dicranella hilariana</i> (Mont.) Mitt. <i>Bryum sp.</i> <i>Cladonia sp.</i>
XT	1080	SW	N60W	60°	<i>Campylopus</i> jovén Filamentos de fungo não identificado e algas cianobactérias
DB	600	SE	N35E	55°	<i>Funaria hygrometrica</i> Hedw.
GN	660	SE	N70E	85°	Líquén pulverulento não identificado Massa de alga filamentosa (cianobactéria)

Análises químicas de rotina referentes a pH em água (relação 1:2,5), determinação dos teores disponíveis de P, K, Zn, Fe, Mn e Cu (extrator Mehlich 1) e dos teores trocáveis de Ca e Mg (extrator KCl 1 mol/L) foram realizadas em amostras da camada intermediária e saprolito. Amostras relativas à cobertura orgânica foram submetidas à digestão nitroperclórica e amostras da camada intermediária e saprolito, ao ataque triácido (HNO₃, HClO₄ e HF), conforme EMBRAPA (1997), para a determinação de elementos totais (P, K, Ca, Mg, Zn,

¹ As espécies componentes das crostas foram identificadas pela Dra. Olga Yano, do Instituto de Botânica de São Paulo, SP, em comunicação pessoal.

Fe, Mn e Cu) e estimativa do efeito biótico sobre a reserva mineral do substrato. O teor total de C orgânico na crosta biológica foi obtido pelo método de ignição, submetendo as amostras a uma temperatura de 400°C por quatro horas.

Para a avaliação das feições micromorfológicas e pedogenéticas da crosta biológica e do saprolito subjacente, amostras indeformadas foram amostradas e impregnadas com resina de poliéster REVOPAL T208, contendo corante fluorescente (Uvitex OB; Ciba-Geigy). Foram confeccionadas lâminas delgadas no sentido transversal à crosta microbiótica, as quais foram observadas em microscópio petrográfico (modelo OLYMPUS DX40) e suas feições micropedológicas descritas segundo FITZPATRICK (1993). As fotografias foram feitas em filme Kodacolor, 35 mm, ISO 100.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ciclagem biogeoquímica

3.1.1. Saprolito: teores disponíveis

As análises químicas dos saprolitos evidenciaram valores gerais mais elevados de nutrientes disponíveis no microperfil referente ao depósito de rejeito da Mina de Morro Velho (MV), notadamente de P, Ca, Fe, Zn e Cu, com valores relativamente menores de K e Mn (Quadro 2). Provavelmente estes valores tenham sido influenciados pela formação de precipitados em ambiente submetido à oxidação de sulfetos.

Quadro 2. Teores disponíveis de macro e micronutrientes, segundo as faixas de amostragem nos diferentes substratos.

Substrato	pH	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
	H ₂ O	mg/kg		cmol/kg			mg/kg		
MV									
Camada org.	—	4,57	71,73	0,00	2,23	0,00	176,12	0,21	9,99
0 a 5 mm	3,85	26,38	33,30	2,79	0,68	185,56	36,10	1,43	12,36
> 50 mm	3,10	31,28	8,83	23,24	0,83	211,69	4,29	1,93	6,97
IT									
Camada org.	—	2,93	40,44	2,63	0,51	42,54	771,39	7,55	0,21
0 a 5 mm	3,85	16,62	13,09	1,33	0,27	136,20	116,44	4,09	2,34
> 50 mm	4,95	17,77	0,67	0,62	0,00	77,04	7,88	0,43	1,68
XT									
Camada org.	—	1,70	75,69	0,68	0,35	9,88	56,47	11,40	1,48
0 a 5 mm	3,85	1,84	21,16	0,41	0,09	135,75	31,23	2,32	1,29
> 50 mm	4,25	3,59	3,52	0,19	0,00	67,30	4,90	1,05	1,03
DB									
Camada org.	—	0,45	50,13	1,13	0,74	0,00	65,82	2,93	2,80
0 a 5 mm	3,85	2,83	77,22	1,44	2,34	138,92	35,28	1,99	3,37
> 50 mm	4,55	3,49	19,10	0,25	1,98	75,53	4,07	0,83	3,14
GN									
Camada org.	—	2,37	232,71	1,50	0,59	9,93	56,47	11,40	1,48
0 a 5 mm	3,85	6,35	151,58	3,71	1,21	63,25	74,71	3,85	1,35
> 50 mm	4,50	2,31	36,60	0,92	0,44	26,00	3,37	0,24	1,20

— Dados não disponíveis

Para K, os teores trocáveis foram máximos no saprolito de GN, possivelmente pela abundância observada de biotita/ilita. No xisto sericítico (XT), os teores de K disponível foram surpreendentemente baixos, indicando, provavelmente, o extremo grau de alteração sofrido por este material. Os menores valores de K disponível foram encontrados no IT, o que deve estar sendo condicionado pela pobreza do saprolito em minerais potássicos. Os teores de Mg trocáveis foram baixos, exceto no saprolito de diabásio (DB), pela natureza máfica do substrato (GOMES, 1988).

Quanto aos micronutrientes, Fe e Mn apresentaram teores disponíveis mais elevados no IT, como esperado, enquanto Cu foi maior em MV, e Zn no XT e GN. O P disponível mostrou valores maiores em MV e IT, com níveis baixos nos demais pontos.

3.1.2. Crosta biológica e camada intermediária: teores disponíveis

O elemento mais consistentemente associado à ciclagem, tomando-se os teores disponíveis, foi o K, que tendeu a concentrações mais elevadas na crosta (MV, IT, XT, GN), ou abaixo dela (DB) decrescendo em profundidade. O P disponível apresentou uma notável tendência à redução do saprolito para a crosta, embora a extração por Mehlich não solubilize o P da biomassa microbiana nem o compartimento orgânico (P orgânico), frações que também contribuem para a sua disponibilidade. Desta forma, não é possível determinar, a partir dos dados obtidos, a extensão com que o P limita a produção de biomassa pelas crostas biológicas. É necessário conhecer em maior detalhe as frações orgânicas e inorgânicas de P nas crostas e nos substratos, para uma melhor compreensão da dinâmica de P nas crostas.

Independente dos teores de Mg e das relações Ca:Mg nos saprolitos, o Ca tendeu a valores sempre superiores ao Mg na crosta, em virtude da ciclagem biogeoquímica. A única exceção foi a crosta de MV, devido à precipitação de Ca como sulfato abaixo da crosta, não apresentando valores mensuráveis de Ca

trocável na crosta. Em MV, entretanto, os teores totais de Ca foram bem superiores aos de Mg, como se pode verificar a seguir (Quadro 3).

Em geral, observou-se uma nítida tendência de concentração de Mn na crosta e de Fe na camada micropedogenizada subjacente, condicionada pela redução do pH em superfície. Comportamento semelhante foi observado em relação ao Zn, com teores significativamente maiores na crosta, exceto em MV.

3.1.3. Teores totais

Os diferentes substratos analisados mostraram considerável variabilidade nos teores totais de alguns nutrientes (Quadro 3). No DB, os maiores teores totais, em relação aos demais pontos, foram de Mn, Cu, Fe e Zn, revelando o caráter máfico do material parental, em nítido contraste com o GN encaixante, e a presença desses elementos ligados aos minerais secundários (argilas) ou primários resistentes. Os baixos teores totais de Ca e K observados provavelmente se devem à intensa lixiviação, não havendo minerais secundários resistentes em que tais elementos possam constituir reserva. Excetuando-se o substrato de MV, o teor total de P na crosta de DB superou os teores observados nos demais saprolitos, em função da maficidade do substrato. Em MV, os teores elevados de P total podem estar refletindo maior solubilização de formas pouco disponíveis, devido à acidez do material.

Os maiores teores de K foram observados no XT, conforme esperado, pela possível reserva de K na illita presente. Teores totais relativamente altos de Ca e Cu foram também observados.

No IT, os maiores teores totais foram de Fe e Ca, este último surpreendentemente elevado em todas as profundidades, apesar do pH ligeiramente menos ácido deste substrato em relação aos demais (Quadro 2). É possível que o itabirito seja localmente influenciado por fácies carbonáticas, reconhecidas no domínio do Supergrupo Minas (T. M. Dossin, comunicação pessoal), no qual se insere. Por outro lado, conforme esperado, os teores de Mg e

K foram muito baixos, como reflexo da pobreza em minerais magnesianos e micas no substrato.

Quadro 3. Teores totais de macro e micronutrientes, segundo as faixas de amostragem nos diferentes substratos.

Substrato	C org.	P	dag/kg			mg/kg			
			K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
MV									
Camada org.	4,24	0,26	0,11	0,95	0,32	141.675,00	768,80	168,8	209,60
0 a 5 mm	—	—	0,44	0,53	0,45	282.406,67	737,80	—	227,80
> 50 mm	—	—	0,38	1,13	0,49	304.093,33	805,50	—	218,47
IT									
Camada org.	0,44	0,07	0,04	0,37	0,07	193.362,50	898,80	155,00	43,00
0 a 5 mm	—	—	0,02	0,37	0,04	483.453,33	611,83	—	69,23
> 50 mm	—	—	0,02	0,45	0,05	550.946,67	611,57	—	76,47
XT									
Camada org.	9,40	0,04	0,10	0,15	0,04	89.862,50	420,00	91,30	99,10
0 a 5 mm	—	—	1,66	0,44	0,09	124.246,67	1.684,33	—	188,00
> 50 mm	—	—	1,64	0,41	0,10	99.740,00	579,33	—	176,07
DB									
Camada org.	3,15	0,09	0,08	0,07	0,16	83.387,50	260,50	218,80	198,30
0 a 5 mm	—	—	0,08	0,40	0,27	166.020,00	619,40	—	191,27
> 50 mm	—	—	0,15	0,35	0,26	167.386,67	748,77	—	207,97
GN									
Camada org.	2,64	0,06	0,17	0,46	0,19	45.150,00	378,30	133,80	60,40
0 a 5 mm	—	—	0,30	0,45	0,16	45.893,33	499,70	—	48,63
> 50 mm	—	—	0,23	0,37	0,07	40.280,00	212,50	—	50,20

— Dados não disponíveis

Nos substratos quimicamente mais pobres, como o GN e IT, observou-se uma tendência à concentração de alguns nutrientes (K, Mg e Mn, no IT, e Ca, Mg, Fe, Mn e Cu, no GN) nos extratos mais superficiais, com teores menores em profundidade (> 50 mm), o que reflete uma eficiente ciclagem biogeoquímica associada à crosta. Em todos os demais substratos observaram-se teores totais crescentes em profundidade. Neste caso, a fertilidade herdada do material parental sobrepuja os efeitos da ciclagem de nutrientes por influência biológica.

3.2. Observações micropedológicas

Há uma diversidade notável de morfologias entre as diferentes crostas estudadas, e os principais aspectos estão ilustrados nas Figuras 2 e 3. Em todos

os casos, observou-se uma seqüência micropedogenética evidente, com diferenciação entre a camada biológica propriamente dita (crosta) na superfície, seguida de uma sub-crosta com coloração variada e estruturação pedobiológica, sendo o saprolito abaixo praticamente apédico, ou seja, com pouca estruturação.

Na amostra de crosta referente ao saprolito de GN evidenciou um abundante microhabitat superficial de musgos/algas que fluorescem em luz polarizada, sendo caracterizado por uma seqüência descontínua de tapetes algais (algal mats), bastante fraturados pelo umedecimento e secagem a que se encontram submetidos (Figura 2 A). Em meio ao micro-horizonte fíbrico de musgos e algas, ocorrem áreas mais frouxas e estruturadas onde se desenvolvem hifas fúngicas (seta Figura 2 A), responsáveis pela degradação microbiana de resíduos ricos em lignina e celulose. De todos os saprolitos estudados, o GN mostrou-se mais rico em fungos e algal mats que os demais, com raras briófitas.

Na crosta microbiótica sobre DB, evidenciou-se uma extensa microestruturação pela atividade microbiótica (seta superior, Figura 2 C), de até 12 mm de profundidade, com uma zona ferruginizada no contato entre a parte estruturada e o saprolito apédico (seta inferior, Figura 2 C). A agregação e abundante porosidade é resultante da atividade combinada de algas e musgos. Há ocorrência de micronódulos oxídicos, provavelmente de Fe e Mn, dispersos na matriz, corroborando os valores totais elevados desses elementos no saprolito (Quadro 3).

No IT, observa-se uma cobertura biológica mais rala e descontínua (Figura 2 D), com áreas estruturadas onde há abundância de micropartículas oxídicas, provavelmente de hematita e magnetita opacas, sobrepostas à matriz fortemente ferruginizada e cimentada, abaixo (seta).

Em MV, o micro-horizonte fíbrico (FOX, 1985) é mais delgado e descontínuo em relação ao encontrado no GN (Figura 2 B), sendo observada a presença de uma sub-camada mais estruturada com características sápricas e ausência de restos vegetais reconhecíveis. Nas partes mais ferruginizadas da crosta em MV, observa-se uma concentração de areia fina quartzosa e uma delgada cobertura de algal mats (líquens e algas) descontínua, com certa

fluorescência em luz polarizada (Figura 2 E). Abaixo, verifica-se uma zona maciça e pouco estruturada (Figura 2 G), sendo a crosta biológica de penetração muito limitada, em relação às crostas instaladas sobre os demais saprolitos estudados.

A maior diversidade de feições micropedogenéticas foi observada no XT, concordando com os maiores teores de carbono. Algumas das feições de destaque são mostradas na Figura 3. Sequências de crostas biológicas com profundidades de até 14 mm foram observadas em microscópio.

A alternância de microbandas (fácies) mais quartzosas com outras micáceas mostrou-se claramente um fator importante na ocorrência e tipologia das crostas. Na Figura 3 A, pode-se observar uma banda biotítica/muscovítica (à direita), onde a penetração por materiais bioturbados é mais profunda, em relação à banda quartzosa, à esquerda. Na parte micácea, há ocorrência de briófitas alongadas e pelotas fecais de microartropodos, enquanto na parte quartzosa um microambiente abaixo da crosta favoreceu a acumulação e precipitação de Fe (zona ferruginizada compacta, mais escura), como um verdadeiro “micro-ortstein”, apresentando poros planares.

Essas feições micropedogenéticas de forte redistribuição de complexos de Fe e Fe-MO na subcrosta mostram profundidades variáveis, de até 500 µm, e estão sempre localizados sobre o saprolito, descontinuamente (Figura 3 C).

A ação microbiótica mostrou ainda feições de intensa micropedogênese, em bolsões fraturados (Figura 3 B), onde há um recobrimento de sucessivas deposições organo-ferruginosas (sápricas), fragmentos de saprolito e nova sucessão micropedogenética, até a crosta biológica superficial, rica em briófitas (Figura 3 B, topo). Revestimentos ferruginosos são comuns também nas fraturas e planos de clivagem do saprolito micáceo (Figura 3 B e C, base). Tapetes de líquens e algas (algal mats) descontínuos, coroam as partes mais microestruturadas, onde já é discernível o horizonte sáprico, mais evoluído (Figura 3 D).

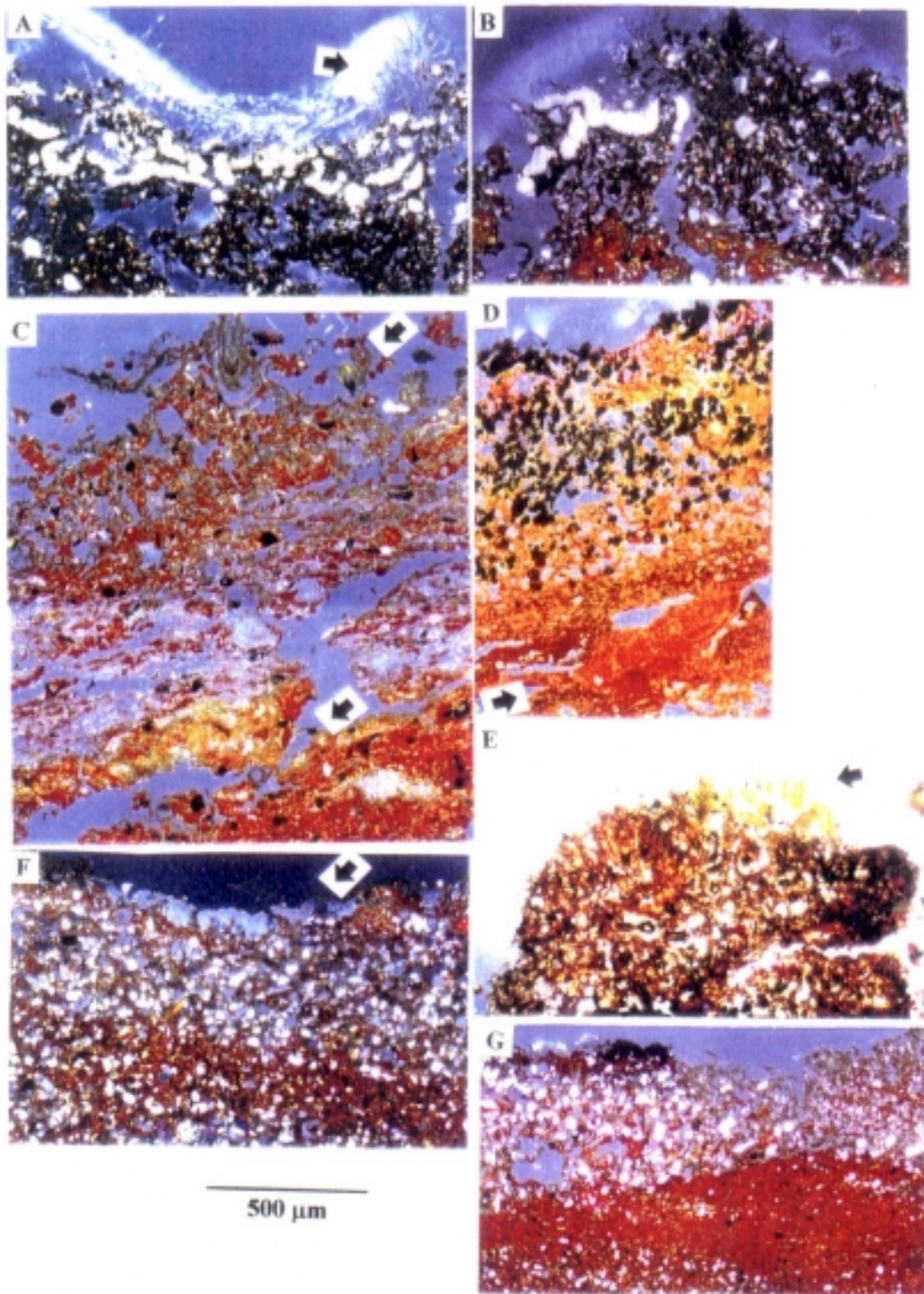


Figura 2 – A) Sequência descontínua de tapetes algais (algalmatts) sobre GN. Hifas fúngicas são observadas em meio ao micro-horizonte fibrício (seta); B) micro-horizonte fibrício (MV); C) crosta biológica sobre DB, evidenciando extensa microestruturação pela atividade microbiótica (seta superior), com zona ferruginizada no contato entre a parte estruturada e o saprolito apédico (seta inferior); D) cobertura biológica rala e descontínua (IT), com áreas estruturadas onde são abundantes micropartículas oxídicas, sobrepostas à matriz fortemente ferruginizada e cimentada, abaixo (seta); E) concentração de areia fina quartzosa e delgada cobertura de algalmatts descontínua (MV); F) e G) zona maciça e pouco estruturada, com ocorrência de crosta biológica de penetração limitada (MV).

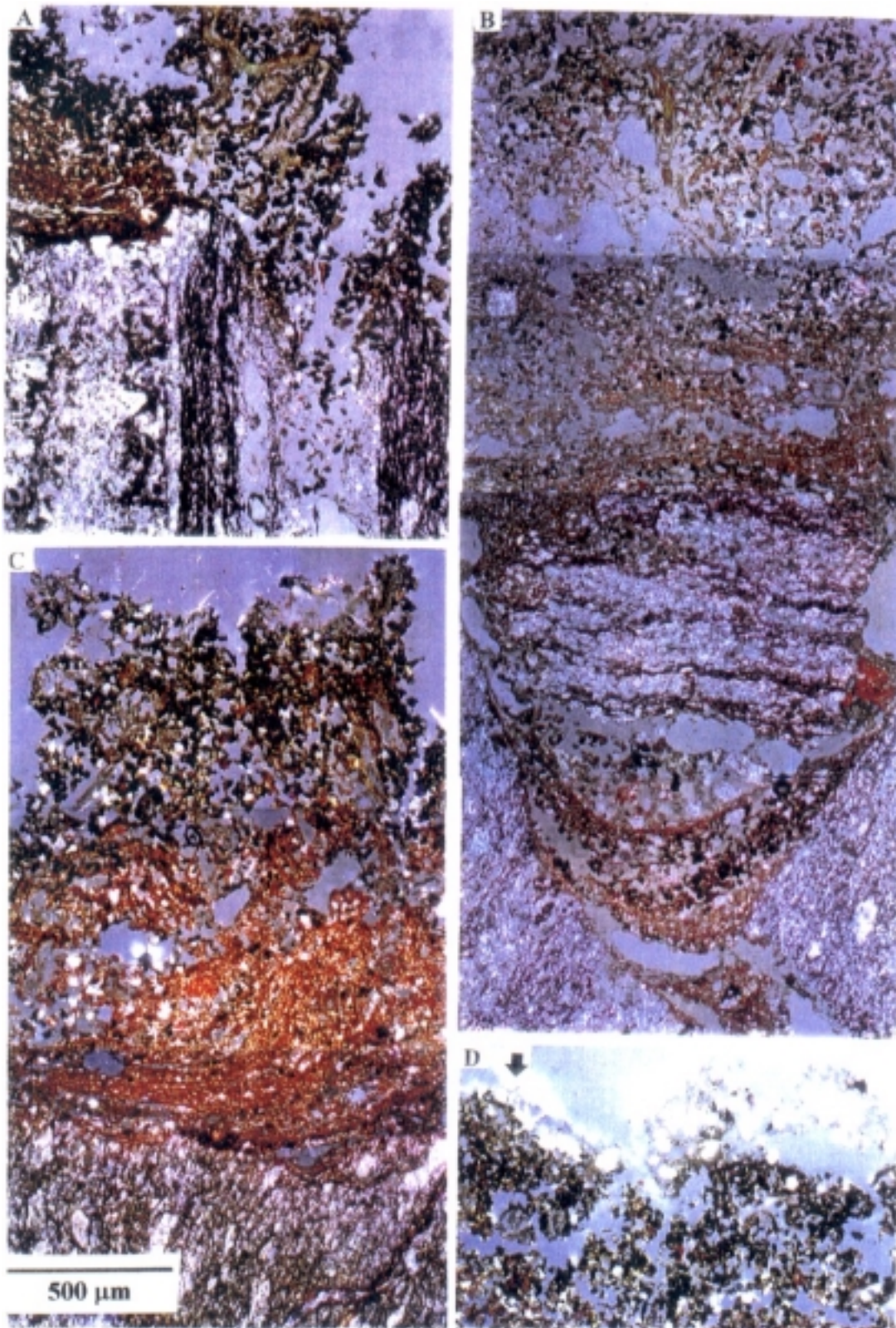


Figura 3 – Fotomicrografias das crostas biológicas sobre saprolitos de XT. A) banda biotítica/muscovítica (à direita), onde a penetração por materiais bioturbados é mais profunda, em relação à banda quartzosa, à esquerda.; B) bolsões fraturados com recobrimento de sucessivas deposições organo-ferruginosas (sápricas), fragmentos de saprolito e nova sucessão micropedogenética, até a crosta biológica superficial, rica em briófitas (topo); C) feições micropedogenéticas de forte redistribuição de complexos descontinuamente sobreposta ao saprolito; D) tapetes descontínuos de líquens e algas sobre horizonte sáprico mais evoluído.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos no presente trabalho revelam um efeito significativo da ciclagem biogeoquímica associada à ocorrência de crostas biológicas na disponibilização de elementos essenciais à instalação de plantas superiores na superfície exposta de saprolitos. A relevância deste fenômeno mostrou-se dependente das características físico-químicas do material parental. Em relação a K e Fe, entretanto, a concentração da fração disponível na crosta (K) e na camada micropedogenizada subjacente (Fe), em todos os substratos analisados, demonstra a existência de uma dinâmica fortemente influenciada pela atividade biológica, a qual sobrepuja a influência da natureza química do saprolito.

Independentemente de eventuais desbalanços químicos de macro e micronutrientes, toxidez ou presença de excesso de sais, as crostas biológicas recobriram de forma conspícua os saprolitos, sendo responsáveis por feições micropedogenéticas evidentes e pelo processo de estruturação biológica da superfície exposta dos taludes. Este processo é capaz de alterar a dinâmica hídrica e erosiva da vertente, o que tem importante implicação geomorfológica e ambiental.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARKER, W. W., WELCH, S. A. e BANFIELD, J. F. Biogeochemical weathering of silicate minerals. In: BANFIELD, J. F. e NEALSON, K. H. (Eds.). **Reviews in Mineralogy. Geomicrobiology: interactions between microbes and minerals.** Washington: Mineralogical Society of America, 35: 391-428, 1998.
- BROWN, D. H. Mineral uptake by lichens. In: BROWN, D. H., HAWKSWORTH, D. L. e BAILEY, R. H. (Eds.) **Lichenology: progress and problems.** London: Academic Press, p. 419-439, 1976. (8th Proc. Int. Symp. University Bristol)
- CHENU, C. Influence of a fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructures. **Soil Biology and Biochemistry**, 21: 299-305, 1989.
- CHENU, C. Clay – or sand – polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: water related properties and microstructure. **Geoderma**, 56: 143-156, 1993.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil. Rio Espera. Folha SF.23-X-B-IV, Estado de Minas Gerais. Escala 1: 100 000. Texto explicativo.** Brasília: DNPM/CPRM, 200 p., 1991.
- DORIOZ, J M., ROBERT, M. e CHENU, C. The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. **Geoderma**, 56: 179-194, 1993.
- EHRlich, H. L. Geomicrobiology: its significance for geology. **Earth-Science Reviews**, 45: 45-60, 1998.
- EMERSON, W. W. The plastic limit of silte, surface soils in relation to their content of polysaccharide gel. **Australian Journal Soil Research**, 33: 1-9, 1995.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo.** 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 212 p., 1997.
- FARIA, J. C. **Dinâmica da água, comportamento térmico e selamento de um podzólico vermelho-amarelo, em relação ao controle de plantas invasoras.** Viçosa: UFV, 75 p., 1996. (Tese M.S.)
- FITZPATRICK, E. A. **Soil microscopy and micromorphology.** Chichester: John Wiley, 304 p., 1993.
- FOX, C. A. Micromorphological characterization of histosols. In: DOUGLAS, L. A. e THOMPSON, M. L. (Eds.). **Soil micromorphology and soil classification.** Madison: Soil Science Society of America, p. 85-104, 1985. (SSSA Spec. Pub. n. 15)

- GOMES, M. A. F. **Intemperismo de anfíbolitos e sua contribuição à gênese de solos de duas províncias metamórficas do Estado de Minas Gerais**. Viçosa: UFV, 138 p., 1988. (Tese M.S.)
- ISKANDAR, I. K. e SYERS, J. K. Metal-complex formation by lichen compounds. **Journal of Soil Science**, 23: 255-265, 1972.
- LYNCH, J. M. e ELLIOTT, L. F. Aggregate stabilization of volcanic ash and soil during microbial degradation of straw. **Applied and Environmental Microbiology**, 45: 1398-1401, 1983.
- MARTIN, J. P. e WAKSMAN, S. A. Influence of microorganisms on soil aggregation and erosion. **Soil Science**, 50: 29-47, 1940.
- NEUMAN, C. M., MAXWELL, C. D. e BOULTON, J. W. Wind transport of sand surfaces crusted with photoautotrophic microorganisms. **Catena**, 27: 229-247, 1996.
- PEELE, T. C. e BEALE, O. W. Effect on runoff and erosion of improved aggregation resulting from the simulation of microbial activity. **Soil Science Society of America**, 6: 176-182, 1941.
- PÉREZ, F. L. Microbiotic crusts in the high equatorial Andes, and their influence on paramo soils. **Catena**, 31: 173-198, 1997.
- TISDALL, J. M. e OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, 33: 141-163, 1982.
- VILES, H. e PENTECOST, A. Problems in assessing the weathering action of lichens with an example of epiliths on sandstone. In: ROBINSON, D. A. e WILLIAMS, R. B. G. (Eds.). **Rock weathering and landform evolution**. Chichester: John Wiley & Sons, p. 99-116, 1994.
- WEED, S. B., DAVEY, C. B. e COOK, M. G. Weathering of mica by fungi. **Soil Science Society of America**, 33: 702-706, 1969.
- WIERZCHOS, J. e ASCASO, C. Mineralogical transformation of bioweathered granitic biotite, studied by HRTEM: evidence for a new pathway in lichen activity. **Clays and Clay Minerals**, 46: 446-452, 1998.
- WILLIAMS, R. B. G. e ROBINSON, D. A. Weathering flutes on siliceous rocks in Britain and Europe. In: ROBINSON, D. A. e WILLIAMS, R. B. G. (Eds.). **Rock weathering and landform evolution**. Chichester: John Wiley & Sons, p. 413-432, 1994.
- ZIMMERMAN, W. J. Microbial biotechnology and applications in agriculture. In: METTING, F. B. (Ed.) **Soil microbial ecology. Applications in agricultural and environmental management**. New York: Marcel Dekker, p. 457-479, 1993.

CROSTAS BIOLÓGICAS EM SAPROLITOS DE GNAISSE: CICLAGEM BIOGEOQUÍMICA, MICROMORFOLOGIA E ENSAIO DE COLONIZAÇÃO

RESUMO

O papel das crostas biológicas nos processos físicos e biogeoquímicos de formação do solo é praticamente desconhecido, embora estas sejam freqüentes na superfície de taludes naturais e antrópicos expostos em domínio tropical úmido. Neste trabalho, foram estudadas crostas biológicas instaladas na superfície de saprolitos gnáissicos expostos em taludes da Zona da Mata de Minas Gerais, em condições variáveis de altitude e grau de intemperismo. Atributos físico-químicos, microestruturais e características da matéria orgânica foram estudados em detalhe. Foi realizado, também, o isolamento de algas, principais organismos colonizadores desses microambientes, objetivando uma visão preliminar da viabilidade de obtenção de inóculo em laboratório para posterior utilização na estabilização de superfícies degradadas. O grau de intemperismo e o caráter máfico ou félsico dos substratos foram determinantes no comportamento dos organismos em relação à ciclagem biogeoquímica, influenciando os valores de pH, a atividade de argila e o caráter eutrófico ou distrófico das crostas e saprolitos. Em geral, observou-se concentração de K e Al trocáveis na crosta, sendo K o elemento mais consistentemente associado à ciclagem biogeoquímica. O mesmo ocorreu em relação a Ca e Mg, exceto nos saprolitos mais máficos, onde a reserva maior mascarou a eficiente ciclagem biogeoquímica. As crostas tenderam também a concentrar P, Mn, Pb e Ni disponíveis, em todos os pontos, embora a contribuição de poluentes atmosféricos, no caso de Pb, possa estar mascarando os reais efeitos da atividade microbiana na mobilidade deste elemento. Os teores de N disponíveis foram elevados, devido à contribuição do N fixado por abundantes cianobactérias. Os valores de Fe-ditionito, juntamente com os resultados das observações micropedológicas, sugerem um modelo de oxidação por influência microbiótica

em microssítios da crosta e da camada micropedogenizada subjacente, baseado na liberação de O₂ pelas cianobactérias e na utilização de quelatos de Fe-MO por bactérias quimiolitotróficas, que derivam energia da oxidação do Fe, promovendo a formação de micronódulos hematíticos. Os dados do fracionamento das substâncias húmicas revelaram o predomínio de formas mais solúveis (ácidos fúlvicos) tanto na crosta quanto na camada micropedogenizada subjacente, indicando o papel relevante dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular nos processos físico-químicos associados às crostas microbióticas. As observações de fotomicrografias produzidas em microscópio eletrônico de varredura ilustram de modo inequívoco o papel da mucilagem de polissacarídeos na estruturação de agregados, unindo a matéria orgânica fresca à parte mineral. Os resultados apontam a perspectiva do uso de inóculo de algas na recuperação de taludes ou áreas degradadas, através da aceleração do processo de sucessão ecológica.

Palavras-chave: crosta biológica, ciclagem biogeoquímica, micromorfologia, cultura de algas

**BIOLOGICAL CRUSTS ON WEATHERED GNEISS:
BIOGEOCHEMICAL CYCLING AND MICROMORPHOLOGICAL
ACTION AND EXPERIMENTAL COLONIZATION**

ABSTRACT

In the tropical humid dominion, biological crusts are widespread on exposed natural and antropic saprolites yet, their biogeochemical and structural role is virtually ignored. In this work, biological crusts developed on gneiss saprolite were studied, in the Zona da Mata of Minas Gerais region, at different

heights and weathering degree. Physical, chemical and microstructural attributes and the organic matter were studied in detail. In addition, algae (cyanobacteria) were isolated in culture medium, as the main organisms present in the biological crusts, aiming to check its feasibility by controlled inoculation in saprolite colonization and stabilization. The weathering degree and mafic or felsic nature of the gneiss have influenced the pH values ranging, clay activity and the eutrophic/dystrophic character of biological crusts and saprolites. In general, K and Al levels tend to concentrate in the biological crusts, together with Ca and Mg, except for the mafic saprolites, where high Ca/Mg reserves have masked the biochemical cycling. Also, available P, Mn, Pb and Ni were concentrated in the crusts in all points, though a possible atmospheric contribution of Pb has been considered. Available N levels were high in the microbiotic crusts, due to N fixed by abundant cyanobacteria. These Fe-ditionite and micropedological observation all suggest a model of Fe oxidation mediated by microorganisms, based on excess O₂ produced by cyanobacteria and further utilization of Fe-MO by chemolithotrophic bacteria, that derive energy from Fe-oxidation, promoting widespread occurrence of hematite micronodules. The humic substances fractionation showed dominance of soluble forms (fulvic acids) both in the microbiotic crusts and underneath, indicating a marked role of low-molecular weight organic acids in the physical-chemical process associated with microbiotic crusts. The SEM observations revealed the marked influence of mucilage to the structural stabilization, bridging the OM/mineral components. This points to a possible use of algae inoculation as a rehabilitation strategy in recently-exposed road-cuts.

Key – words: biological crust, biogeochemical cycling, micromorphology, culture of algal inoculant

1. INTRODUÇÃO

Muitos trabalhos têm ressaltado a importância da composição qualitativa da matéria orgânica na estabilização dos agregados do solo (FORTUN, BENAYAS e FORTUN, 1990). Conforme HAYNES e SWIFT (1990), embora a agregação seja normalmente relacionada ao teor de matéria orgânica, transformações na estabilidade dos agregados podem ocorrer em resposta às alterações no ambiente do solo, antes que alterações significativas no teor total da matéria orgânica sejam observadas.

Baseando-se no estágio de degradação da matéria orgânica, TISDALL e OADES (1982) consideram os agentes de agregação em três grupos principais: 1) agentes transitórios, grupo no qual se incluem os polissacarídeos, atuantes na formação de macroagregados (diâmetro $> 250 \mu\text{m}$) transitoriamente estáveis; 2) agentes temporários, que envolvem raízes e hifas de fungos, formando também macroagregados; e 3) agentes persistentes, referentes aos polímeros orgânicos em associação com as partículas minerais, importantes na nucleação de microagregados (diâmetro $< 250 \mu\text{m}$).

Os autores consideram os agentes persistentes como os principais cimentantes das partículas do solo. Segundo eles, os mecanismos de interação entre polímeros orgânicos e superfícies minerais incluem as associações através

de pontes metálicas, sobretudo de cátions tri- e divalentes, bem como a adsorção direta dos polissacarídeos à superfície das argilas. Nestas condições, os polissacarídeos adquirem certa resistência à decomposição, persistindo no solo por vários anos.

CHENU (1993) e EMERSON (1995) constataram que a adsorção de polissacarídeos à superfície das argilas não tem maiores implicações no arranjo destas partículas, embora suas propriedades sejam significativamente alteradas, resultando num aumento da estabilidade dos agregados em água.

Considerando os trabalhos acima citados, os polissacarídeos, reconhecidos como agentes de agregação por TISDALL e OADES (1982) em seu modelo hierárquico de agregação do solo por influência biológica, seriam mais adequadamente definidos como agentes de estabilização.

DORIOZ, ROBERT e CHENU (1993) admitem que a textura é determinante no processo de estruturação do solo promovido pelas diferentes frações da matéria orgânica. Os efeitos físico-químicos nesse processo aumentam com o tamanho dos organismos e decrescem com o tamanho das partículas minerais. Nesse sentido, os autores assumem que somente raízes podem reorientar as partículas de silte ou areia. OADES (1993), entretanto, acredita que a influência biótica no processo de estruturação é maior em solos arenosos (< 15% de argila), em relação a solos de textura argilosa (> 35% de argila). Nesses últimos, as influências abióticas seriam mais importantes, destacando-se os efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem.

As crostas biológicas, formadas por assembléias de microrganismos, dentre os quais bactérias, fungos, algas e líquens, em associação com plantas inferiores, têm papel significativo no processo de agregação do solo, devido ao invólucro das partículas minerais por tramas de filamentos e cimentantes orgânicos (polissacarídeos). Por esta razão, alguns trabalhos têm ressaltado sua importância na estabilização de solos sobre os quais são esparsas ou ausentes plantas superiores (NEUMAN, MAXWELL e BOULTON, 1996; PÉREZ, 1997; BARKER, WELCH e BANFIELD, 1998). Mas a importância das crostas biológicas na estabilização e recuperação de superfícies minerais vai além disso.

As comunidades componentes das crostas são pioneiras no processo de sucessão ecológica (LONGTON, 1992), mantendo a umidade do solo e disponibilizando elementos essenciais à instalação de plantas superiores através do intemperismo químico do substrato mineral, síntese de compostos orgânicos e fixação de N atmosférico (ZIMMERMAN, 1993; ALBRECHT, 1999).

Os efeitos biológicos no intemperismo do solo envolvem a solubilização e precipitação de elementos, transformação de minerais primários e secundários, formação de depósitos e síntese de minerais (ROBERT e BERTHELIN, 1986). A efetividade da dissolução de minerais por via bioquímica depende, em última análise, da interação entre pH e natureza do ácido orgânico envolvido quanto à capacidade de complexação (disponibilidade de ligantes orgânicos extracelulares) e solubilidade em água (TAN, 1980; STONE, 1998). Conforme STONE (1998), embora os mecanismos de formação de complexos organo-minerais tenham papel importante na dinâmica dos íons metálicos em ambientes naturais, seu entendimento é ainda bastante limitado.

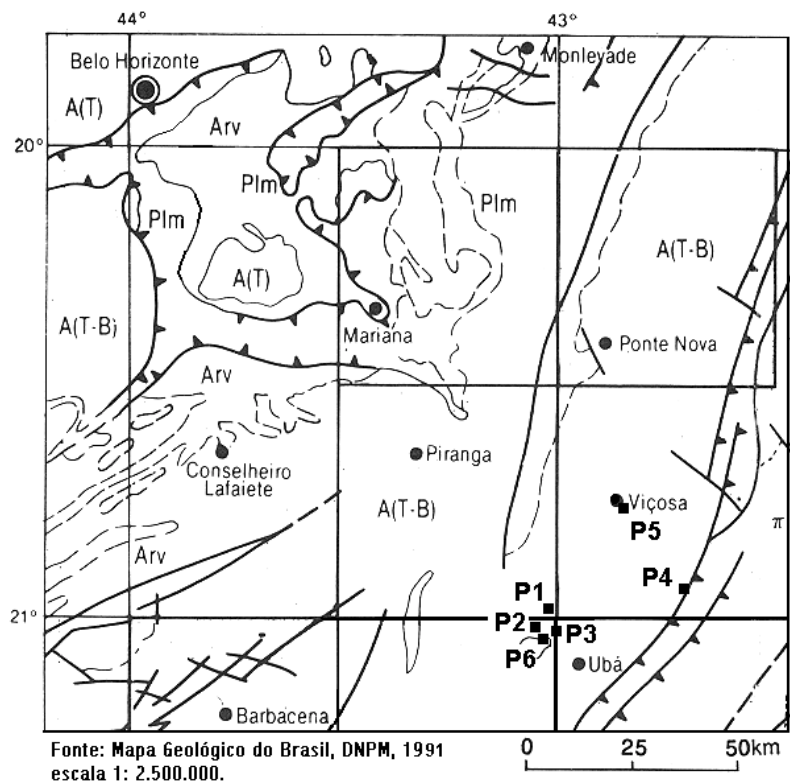
Neste segundo capítulo, foram analisados os efeitos da ciclagem biogeoquímica associada à ocorrência de crostas biológicas na mobilidade de macro, micronutrientes e metais pesados, em saprolitos de gnaiss. O capítulo reporta também os efeitos das associações organo-minerais na formação e estabilização estrutural de agregados bem como as feições micropedológicas das diferentes crostas e da área sob influência destas. A condução de ensaio de inoculação de saprolitos de gnaiss com algas visou o estudo da viabilidade de sua utilização na proteção de taludes expostos, através da aceleração do processo natural de sucessão ecológica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição das áreas de amostragem

Amostras representativas de superfícies colonizadas em saprolitos desenvolvidos de substratos gnáissicos foram coletadas em taludes naturais e antrópicos expostos na porção sudeste do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 20°40' e 21°10'S e 42°30' e 43°05' WGr. (Figura 1). Os locais selecionados para amostragem foram **P1** – Paula Cândido; **P2** – mina de caulim/Ubari; **P3** – córrego das Canjicas/base da serra de Ubari; **P4** – serra de São Geraldo; **P5** – campus UFV; **P6** – alto da serra de Ubari.

A região é marcada por clima úmido, apresentando verões quentes, coincidentes com a estação chuvosa, e invernos amenos, com curta estação seca. A pluviosidade média anual varia entre 1200 e 1500 mm e a temperatura, entre 21,8 e 19,5 °C. Os principais litótipos regionais são representados por gnaisses bandados gerados em zona de cisalhamento de alto e baixo ângulo, migmatizados em graus variados, inseridos no domínio da Província Geotectônica Mantiqueira (DNPM, 1991). A composição mineralógica desses litótipos mostra presença de plagioclásio cálcico, quartzo, biotita, anfibólio e muscovita em proporções variadas, além de traços de microclina, clorita, apatita, zircão, epidoto, titanita e granada.



A (T) - Arqueano indiferenciado retrabalhado no Ciclo Transamazônico
A (T-B) - Arqueano indiferenciado retrabalhado nos Ciclos Transamazônico e Brasiliano; (π) charnoquito
Arv - Supergrupo Rio das Velhas
Plm - Supergrupo Minas

Figura 1 - Locais selecionados para amostragem.

Informações referentes à inclinação e orientação dos taludes e atitude dos planos de xistosidade em relação ao eixo dos corte foram consideradas na escolha das áreas de amostragem (Quadro 1). As coletas foram feitas através de microtrincheiras, sendo discriminadas amostras da cobertura orgânica superficial, camada intermediária (aproximadamente 0-5 mm de profundidade) e saprolito (abaixo de 50 mm).

Quadro 1. Caracterização dos taludes e composição das crostas biológicas.

Substrato	Eixo talude	Inclinação Talude	Composição da crosta
Ponto 1	N69W	70°	Predomínio de algas esponjosas, alaranjadas; briófitas; líquens; restos vegetais de pteridófitas.
Ponto 2	N24W	60°	Predomínio de briófitas; líquens; tapetes algais.
Ponto 3	N62E	80°	Predomínio de briófitas; tapetes algais.
Ponto 4	N94W	70°	Predomínio de briófitas; líquens.
Ponto 5	N57W	50°	Predomínio de líquens; algas esponjosas, alaranjadas.
Ponto 6	N85W	85°	Predomínio de tapetes algais espessos; briófitas.

2.2. Análises físicas, químicas e mineralógicas

Em laboratório, as amostras foram submetidas a análises físicas, sendo consideradas a densidade de partículas, densidade do solo, porosidade, análise textural e percentagem de agregados, por via seca (EMBRAPA, 1997).

As análises químicas de rotina compreenderam a determinação de pH em água (relação 1:2,5), teores disponíveis de P, K, Fe, Zn, Mn, Cu (extrator Mehlich 1), teores trocáveis de Ca, Mg, Al (extrator KCl 1 mol/L), e acidez potencial (H+Al – extrator CaAc 0,5 mol/L, pH 7,0).

A disponibilidade de metais pesados (Cd, Cr, Pb e Ni) foi determinada pelo método Mehlich modificado (EMBRAPA, 1997). Amostras de 10 cm³ de solo (TFSA) foram colocadas em erlenmeyers de 125ml, onde foram adicionados 50 ml de solução mista de ácidos (HCl 0,05 mol/L + H₂SO₄ 0,0125 mol/L). A solução foi agitada por 5 min. em agitador mecânico, sendo imediatamente filtrada. A determinação dos elementos foi feita diretamente no extrato então obtido, em aparelho de espectrofotometria de absorção atômica.

Para a extração de elementos totais, utilizou-se solução triácida (HNO₃, HClO₄ e HF), conforme EMBRAPA (1997). As determinações foram feitas em

espectrofotômetro de absorção atômica (Ca, Mg, Al, Fe, Cu, Zn, Mn, Cd, Cr, Pb, Ni) e espectrofotômetro de chama (K).

Os teores de óxidos de ferro e alumínio cristalinos na fração argila das amostras referentes à camada intermediária (\approx 0-5 mm) foram determinados a partir de três extrações sucessivas com solução de citrato-ditionito (MEHRA e JACKSON, 1960; COFFIN, 1963), e os teores de óxidos amorfos, com oxalato de amônio (McKEAGUE e DAY, 1966). As frações desses elementos ligadas à matéria orgânica do solo também foram determinadas, através de extração com solução mista de CuCl 0,5 mol/L + KCl 0,5 mol/L (adaptado de SOON, 1993).

Na determinação das frações de ferro e alumínio ligadas à matéria orgânica, amostras de 3,0 g de solo (TFSA) foram colocadas em tubos de centrífuga com capacidade para 50 ml, onde se adicionaram 30 ml de solução extratora. As suspensões foram agitadas por 10 min. em agitador mecânico e, em seguida, centrifugadas a 3000g por 10 min. O extrato obtido foi filtrado em papel de filtro lento, sendo a determinação feita diretamente no filtrado, em espectrofotômetro de absorção atômica.

A determinação de nitrogênio total foi feita pelo método Kjeldahl de destilação a vapor (BREMNER, 1996; TEDESCO, WOLKWEISS e BOHNEN, 1985) e a de carbono total através da oxidação da matéria orgânica por via úmida, utilizando-se dicromato de potássio em meio sulfúrico (método Walkley-Black, conforme NELSON e SOMMERS, 1982).

Na caracterização do carbono orgânico, a extração química e fracionamento das substâncias húmicas em ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina, foi feita segundo a técnica de solubilidade diferencial em meio alcalino (Monier et al., 1962, citado por GUERRA e SANTOS, 1999). A determinação do carbono orgânico nas frações foi feita também através da oxidação da matéria orgânica por via úmida, utilizando-se dicromato de potássio em meio sulfúrico, com aquecimento externo.

Na etapa de extração e fracionamento das substâncias húmicas, amostras de 1,0 g de TFSA foram colocadas em tubos de centrífuga de 15 ml, onde foram acrescentados 10 ml de solução NaOH 0,1 mol/L. Os tubos foram agitados e,

então, deixados em repouso por 24 h. Os tubos foram centrifugados a 3000 g, por 20 min.. Em seguida, o sobrenadante assim obtido foi transferido para novos tubos de centrífuga com capacidade para 50 ml. Aos tubos de 15 ml foram adicionados 9 ml da solução de NaOH 0,1 mol/L. Os tubos foram novamente agitados e levados à centrífuga, sendo o sobrenadante acrescentado aos 10 ml já separados nos tubos de 50 ml. O mesmo procedimento foi repetido por mais duas vezes, totalizando um volume final de \simeq 40 ml. Neste ponto, 3 ml de NaOH 0,1 mol/L foram acrescentados aos tubos de 15 ml, onde restava a fração húmica em meio ao material mineral, sendo os tubos guardados em geladeira para análises futuras.

Os ácidos húmicos e fúlvicos presentes nas soluções transferidas para os tubos de 50 ml foram separados reduzindo-se o pH a um valor inferior a 2 (1,5-2,0), através da adição de gotas de H₂SO₄ 1:1. As soluções foram deixadas em repouso por 16 h, período no qual houve a total floculação dos ácidos húmicos. Os tubos de 50 ml foram, então, centrifugados a 2000g, por 15 min., e as suspensões obtidas, contendo os ácidos fúlvicos, transferidas para balões volumétricos de 50 ml, completando-se o volume com água destilada. Em seguida, 40 ml de NaOH 0,1 mol/L foram acrescentados aos tubos de 50 ml, onde restavam os ácidos húmicos. Os tubos foram agitados para que a fração ácido húmico fosse redissolvida, sendo as soluções assim obtidas transferidas para balões volumétricos de 50 ml. O volume dos balões foi completado também com solução de NaOH 0,1 mol/L.

Na determinação do teor de carbono das frações húmicas, alíquotas de 5 ml foram tomadas dos extratos contendo os ácidos fúlvicos, sendo transferidas para tubos de digestão, onde foram acrescentados 5 ml de K₂Cr₂O₇ 0,25 mol/L e 20 ml de H₂SO₄ concentrado. Os tubos foram deixados em bloco digestor por 1 h, a uma temperatura de 150° C. Paralelamente, foram preparadas quatro provas em branco, duas das quais não foram aquecidas.

Após 24 h, as soluções foram transferidas para erlenmeyers com capacidade para 150 ml, sendo o volume completado com água destilada para \simeq 75 ml. Foram então adicionados às soluções 2 ml de H₃PO₄ concentrado e \simeq 0,5 g

de KF. A titulação das soluções foi feita com $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2 (\text{SO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,05 mol/L, na presença do indicador ferroin.

O mesmo procedimento foi seguido na determinação do teor de carbono da fração ácido húmico, tendo sido alteradas as concentrações de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ e de $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2 (\text{SO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ para 0,5 e 0,1 mol/L, respectivamente. Na determinação do teor de carbono da fração humina, todo o material obtido na etapa anterior, referente à extração e fracionamento, foi transferido para tubo de digestão, após duas lavagens sucessivas do recipiente com 3 ml da solução NaOH 0,1 mol/L. Ao tubo de digestão foram acrescentados 10 ml de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1,25 mol/L, repetindo-se, então, os procedimentos utilizados na determinação do teor de carbono das frações ácido fúlvico e húmico. Na fase de titulação, a concentração de $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2 (\text{SO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ foi alterada para 0,5 mol/L.

Para o cálculo do teor de carbono nas frações ácido fúlvico e ácido húmico, utilizou-se a seguinte equação:

$$C \text{ (dag/kg)} = (V_{\text{BAQ}} - V_{\text{A}}) \cdot (1 + f) \cdot M \cdot 3 \cdot (1/m_{\text{solo}}) \cdot (VT / VP)$$

onde

V_{BAQ} – volume de sulfato ferroso amoniacal utilizado na titulação do branco aquecido (ml)

V_{SBAQ} – volume de sulfato ferroso amoniacal utilizado na titulação do branco sem aquecimento (ml)

V_{A} – volume de sulfato ferroso amoniacal utilizado na titulação da amostra (ml)

f – fator de correção $[(V_{\text{BSAQ}} - V_{\text{BAQ}}) / V_{\text{BAQ}}]$

M – concentração da solução de sulfato ferroso amoniacal (mol_c/L)

3 – g / mol_c de C

m_{solo} – massa da amostra de solo (g)

VT – volume total de extrato aferido (ml)

VP – volume de extrato pipetado (ml)

Para o cálculo do teor de carbono na fração humina, utilizou-se a equação abaixo:

$$C \text{ (dag/kg)} = (V_{\text{BAQ}} - V_{\text{A}}) \cdot (1 + f) \cdot M. 3. (1/m_{\text{solo}})$$

A fração argila da camada intermediária (\approx 0-5 mm) foi caracterizada mineralogicamente por meio de difratometria de raio-X, tendo sido confeccionadas lâminas de argila natural e desferrificada. Foram considerados também, nessas últimas, tratamentos com KCl 1mol/L; MgCl₂ 1 mol/L; e MgCl₂ – glicerol (WHITTIG e ALLARDICE, 1986).

2.3. Micromorfologia

Para a avaliação das feições micromorfológicas e pedogenéticas da crosta biológica e do saprolito adjacente, amostras indeformadas foram impregnadas com resina de poliéster contendo corante fluorescente (Uvitex OB; Ciba-Geigy), sendo confeccionadas lâminas delgadas no sentido transversal à crosta. As lâminas foram observadas em microscópio petrográfico (modelo OLYMPUS DX40) e suas feições micropedológicas descritas segundo FITZPATRICK (1993). As fotografias foram tomadas em filme Kodacolor, 35 mm, ISO 100.

Amostras indeformadas da crosta biológica foram também analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) (modelo JEOL 840) para a visualização das interações organo-minerais no processo de formação de agregados. As fotografias foram feitas em filme Kodak, Verichrome pan, VP 120, ISO 125.

2.4. Cultura de algas e inoculação de saprolitos

Amostras de crostas indeformadas foram armazenadas em geladeira logo após a coleta em campo. Tais amostras foram utilizadas na obtenção de culturas mistas de algas, possibilitando uma melhor visualização da diversidade biológica na crosta bem como a avaliação da viabilidade do preparo de inóculo em laboratório.

Em ambiente esterilizado, as crostas foram raspadas e transferidas para erlenmeyers de 125 ml contendo 50 ml da solução Bold Basal Medium¹ (METTING, 1994), para crescimento de microalgas (clorófitas, xantófitas e cianobactérias). O meio de cultura foi previamente autoclavado por 30 min., a uma temperatura de 121° C, conforme procedimento descrito por NEUMAN, MAXWELL e BOULTON (1996).

Após três semanas, tendo sido observado um desenvolvimento expressivo de algas no meio de cultura, procedeu-se a repicagem do material. A segunda repicagem possibilitou o estabelecimento de uma cultura mista de microalgas, com ausência de resíduos minerais. Cada meio de cultura foi então agitado separadamente e aspergido sobre blocos indeformados de saprolitos gnáissicos estéreis, em duas repetições. Os blocos incubados foram mantidos em condições ambientes, em laboratório, sendo apenas protegidos por filme de PVC transparente. A umidade foi mantida pela aspersão regular da solução Bold Basal Medium sobre a superfície inoculada. Um bloco indeformado não inoculado foi mantido sob as mesmas condições dos blocos inoculados, servindo como controle. O estabelecimento das comunidades sobre a superfície dos blocos se tornou evidente já na segunda semana após a incubação.

Foram confeccionadas lâminas do material desenvolvido no meio de cultura, referente à segunda repicagem. As lâminas foram examinadas em

¹ O meio líquido para o crescimento de microalgas é constituído por solução contendo macronutrientes (NaNO₃, K₂HPO₄, KH₂PO₄, MgSO₄.7H₂O, CaCl₂.2H₂O), agentes quelantes (Na₂-EDTA, KOH) e solução de micronutrientes (FeSO₄.7H₂O + H₂SO₄ conc., H₃BO₃, MnCl₂.4H₂O, ZnSO₄.7H₂O, MoO₃, CuSO₄.5H₂O, Co(NO₃)₂.6H₂O), a pH 6,6.

microscópio (OLYMPUS DX40), com câmera fotográfica acoplada. As lâminas foram fotografadas em filme Kodacolor, 35 mm, ISO 100.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Atributos físicos

A transformação do saprolito fresco em camada micropedogenizada abaixo da crosta é evidenciada pela redução dos valores de silte e aumento do teor de argila (Quadro 2) em todos os pontos estudados (exceto em P2, onde o teor de argila não sofreu incremento importante na camada intermediária).

Quadro 2 – Caracterização física, segundo as faixas de amostragem nos diferentes substratos.

Substrato	Textura			Argila	Porosidade total
	Areia Grossa	Areia fina	Silte		
			%		%
Ponto 1					
Camada Inter.	25,66	15,75	31,64	26,95	51,45
Saprolito	25,66	15,94	37,05	21,36	50,93
Ponto 2					
Camada Inter.	50,79	25,02	14,49	9,70	52,20
Saprolito	41,29	28,72	19,08	10,90	51,99
Ponto 3					
Camada Inter.	42,83	24,35	17,97	14,85	51,10
Saprolito	49,97	22,43	18,30	9,30	48,74
Ponto 4					
Camada Inter.	70,78	26,93	1,89	0,50	48,27
Saprolito	81,73	16,17	2,10	0,00	47,97
Ponto 5					
Camada Inter.	18,25	35,80	33,57	12,38	57,73
Saprolito	23,54	33,80	42,56	0,09	57,65
Ponto 6					
Camada Inter.	40,90	22,66	28,99	7,45	49,93
Saprolito	41,92	22,99	34,62	0,46	49,67

O ponto P1 apresentou os maiores valores de percentagem de argila, embora os incrementos de argila do saprolito para a camada micropedogenizada tenham sido bem mais significativos em P5 e P6, evidenciando forte influência microbiótica na pedogênese. Em geral, os teores de areia grossa e fina não

mostraram tendência nítida de aumento ou redução, em virtude da heterogeneidade e alternância de bandas máficas e félsicas nos gnaisses estudados.

Com referência às classes de agregados por via seca (Quadro 3), observou-se que os pontos que apresentaram maior incremento de argila na camada intermediária (P1, P3, P5 e P6), mostraram também maior percentagem de agregados nas faixas de 1,0-2,0 e 2,0-4,0 mm, onde a estruturação pedobiológica se faz mais evidente. A ação dos microrganismos na estruturação de agregados parece vinculada à abundante produção de mucilagem de polissacarídeos, a qual tende a unir a matéria orgânica fresca à parte mineral (TISDALL e OADES, 1982; OADES, 1984).

Quadro 3 - Percentagem de agregados, determinada por via seca, referente à camada intermediária (\approx 0-5 mm).

Substrato	> 4	4,0 – 2,0	2,0 – 1,0	1,0 – 0,5	0,5 – 0,25	<0,25 mm
Ponto 1	0,56	9,76	30,49	26,50	14,57	18,11
Ponto 2	1,00	4,02	7,55	23,90	29,31	34,22
Ponto 3	3,14	7,51	11,44	12,22	25,68	40,02
Ponto 4	1,64	2,98	4,88	20,43	32,14	37,93
Ponto 5	0,57	7,29	11,09	11,24	19,44	50,38
Ponto 6	0,13	2,70	13,11	20,51	23,77	39,77

Nos solos onde predominam agregados menores que 1,0 mm, há uma grande contribuição da fração areia nos valores observados, o que mascara a real influência microbiótica na formação de agregados.

3.2. Atributos químicos

Os valores de pH em água (Quadro 4) reduziram-se do saprolito para a crosta e variaram de 4,2 a 6,1, sendo que os pontos P3 e P4 mostraram-se menos ácidos nos substratos e nas crostas, o que denota o menor grau de intemperismo desses saprolitos em relação aos demais. Os teores de P disponível mostraram tendência a aumento do saprolito para a crosta, nos solos onde os teores de P no saprolito eram baixos (P1, P2 e P6), e redução, naqueles onde os teores de P eram elevados (P3, P4 e P5). Os valores de P não foram consistentemente associados à ciclagem, tendo em vista a ineficiência do extrator ácido para formas orgânicas.

Os teores de K trocável foram sempre maiores na crosta, com fatores de concentração na ordem de 3,9 a 69,8 vezes, em relação aos teores observados no saprolito, diminuindo em termos absolutos nos saprolitos. No caso do Ca e Mg, ocorreu semelhante tendência, exceto em solo derivado de saprolito quimicamente mais rico e máfico (P4), onde os valores tenderam a aumentar em profundidade, mascarando os efeitos da ciclagem biogeoquímica na crosta.

Os teores de Al trocável foram também aumentados do saprolito para a crosta, independentemente do aumento dos teores de argila, indicando efetiva concentração biogênica e possível aumento da atividade microbiana em menores valores de pH. Desse modo, a acidez orgânica e a oxidação de Fe, conforme discutido adiante, estariam provocando solubilização de Al, com parcial complexação Al-MO. Há poucos estudos sobre os efeitos tóxicos de Al em microrganismos.

Os valores de H+Al acompanharam o aumento de carbono em superfície, mas, em P6, onde a crosta microbiana era mais espessa e dissociada do substrato mineral subjacente, os valores de H+Al foram baixos em relação ao carbono orgânico total, que alcançou 23,5%. Os valores de CTC total foram elevados nos pontos P3 e P4, quimicamente mais ricos e máficos que os demais, com aumento generalizado do saprolito para as camadas superficiais. Isto evidencia a contribuição dos colóides orgânicos na geração de cargas, mesmo

em crostas microbióticas delgadas. A saturação de bases foi elevada (> 50%) apenas nos perfis de saprolitos mais ricos e máficos (P3 e P4). Nesses pontos, os valores de saturação diminuíram em superfície, aumentando, em contrapartida, os valores de H+Al.

De maneira geral, os saprolitos de P1, P2, P5 e P6 apresentaram caráter álico, enquanto P3 e P4 são caracterizados como eutróficos. Nesse sentido, pode-se, em princípio, separar as crostas em dois grupos distintos pelos atributos químicos, grau de intemperismo e/ou maficidade do material parental. Os saprolitos em P3 e P4 correspondem a áreas instáveis do ponto de vista geomorfológico, o que implica na exposição de materiais frescos à superfície e condicionamento de maior riqueza química. Os demais substratos ocorrem em áreas de maior estabilidade estrutural, tendo sido submetidos a acentuado pré-intemperismo. Essa interpretação é corroborada pelos valores de atividade de argila calculados para a camada intermediária. Valores elevados foram encontrados na camada micropedogenizada de P3, P4 e P6 (51,9, 261,9 e 58,2 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, respectivamente), sendo mais baixos os valores nos demais substratos (entre 9,5 e 35,2 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$).

Quadro 4 – Caracterização química de rotina dos diferentes substratos, segundo as faixas de amostragem.

Substrato	pH H ₂ O	P mg/dm ³	K mg/dm ³	Ca ²⁺ cmol _c /dm ³	Mg ²⁺ cmol _c /dm ³	Al ³⁺ cmol _c /dm ³	H+Al cmol _c /dm ³	SB cmol _c /dm ³	CTC (t) cmol _c /dm ³	CTC (T) cmol _c /dm ³	V %	m %	Ativ. argila cmol _c /dm ³
Ponto 1													
Crosta	4,3	1,89	194,0	0,65	0,58	0,80	5,8	1,71	2,46	7,56	22,7	30,4	—
Camada Inter.	4,9	0,29	59,0	0,31	0,31	0,60	1,8	0,76	1,36	2,56	33,0	43,6	9,50
Saprolito	4,6	0,29	8,0	0,05	0,04	0,80	2,0	0,10	0,90	2,10	5,0	88,4	—
Ponto 2													
Crosta	4,2	1,31	146,0	0,77	0,48	0,80	6,2	1,63	2,43	7,88	20,7	32,8	—
Camada Inter.	4,7	0,29	15,0	0,23	0,15	0,50	2,1	0,41	0,86	1,78	10,3	51,8	18,35
Saprolito	4,8	0,47	8,0	0,14	0,08	0,60	2,0	0,23	0,78	2,18	10,8	69,9	—
Ponto 3													
Crosta	5,8	7,13	173,0	2,49	2,68	0,10	3,9	5,61	5,71	9,51	59,2	1,7	—
Camada Inter.	6,1	11,68	83,0	2,55	2,96	0,10	2,0	5,71	5,81	7,71	74,1	1,7	51,91
Saprolito	6,0	36,61	43,0	2,00	2,76	0,10	1,3	4,87	4,97	6,17	78,9	2,0	—
Ponto 4													
Crosta	5,2	17,16	83,0	1,98	2,92	0,50	4,1	5,11	5,56	9,21	55,5	8,0	—
Camada Inter.	5,7	21,91	28,0	1,84	2,60	0,40	1,7	4,51	4,86	6,26	72,0	7,2	261,92
Saprolito	6,1	27,19	21,0	2,48	3,05	0,30	1,2	5,58	5,83	6,83	81,7	4,2	—
Ponto 5													
Crosta	4,2	5,61	120,0	0,61	0,34	1,00	6,3	1,25	2,20	7,60	16,4	43,2	—
Camada Inter.	4,4	5,60	38,0	0,23	0,14	0,80	3,9	0,46	1,21	4,36	10,5	61,9	35,22
Saprolito	4,8	20,09	13,0	0,13	0,07	0,50	2,7	0,22	0,67	2,92	7,6	66,4	—
Ponto 6													
Crosta	4,4	11,86	559,0	1,38	1,91	2,30	1,8	4,72	7,02	6,57	50,4	32,7	—
Camada Inter.	4,9	1,41	30,0	0,17	0,23	0,50	1,9	0,47	0,97	4,36	20,2	51,3	58,52
Saprolito	4,8	1,60	8,0	0,07	0,04	0,60	1,4	0,12	0,72	3,04	7,8	83,5	—

— Dados não disponíveis.

3.3. Microelementos e metais pesados

Os teores de micronutrientes e metais pesados, determinados por espectrofotometria de absorção atômica, estão ilustrados no Quadro 5. Observa-se que os teores de Fe, Mn, Zn e Ni disponível foram bem superiores nos saprolitos e crostas desenvolvidos de materiais quimicamente mais ricos e máficos (P3 e P4), embora os teores na crosta sejam inferiores aos teores verificados no saprolito. Os teores na crosta dependem da ciclagem biogeoquímica ou mesmo de outros fatores tais como disponibilidade de água, luz e espécies de microrganismos presentes.

Quadro 5 - Caracterização química em relação a microelementos e metais pesados disponíveis, segundo as faixas de amostragem nos diferentes substratos.

Substrato	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd	Cr	Pb	Ni
mg/dm ³								
Ponto 1								
Crosta	53,4	15,1	1,33	0,20	Nd	Nd	0,17	0,023
Camada Inter.	32,9	8,0	1,98	3,05	Nd	Nd	0,05	Nd
Saprolito	31,2	0,8	0,08	0,12	Nd	Nd	0,09	Nd
Ponto 2								
Crosta	55,9	71,9	1,44	1,05	Nd	Nd	0,74	0,004
Camada Inter.	32,6	17,0	2,34	4,36	Nd	Nd	0,21	Nd
Saprolito	38,1	5,1	0,10	0,11	Nd	Nd	0,20	Nd
Ponto 3								
Crosta	67,3	102,9	1,61	1,01	Nd	Nd	0,10	0,022
Camada Inter.	44,0	50,6	1,24	2,22	Nd	Nd	0,01	0,009
Saprolito	55,8	16,3	0,52	0,55	Nd	Nd	0,05	Nd
Ponto 4								
Crosta	175,1	79,4	3,75	0,38	Nd	Nd	0,01	0,037
Camada Inter.	164,8	38,7	7,85	3,64	Nd	Nd	Nd	0,023
Saprolito	115,2	9,7	3,36	0,10	Nd	Nd	0,01	Nd
Ponto 5								
Crosta	129,8	109,6	2,76	0,47	Nd	Nd	0,26	0,068
Camada Inter.	63,1	101,2	4,37	4,01	Nd	Nd	0,14	0,027
Saprolito	28,8	6,8	0,19	0,09	Nd	Nd	0,13	Nd
Ponto 6								
Crosta	37,6	54,2	2,23	0,12	Nd	Nd	0,31	0,016
Camada Inter.	20,9	13,2	1,98	2,47	Nd	Nd	0,17	0,025
Saprolito	17,6	0,8	0,14	0,10	Nd	Nd	0,09	Nd

Nd – valores abaixo do limite de detecção.

Os valores de Cu e Pb não acompanharam as tendências de aumento em P3 e P4 verificadas para outros elementos, ao contrário, os valores de Pb foram consistentemente menores nestes pontos, em relação aos demais. Sobretudo no que se refere ao P2, os teores de Pb podem ter sofrido influência de aportes de descarga de veículos, uma vez que os teores foram negligenciáveis em P4, único ponto onde não havia trânsito de veículos, devido à inexistência de acesso por estrada. Nas crostas estudadas, não foram detectados teores mensuráveis de Cd e Cr.

3.4. Teores totais de macro, micronutrientes e metais pesados

Observou-se uma tendência de concentração de K total na crosta dos pontos P2, P5 e P6 e redução em superfície, em P1, P3 e P4. Os valores elevados nos pontos P3 e P4 se devem ao K presente principalmente na estrutura de feldspatos e ilitas, abundantes na constituição mineral dos saprolitos, com menor grau de intemperismo, e não se refletiram nos teores trocáveis (vide Capítulo 1). Nestas condições, a ciclagem biogeoquímica de K, com tendência à concentração na superfície microbiótica nos demais pontos, torna-se pouco evidente. Em P1, a redução dos teores de K em direção às camadas superficiais provavelmente resulta de uma menor eficiência microbiótica na solubilização de K.

Da mesma forma, observou-se uma tendência de concentração de Mg na crosta dos pontos P2, P5 e P6 e redução em superfície, em P1, P3 e P4. Os teores de Mg nos pontos P3 e P4, significativamente maiores que os teores verificados para os demais pontos, são a melhor indicação do caráter máfico do substrato gnáissico. O mesmo pode ser dito em relação ao Ca, sendo os maiores teores em P4 explicados pela ocorrência de anfibólios na constituição mineralógica do saprolito.

Quadro 6 – Teores totais de macro, micronutrientes e metais pesados, segundo as faixas de amostragem nos diferentes substratos.

Substrato	P	K	Ca	Mg	Al	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd	Cr	Pb	Ni
<u>mg/dm³</u>													
Ponto 1													
Crosta	—	854,5	474,6	804,5	92261,8	52237,2	112,4	38,9	18,4	2,8	111,9	19,5	50,1
Camada Inter.	—	940,1	1614,9	86,8	72471,3	51416,7	143,0	40,0	27,8	1,5	117,4	14,3	55,2
Saprolito	—	1419,9	338,6	107,6	98200,4	59556,3	92,6	42,4	20,1	0,2	99,7	11,0	55,0
Ponto 2													
Crosta	—	320,1	595,5	711,9	69139,5	42832,6	638,6	41,3	50,4	1,6	40,3	148,1	47,0
Camada Inter.	—	62,4	1277,5	501,9	59220,7	27943,0	103,5	47,2	38,0	0,7	12,0	67,3	49,4
Saprolito	—	30,9	1072,3	618,4	58213,0	37228,5	62,3	71,5	37,7	2,7	32,1	71,1	55,5
Ponto 3													
Crosta	—	11900,1	468,8	2023,9	61432,0	61150,4	684,4	77,1	41,6	1,6	94,2	40,5	66,2
Camada Inter.	—	26632,5	177,0	3194,4	63520,4	52910,1	597,5	91,5	51,8	1,3	91,5	47,6	91,2
Saprolito	—	27777,9	165,9	3438,0	66386,8	49524,0	426,4	108,8	56,2	3,3	96,0	49,9	103,5
Ponto 4													
Crosta	—	22500,2	2033,2	2024,8	48531,6	43992,8	557,2	81,1	24,0	1,5	42,0	17,2	28,4
Camada Inter.	—	24537,5	2212,1	2934,4	57149,4	52773,9	790,0	113,2	28,6	0,1	36,2	21,7	36,7
Saprolito	—	29489,6	3677,9	3052,9	41222,4	59808,3	873,3	118,5	21,0	2,7	66,9	18,2	46,7
Ponto 5													
Crosta	—	1745,3	722,4	1798,7	65336,3	106248,8	1123,6	92,3	58,0	1,1	113,7	34,0	85,8
Camada Inter.	—	1461,8	246,6	1321,7	58357,0	89690,6	1438,1	82,2	64,4	0,5	97,1	53,3	75,0
Saprolito	—	1063,0	863,2	1120,9	67893,7	100991,6	1034,4	85,0	64,7	3,1	85,7	54,7	94,2
Ponto 6													
Crosta	—	1121,8	1346,6	1244,0	59524,1	25238,2	123,6	11,1	16,0	0,7	14,2	32,7	15,4
Camada Inter.	—	397,4	349,0	622,9	88636,0	33996,4	39,3	9,2	19,9	0,1	9,9	23,1	24,2
Saprolito	—	415,5	96,1	202,2	86286,1	32040,1	13,4	18,0	16,2	2,2	10,6	14,8	24,0

— Dados não disponíveis.

Os maiores teores de Al foram observados em P1 e P6, refletindo um maior grau de intemperismo destes substratos, em relação aos demais. Os menores valores se referem ao ponto P4, devido à maficidade do material de origem.

De maneira geral, os teores totais de Fe e Mn foram influenciados tanto pelo grau de intemperismo quanto pela maficidade do material de origem. Em P1, P2 e P6, a contribuição dos teores de Fe na forma de óxidos cristalinos nos teores totais observados foi significativa, confirmando o intenso pré-intemperismo do material de origem. Nas lâminas de micromorfologia, as quais serão discutidas a seguir, são nítidas as ocorrências de nódulos hematíticos na transição crosta/camada micropedogenizada, o que explica a concentração de Fe nas camadas superficiais de P2, P3 e P5.

Elevados teores totais de Fe e Mn foram observados em P5, refletindo a maficidade do material de origem, embora esta não tenha se caracterizado pelos teores totais de Ca e Mg. Em P1, P4 e P6, os teores de Fe total foram maiores em profundidade.

Devido à maior mobilidade do Mn em relação ao Fe, os teores deste elemento tenderam a valores mais elevados em direção às camadas superficiais de P1, P3 e P5, concentrando-se nas crostas de P2 e P6. Apenas em P4, onde observou-se caráter máfico e menor percentagem de matéria orgânica na composição da crosta, os teores de Mn foram maiores em profundidade.

Os teores de Zn foram maiores onde os saprolitos apresentaram caráter máfico, ou seja, nos pontos P3, P4 e P5, havendo uma tendência geral de redução dos teores em direção às camadas superficiais.

Os teores de Cu foram variáveis entre os pontos amostrados, apresentando, em geral, valores maiores em profundidade, exceto em P2 e P4. Os maiores teores foram observados em P3 e P5, onde os saprolitos apresentam caráter máfico.

Para todos os pontos amostrados, observou-se uma tendência de redução do teor de Cd do saprolito para a camada micropedogenizada de até 27 vezes

(P4) e de concentração na crosta microbiótica. Os teores foram baixos em todos os pontos, não sofrendo variação significativa entre eles.

Da mesma forma, foi observada concentração de Cr na camada orgânica de todos os pontos amostrados, com valores elevados em P1 e P5 ($> 100 \text{ mg/dm}^3$). Ao contrário, os teores de Ni tenderam, de maneira geral, a valores maiores em profundidade. Teores mais elevados de Ni foram verificados em P3 e P5. Os elementos Cr e Ni não apresentaram relação direta com a maficidade dos saprolitos, contrariamente ao esperado.

Os teores de Pb foram variáveis entre os pontos amostrados, tendendo a concentrar-se na camada orgânica de P1, P2, e P6. Os teores observados em P2 foram significativamente mais altos que os teores nos demais pontos, atingindo $148,1 \text{ mg/dm}^3$ na camada orgânica. Neste ponto, o teor de Pb na crosta foi 2 vezes maior que o teor verificado na camada micropedogenizada subjacente. Como observado na discussão dos teores disponíveis, provavelmente, estes teores estejam sendo incrementados pela contaminação de Pb proveniente de descarga de veículos, tendo em vista que os menores teores de Pb foram observados em P4, único ponto onde não havia trânsito de veículos na vizinhança.

3.5. Frações de Fe e Al na camada micropedogenizada

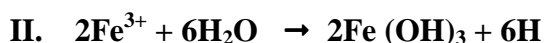
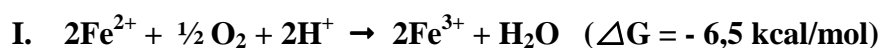
Em termos absolutos, os teores de Fe cristalino “livre”, extraído com citrato-ditionito (Fe_D), foram menores em P4 e P6, evidenciando o baixo grau de alteração destes saprolitos em relação aos demais (Quadro 7). Maior grau de intemperismo foi observado em P5, o qual apresenta valores elevados ($11,6 \text{ dag/kg}$). Os teores de Fe amorfo, extraído com oxalato (Fe_o), foram negligíveis em P1, P2, P4 e P6, e bastante baixos em P3 e P5, o que evidencia a ocorrência de um microambiente favorável à oxidação do Fe em formas de melhor cristalinidade.

Quadro 7 – Frações de Fe e Al extraídas por oxalato (Fe_O e Al_O), citrato-ditionito (Fe_D e Al_D) e solução mista de cloreto de cobre e cloreto de potássio (Fe-MO e Al-MO), na camada intermediária (0-5 mm). Os dados reportam a percentagem de Fe₂O₃ e Al₂O₃ na fração argila. Fetotal refere-se ao teor no solo.

Substrato	Fe _O	Fe _D	Fetotal	Fe-MO	Al _O	Al _D	Altotal	Al-MO
	dag/kg			cmol _c /dm ³	dag/kg			cmol _c /dm ³
Ponto 1	0,06	7,05	5,14	Nd	0,46	1,09	7,24	0,56
Ponto 2	0,09	6,7	2,79	Nd	0,70	1,69	5,92	0,44
Ponto 3	0,38	7,4	5,29	Nd	0,56	1,55	6,35	0,14
Ponto 4	0,08	4,9	5,27	Nd	0,28	1,01	5,71	0,18
Ponto 5	0,13	11,6	8,96	Nd	0,71	2,14	5,83	0,73
Ponto 6	0,02	4,6	3,39	Nd	0,52	0,73	8,86	0,40

Nd – valores abaixo do limite de detecção.

Os elevados valores de Fe_D juntamente com os resultados das observações micropedológicas, discutidos a seguir, sugerem um papel relevante da atividade microbiótica na formação de nódulos hematíticos em microssítios da crosta e da camada micropedogenizada subjacente. Em condições de boa aeração e pH entre 4 e 5, existe a possibilidade de utilização de quelatos de Fe-MO por bactérias quimiorganotróficas (Kullman e Schweisfurth, 1978, citado por SILVER, EHRLICH e IVARSON, 1986). Tais bactérias usam o carbono orgânico do ligante como fonte de energia, liberando Fe³⁺ em soluções bem próximas da neutralidade. Por outro lado, bactérias quimiolitotróficas, em meio ácido, podem utilizar a energia liberada na oxidação do Fe²⁺ em seu metabolismo, através da reação I:



A precipitação subsequente do Fe³⁺ (reação II) libera prótons (H⁺), acidificando o meio, o que pode resultar na desestabilização dos aluminossilicatos, com conseqüente liberação de Al trocável (SHEN, PEPPER, HASSETT e STUCKI, 1998).

Conforme SCHWERTMANN (1988), maior atividade de Al no sistema pode inibir a formação de goethita em favor da hematita. O processo de

substituição isomórfica do Fe pelo Al na estrutura da goethita e a cinética de formação da hematita a partir de gel amorfo de ferridrita são termodinamicamente favorecidos pela rápida desidratação e elevação de temperatura. A taxa de formação de hematita aumenta em até 50 vezes à temperatura de 45° C, em relação ao processo de formação a 28° C. Tal variação de temperatura é de ocorrência esperada em crostas microbióticas, que experimentam diariamente extremos térmicos e hídricos.

Desse modo, a oxidação de Fe^{2+} por influência microbiótica e posterior precipitação na zona de transição entre a crosta e a camada micropedogenizada subjacente poderia explicar a abundância de micronódulos hematíticos observada nas fotomicrografias das crostas estudadas, descritas adiante.

O grau de substituição de Al nos óxidos de Fe presentes foi variável, independentemente da riqueza da fração oxidada (Fe_D), devendo relacionar-se com a proporção de Hm/Gt (SCHWERTMANN, 1988), embora essa proporção não tenha sido determinada no presente trabalho. Os pontos P5 e P6 mostraram maior grau de substituição de Al, sendo o valor em P6 bastante expressivo. Os teores de Al extraído por oxalato (Al_O) foram, de forma geral, consideravelmente maiores que aqueles verificados para as formas amorfas de Fe.

De maneira geral, os teores de Al complexado pela matéria orgânica foram mais baixos nos perfis P3 e P4, onde o pH menos ácido favorece a ocorrência de formas cristalinas e menor solubilidade de Al. Nos demais pontos, os valores de pH devem favorecer altas concentrações de Al trocável, conduzindo a um aumento do processo de substituição isomórfica. No caso de P5, os teores de Al complexado à matéria orgânica (Al-MO) foram mais elevados, sugerindo um provável processo competitivo entre a substituição isomórfica de Al nos óxidos de Fe e a quelação Al-MO. As reações de Al com ácidos orgânicos de baixo peso molecular (Kwong e Huang, 1981, e Violante e Huang, 1985, citados por HUANG e VIOLANTE, 1986) e ácidos fúlvicos (Kodama e Schnitzer, 1980, citado por HUANG e VIOLANTE, 1986) podem levar à formação de complexos orgânicos insolúveis de hidróxido de Al, de baixa cristalinidade.

3.6. Mineralogia da camada micropedogenizada

Os dados relativos à mineralogia da fração argila (Quadro 8) mostraram domínio de caulinita em todos os solos (exceto em P4), com acessórios 2:1 (VHE ou ilitas). Apenas em P4 houve predomínio de ilitas e esmectitas (2:1), como reflexo do menor grau de alteração, corroborado pelos resultados das análises químicas referentes aos teores totais e trocáveis, discutidos anteriormente. A presença de VHE e gibbsita denota a natureza pré-intemperizada de P1, P2, P5 e P6.

Quadro 8 – Mineralogia da fração argila referente à camada intermediária (\approx 0-5 mm).

Substrato	Mineralogia da fração argila ¹
Ponto 1	Ct > VHE > Gb ^{tr} > Hm ^{tr} > Fd ^{tr}
Ponto 2	Ct > VHE > Gb ^{tr}
Ponto 3	Ct > Esm > Ill ^{tr} > Pg/ Fd ^{tr}
Ponto 4.	Ill > Ct = Esm > Pg/ Fd ^{tr} > Anf ^{tr}
Ponto 5	Ct > VHE > Fd ^{tr}
Ponto 6	Ct > Ill > VHE > Hm ^{tr} > Fd ^{tr}

¹ Ct – caulinita Esm - esmectita Gb – gibbsita Ill - ilita e micas 2:1 não expansíveis
VHE – vermiculita com hidróxi-intercamada Pg/Fd – plagioclásios e feldspatos
indiscriminados Hm – hematita Anf- anfibólio
^{tr} Minerais - traço.

3.7. Fracionamento das substâncias húmicas

Os dados do fracionamento das substâncias húmicas (Quadro 9) indicam o predomínio de formas mais solúveis (fração ácido fúlvico) tanto na crosta quanto na camada micropedogenizada subjacente, com valores muito baixos de ácidos húmicos, fração mais humificada, exceto nos pontos P4 e P2, que apresentaram teores significativos na camada micropedogenizada. Os elevados

teores de humina nas crostas, sobretudo nos pontos P3 e P4, não refletem o grau de humificação da matéria orgânica, sendo, na verdade, influenciados pela ocorrência de material fresco, principalmente restos vegetais de briófitas não decompostos, considerados juntamente à fração humina.

Os resultados sugerem o papel relevante dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular, os quais desempenham importante papel nos processos bioquímicos e físicos nas crostas biológicas. Ácidos alifáticos simples são continuamente produzidos nos solos por microrganismos (Flaig, 1971, citado por HUANG e VIOLANTE, 1986) tais como líquens e cianobactérias, que podem sintetizar ácidos cítrico e oxálico. A complexação de Al e Fe por ácidos orgânicos, conforme descrito anteriormente, é da maior relevância nas crostas estudadas.

Os teores de N nas crostas são elevados, possivelmente em função da abundância de cianobactérias, fixadoras de N, em sua composição. Os valores verificados são comparáveis aos valores normalmente encontrados no horizonte A de solos sob vegetação de mata, o que demonstra a importância das algas fixadoras de N na ciclagem biogeoquímica em materiais incipientemente pedogenizados.

Em geral, a relação C/N apresenta-se equilibrada na crosta orgânica, exceto no ponto 6, e bastante alta em subsuperfície, com valores crescentes em profundidade, evidenciando o baixo grau de humificação do material orgânico solúvel.

Quadro 9 – Teores de carbono nas frações ácido fúlvico (FAF), ácido húmico (FAH) e humina (HUM) e relações com o teor de carbono orgânico total (COT).

Substrato	FAF	FAH % COT	HUM	COT	MO dag/kg	N	C/N
Ponto 1							
Crosta	53,77	0,00	46,23	7,53	12,98	0,314	23,98
Camada Inter.	19,87	0,00	80,13	1,26	2,17	0,025	50,60
Saprolito	—	—	—	0,69	1,19	0,008	83,13
Ponto 2							
Crosta	40,52	0,00	59,48	8,25	14,23	0,217	38,03
Camada Inter.	30,05	69,95	0,00	0,97	1,67	0,018	52,68
Saprolito	—	—	—	0,70	1,20	0,011	64,22
Ponto 3							
Crosta	19,91	9,11	70,98	4,49	7,73	0,243	18,45
Camada Inter.	Nd	Nd	Nd	1,14	1,97	0,049	23,12
Saprolito	—	—	—	0,83	1,44	0,020	41,29
Ponto 4							
Crosta	23,82	0,00	76,18	2,17	3,74	0,112	19,23
Camada Inter.	51,59	48,41	0,00	0,81	1,40	0,017	47,36
Saprolito	—	—	—	0,71	1,23	0,002	322,72
Ponto 5							
Crosta	24,43	9,41	66,16	6,28	10,82	0,303	20,69
Camada Inter.	29,29	0,00	70,71	1,83	3,15	0,059	30,96
Saprolito	—	—	—	0,59	1,01	0,003	210,71
Ponto 6							
Crosta	60,04	3,18	36,78	23,50	40,51	0,271	86,65
Camada Inter.	100	0,00	0,00	1,11	1,92	0,015	72,54
Saprolito	—	—	—	0,88	1,51	0,004	237,83

Nd – valores abaixo do limite de detecção.

— Dados não disponíveis

3.8. Micropedologia

Com base nas observações micropedológicas, resumidas no Quadro 10, as crostas desenvolvidas sobre gnaiss mostraram notável diversidade, ilustrando a complexa interação biogeoquímica mesmo em materiais de natureza geológica semelhante (vide Capítulo 1). A microestrutura desenvolvida logo abaixo da crosta mostrou tipologias desde grãos simples (P4 e P5), microgranular de natureza mais oxidada (P1), até blocos subangulares (P2). Nos saprolitos apédicos (com ausência de estrutura), ocorreu abundante pseudomorfose de biotita em caulinita em todos os pontos, sendo menos pronunciada em P4, onde a biotita se encontra pouco alterada. As partículas de areia são predominantemente quartzo e,

secundariamente, pseudomorfos de biotita caulinitizados de grandes dimensões (silte até areia grossa). Em P4, existem também grãos de anfibólio pouco alterado, com uma auréola de alteração ferruginosa.

Na crosta e na camada micropedogenizada, há ocorrência generalizada de micronódulos e micropontuações hematíticas, que sugerem uma forte participação microbiótica em sua gênese (SCHWERTMMAN, 1988; FISCHER, 1988).

Quadro 10 – Características micropedológicas selecionadas das crostas estudadas até 3 cm de profundidade, aproximadamente.

Feições de micromorfologia	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Crosta biológica	Algas e fungos filamentosos, briófitas e líquens; restos vegetais de pteridófitas (rizóides).	Tapete de algas filamentosas, raras briófitas, restos indecompostos de rizóides.	Briófitas abundantes, algas filamentosas, líquens foliosos.	Algas filamentosas, fungos e raras briófitas. Tapetes algais raros.	Tapetes algais, fungos, briófitas e líquens.
Microestrutura do horizonte micropedogenizado	Microgranular composta; grãos de quartzo com areia fina predominante.	Blocos subangulares, com grãos de quartzo arestados.	Grãos simples.	Grãos simples a granular, com domínio de areia fina.	Planar com poucos microagregados.
Feições de alteração mineral e pedogenética	Concentração ferruginosa no contato camada microped./saprolito; pseudomorfose de biotita em caulinita e feldspato em gibbsita.	Pseudomorfose de feldspatos em gibbsita e caulinita e de mica em caulinita; nódulos de hematita/magnetita.	Restos parcialmente caulinitizados de biotita e feldspato; anfíbólios pouco alterados.	Ferruginização no contato com o saprolito; concentração de areia fina ; planos de descolamento.	Forte ferruginização (hematítica) envolvendo grãos de quartzo, com preenchimento de poros no saprolito; pseudomorfose de feldspatos e micas em caulinita.
Estruturas associadas	Oxidação biogênica em micronódulos hematíticos.	Cutans; ferruginização das briófitas; pedoplasmação completa; argiluviação nos macroporos.	Ferruginização em restos orgânicos, bordas de biotitas e auréolas hematíticas nos anfíbólios.	Nódulos hematíticos e micropontuações; pseudomorfose completa de biotita em caulinita; raros cutans no saprolito.	Micronódulos hematíticos biogênicos; bolsões orgânicos indeterminados.

Nota: o ponto 3 não foi estudado em seção-fina

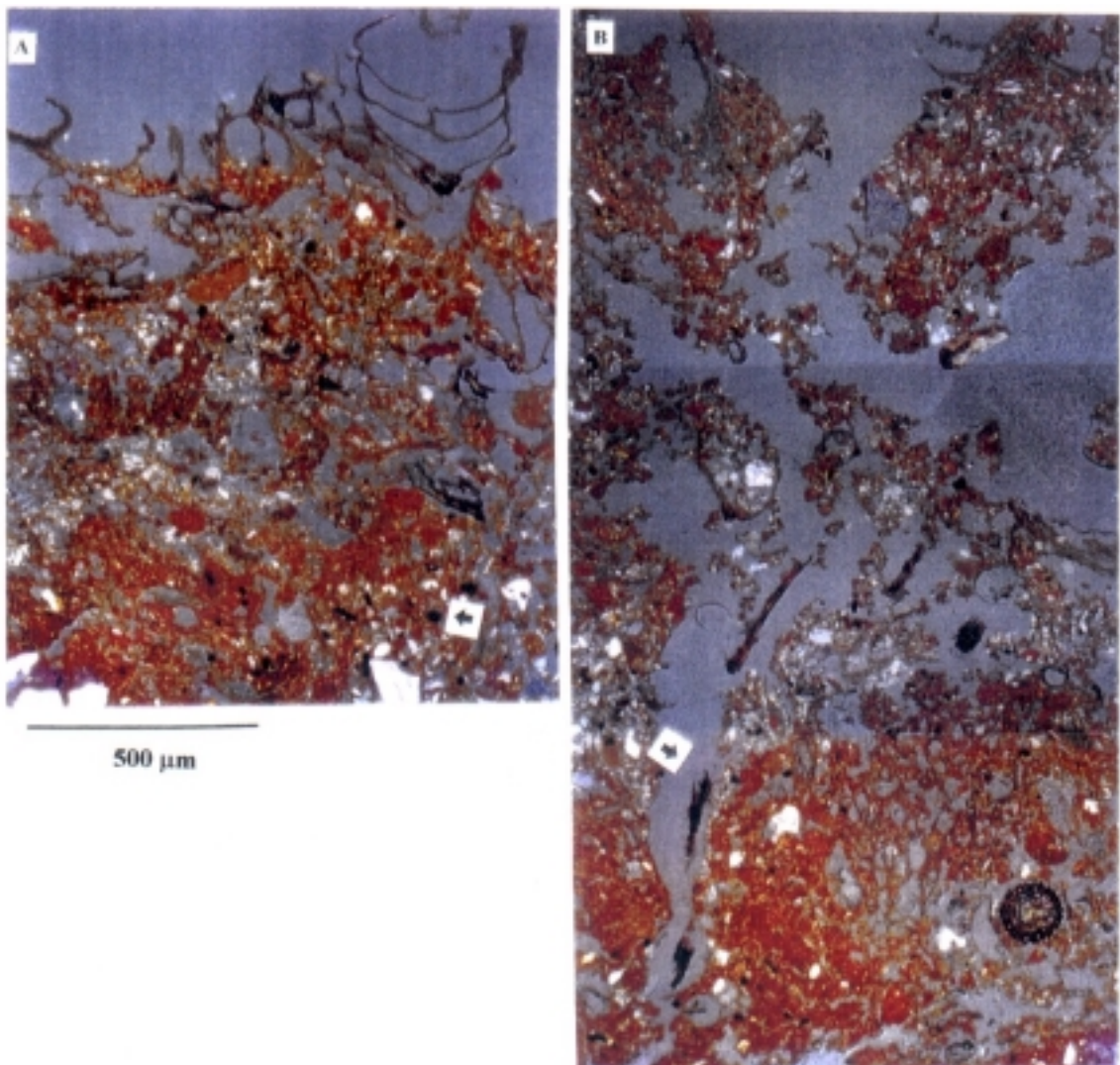


Figura 2 – Fotomicrografias da crosta biológica do Ponto 1. A) Presença de líquens foliosos recobrendo horizonte micropedogenizado, com abundantes micronódulos hematíticos; B) horizonte micropedogenizado com fendas preenchidas por rizóides de pteridófito. Nota-se ferruginização na parte inferior da camada micropedogenizada, com plasma argiloso avermelhado.

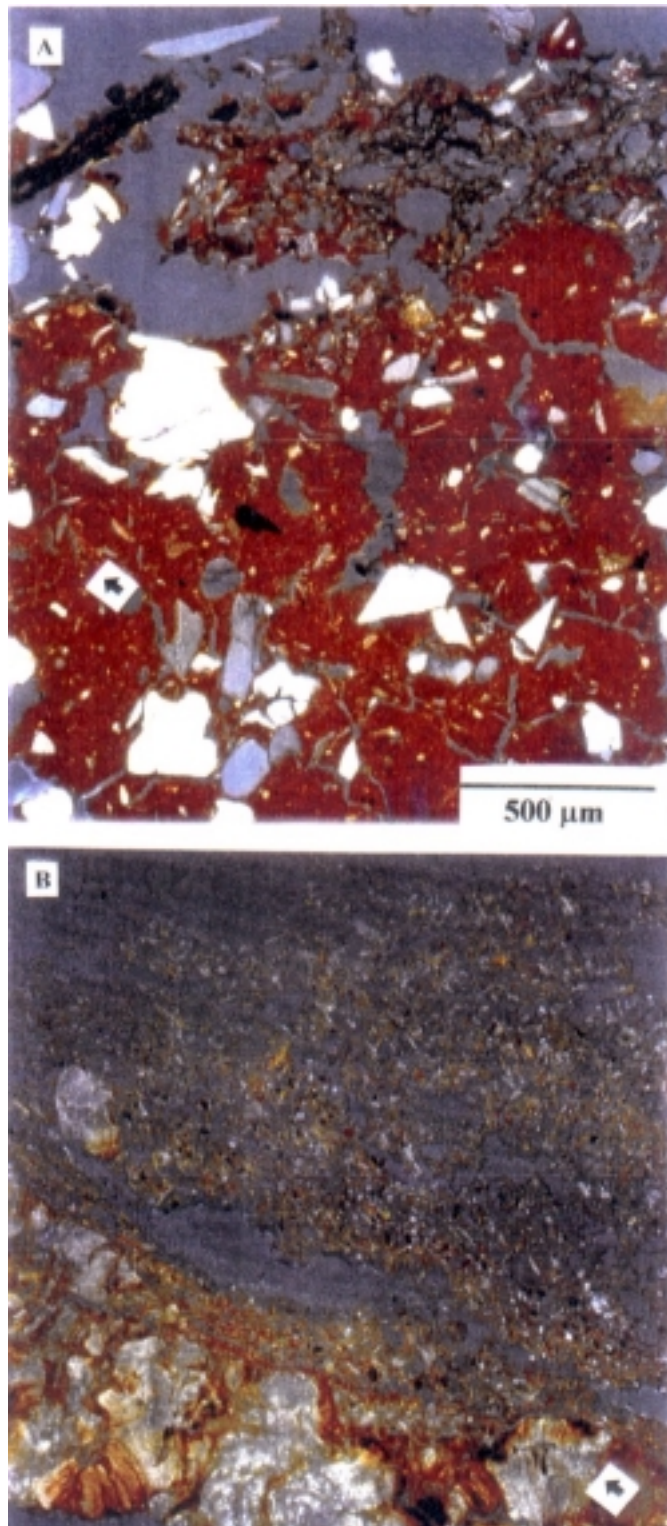


Figura 3 – Fotomicrografia da camada superior da crosta biológica nos Pontos 2 e 5. A) Estrutura em blocos com incipiente desenvolvimento de cutans de tensão (zonas amareladas) na superfície de agregados, em P2. Nota-se ferruginização na parte superior da crosta; B) crosta microbiótica bem desenvolvida, em P5, com abundantes micropontuações biogênicas e pseudomorfose de biotita em caulinita no saprolito.

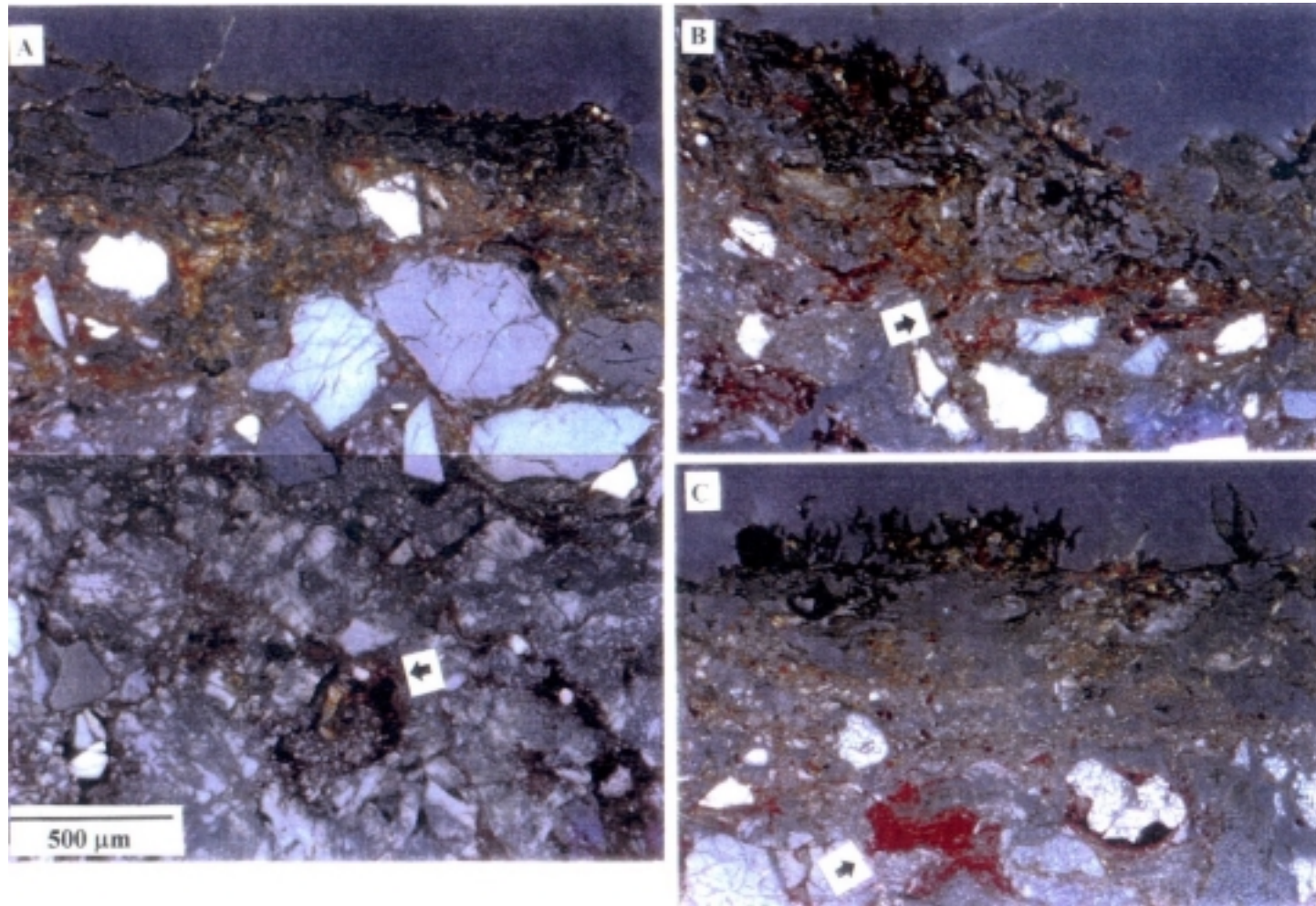


Figura 4 – Fotomicrografia ilustrando as diferentes feições da crosta biológica no Ponto 6. A) Tapete de algas (cianobactérias) sobre a camada micropedogenizada, onde parece haver uma transformação Hm → Gt (xantização), com formação de micropontuações hematíticas e recobrimento ferruginoso dos grãos de quartzo do saprolito; B) e C) crosta de líquens e briófitas sobre tapete de algas decompostas. Nota-se abundância de micropontuações hematíticas e zonas de plasma hematítico avermelhado no saprolito.

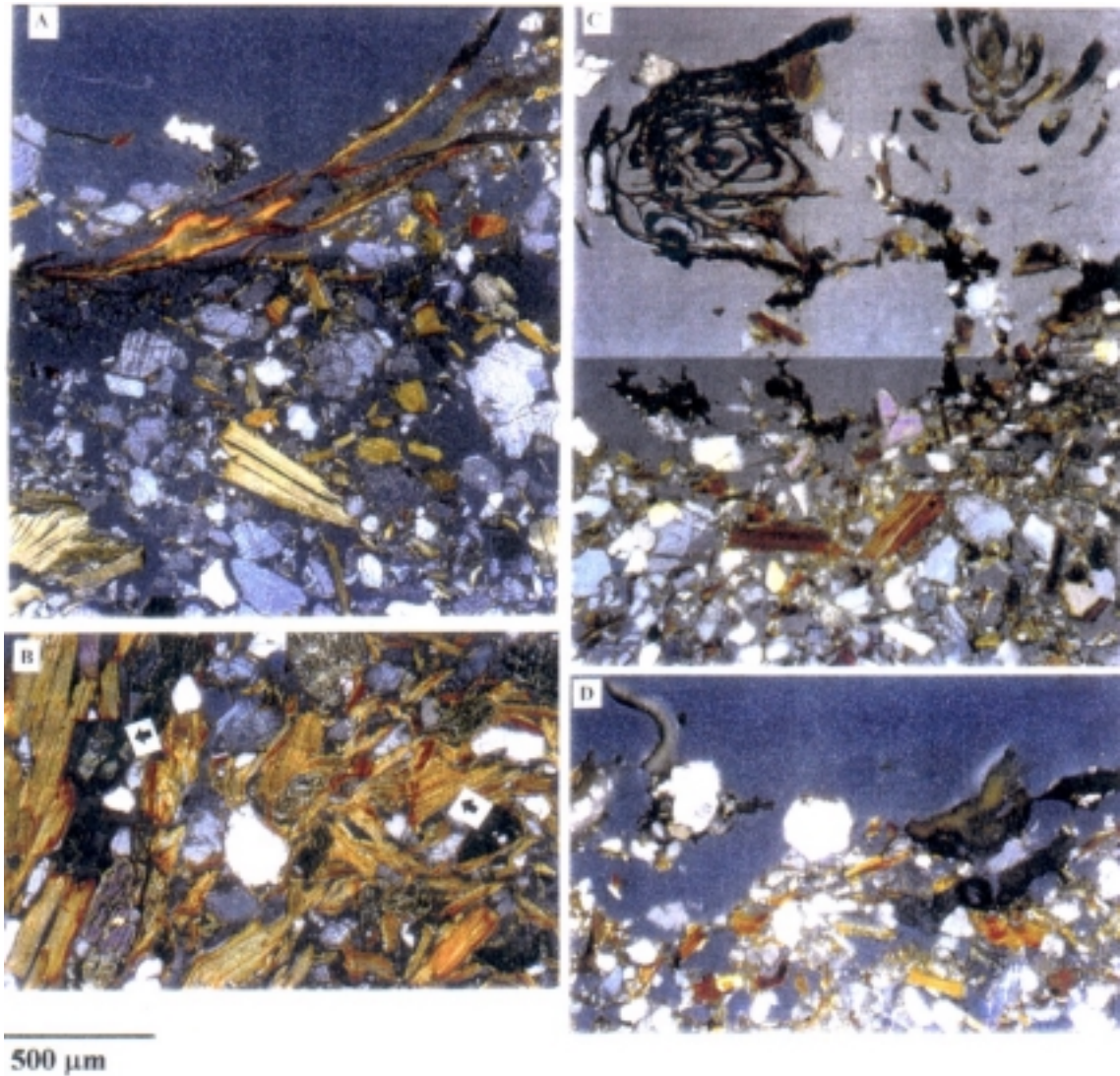


Figura 5 – Fotomicrografias ilustrando as diferentes feições de crostas do Ponto 4. A) Briófitas em processo de decomposição sobre camada pouco alterada e micropedogenização em grãos simples de biotita, quartzo e anfibólios; B) banda máfica do saprolito gnáissico, com biotita em processo de esfoliação e grãos de anfibólios (esverdeados), responsáveis pelos altos teores de Ca no saprolito; C) briófitas em processo de decomposição sobre camada delgada, micropedogenizada em grãos simples; D) talos de líquens fruticosos sobre a camada micropedogenizada.

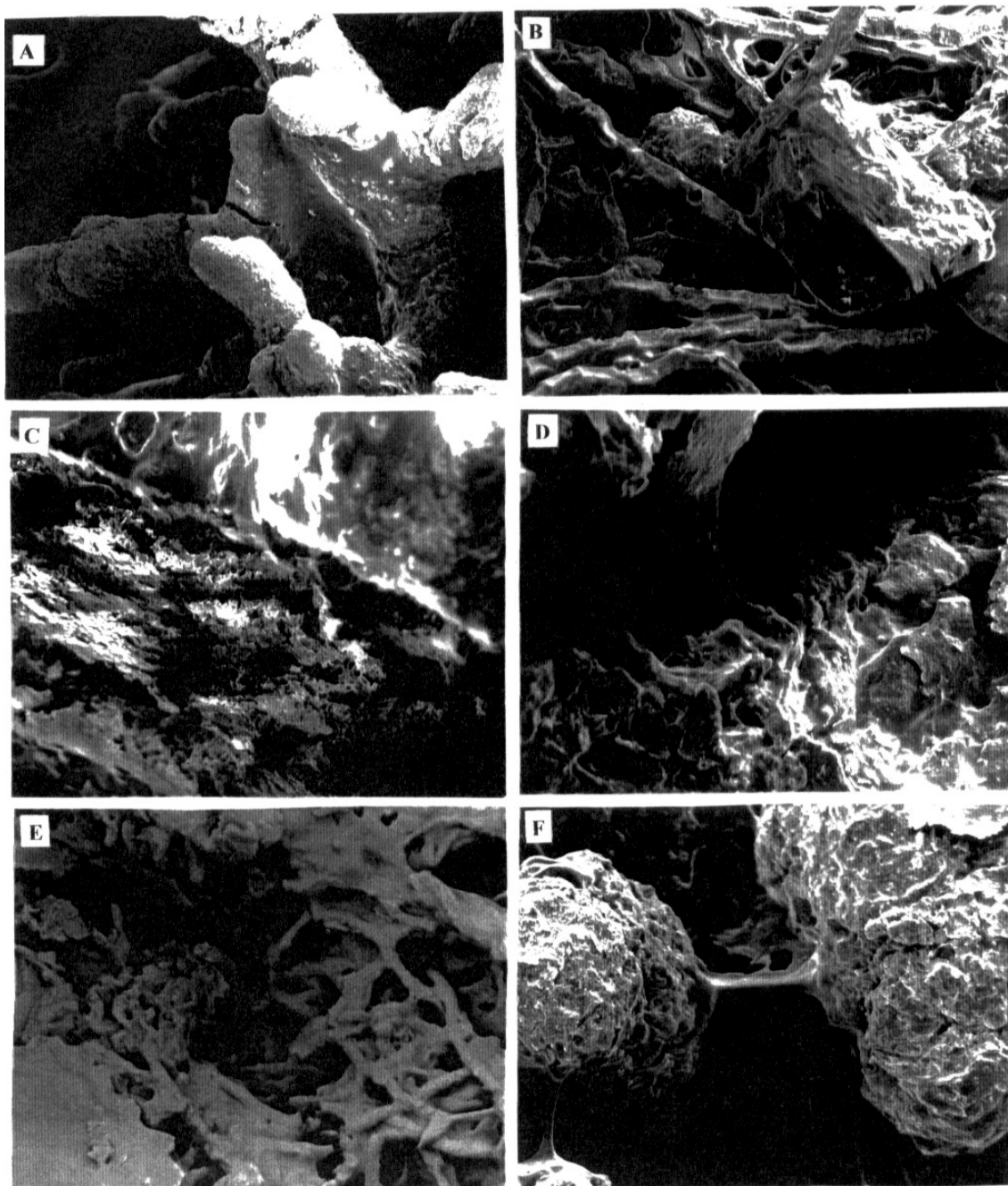


Figura 6 – Fotomicrografias em MEV ilustrando aspectos da interação biota/saprolito nas crostas do Ponto 5. A) Talo de líquen folioso (75X); B) cianobactérias filamentosas envolvendo grãos de quartzo e agregados organo-argilosos com abundante muco polissacarídeo (200X); C) contato da base do líquen com o saprolito (100X); D) pontes de polissacarídeos ligando as partículas minerais e recobrando planos de fraqueza do saprolito; E) cianobactérias filamentosas em processo de senescência (200X); F) agregados minerais subesféricos ligados por exsudatos de polissacarídeos, com importante papel na estabilidade de agregados (500X).

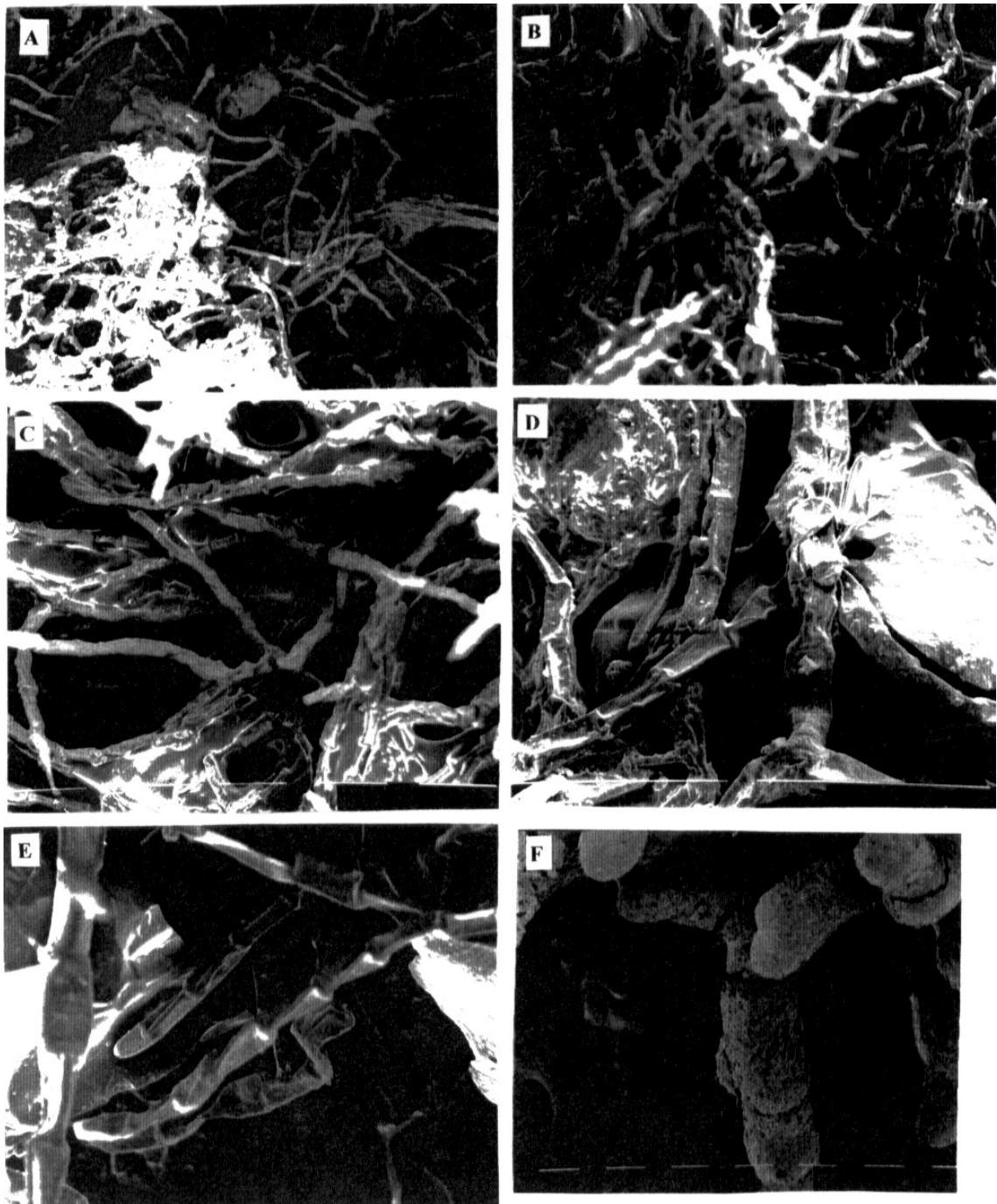


Figura 7 – Fotomicrografias em MEV ilustrando aspectos da interação biota/saprolito nas crostas do Ponto 4. A) trama de cianobactérias filamentosas com muco polissacarídeo envolvendo grãos minerais (50X); B) e C) detalhe nos filamentos de cianobactérias sobre matriz mineral com abundante exsudação de polissacarídeos; D) detalhes (500X) do filamento algal de cianobactérias ligando grão de quartzo (direita) e agregado argiloso (esquerda); E) filamentos de cianobactérias envolvendo grão de quartzo (500X); F) talo de líquen folioso (150X), na parte inferior da crosta.

3.9. Desenvolvimento de algas em blocos indeformados

Algas fotoautotróficas como as cianobactérias _organismos procariotos, morfológicamente e fisiologicamente semelhantes às bactérias (ALBRECHT, 1999)_ sintetizam os metabolitos essenciais a partir do CO₂ atmosférico, em presença de energia luminosa. Na solução mineral utilizada (Bold Basal Medium), portanto, não houve a necessidade de adição de carboidratos ou de qualquer outra substância química de maior teor energético. Macro, micronutrientes e solução quelante foram suficientes para assegurar o desenvolvimento de uma população diversificada de algas em meio de cultura, observada após a terceira semana de incubação.

Nas culturas mistas obtidas, observou-se o predomínio das espécies unicelulares sobre as espécies filamentosas, em praticamente todos os meios de cultura. Algas filamentosas, apresentando talo multisseriado, algumas vezes sugerindo a junção de indivíduos unicelulares em forma de bastonetes, foram mais abundantes nos meios de cultura referentes aos encrustamentos de P4 e P5 (Figuras 8 B e C; e 9 A, B e D). Estas espécies têm papel importante no processo de agregação, através do invólucro de partículas minerais e liberação de compostos orgânicos extracelulares (polissacarídeos), os quais aumentam a estabilidade dos agregados em água (CHENU, 1993).

Nos meios de cultura com material proveniente de P2, foram observadas associações de colônias de espécies unicelulares com algas filamentosas (Figuras 8 B e 9 B) e, naqueles referentes a P1, colônias de indivíduos unicelulares com arranjo em pacote ou tendendo à formação de filamentos (Figura 8 A). Na cultura mista desenvolvida a partir de organismos presentes na crosta de P3, foram encontradas diatomáceas (Figura 9 C), aproveitando-se de microambiente favorável propiciado pelas espécies cianobactérias, pioneiras no processo de sucessão ecológica.

Incubadas em saprolitos estéreis, em laboratório, as algas mostraram rápido desenvolvimento, tanto em material arenoso (< 15% de argila) quanto em material mais argiloso, observável num curto período de duas semanas.

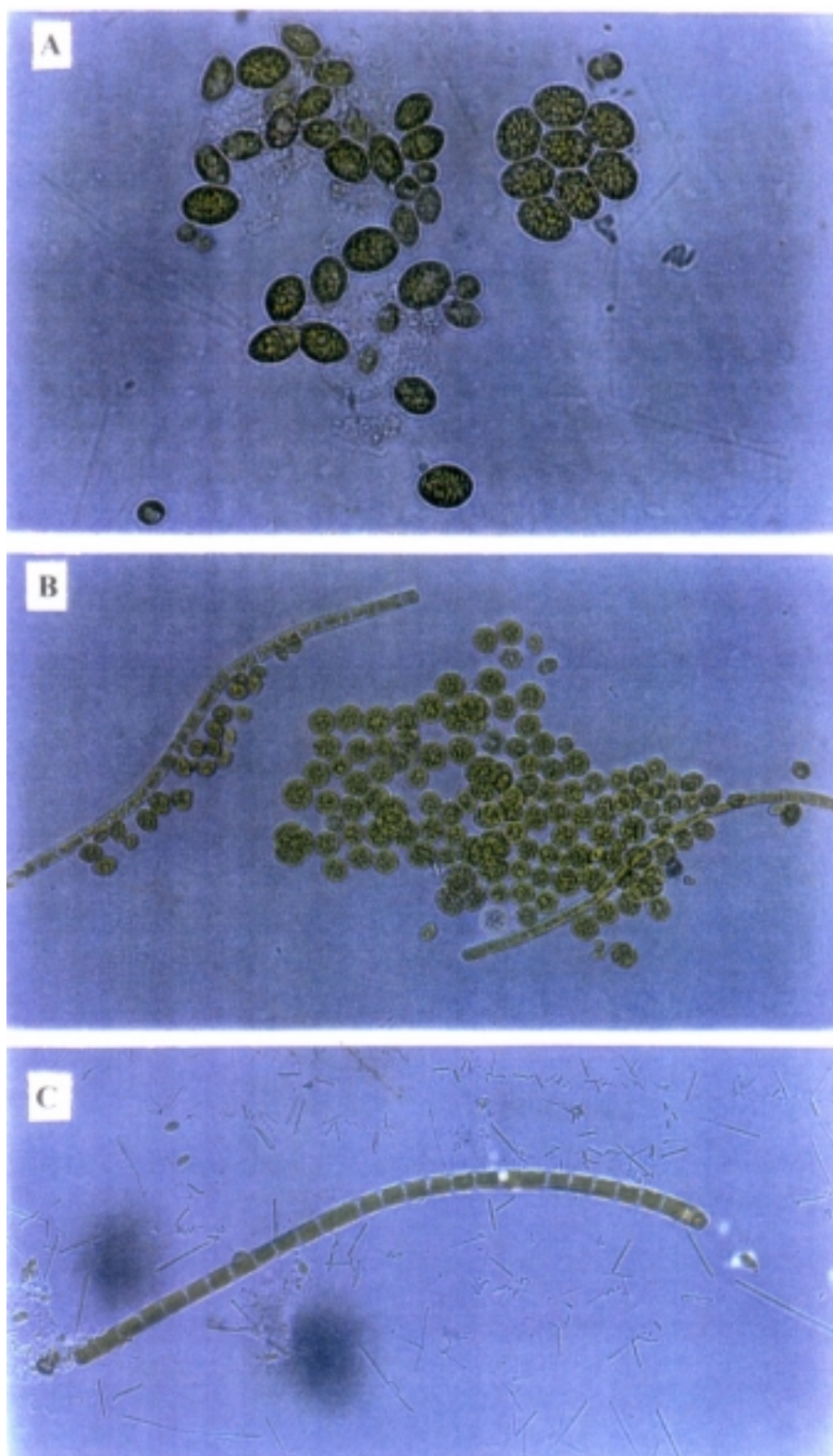


Figura 8 – A) Colônias de indivíduos unicelulares com arranjo em pacote e em forma de filamentos (400X); B) associações de colônias de espécies unicelulares com algas filamentosas (200X); C) algas filamentosas, apresentando talo multisseriado (400X).

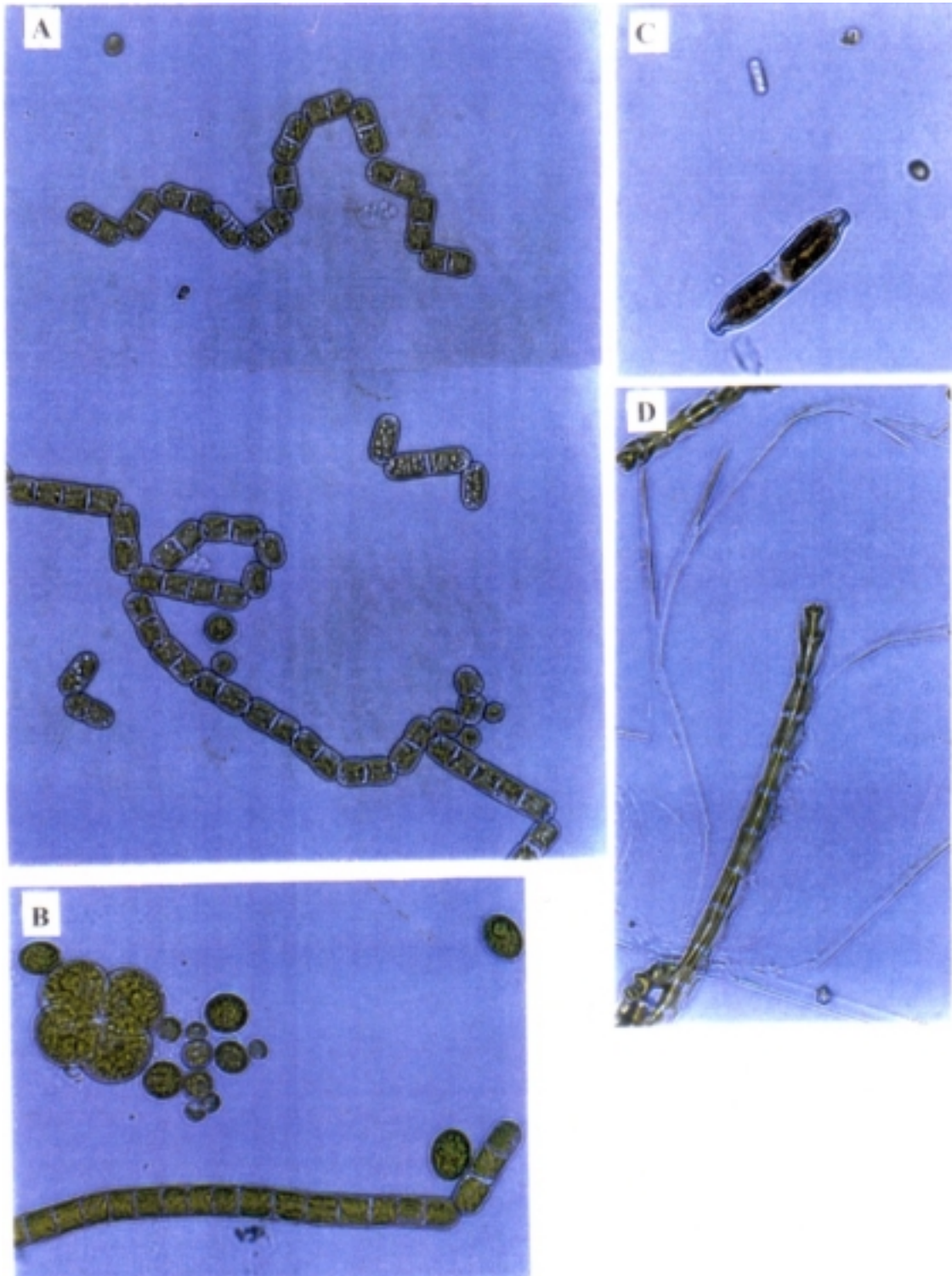


Figura 9 – A) Junção de indivíduos unicelulares em forma de bastonetes formando filamentos multisseriados; B) algas filamentosas, com talo multisseriado, e colônia de indivíduos unicelulares; C) diatomácea; D) filamento de alga com ramificações. Aumento de 400X.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho caracterizou a ocorrência de crostas biológicas sobre saprolitos gnáissicos em condições tropicais. As populações de microrganismos associadas à microflora foram responsáveis pela estruturação incipiente dos saprolitos gnáissicos subjacentes e ainda pela efetiva ciclagem de nutrientes, propiciando a formação de um meio favorável para o crescimento de plantas superiores.

Esta interação organo-mineral envolve, de início, a fixação de C orgânico, a partir do CO₂ atmosférico, por algas cianobactérias. A tensão de oxigênio no meio propicia a oxidação de Fe²⁺, que pode ser precipitado biologicamente em micronódulos hematíticos por bactérias quimiolitotóficas, as quais catalisam a oxidação na superfície de membranas.

Líquens crustáceos ou foliosos, resultantes da associação mutualística de fungos (função protetora) e cianobactérias (função fotossintetizante e fixação de N), crescem sobre a superfície mineral, em sucessão, enquanto as briófitas utilizam os nutrientes liberados neste processo na produção de biomassa. Neste ponto, a crosta está capacitada a abrigar pteridófitas e as primeiras plantas superiores com raízes, devido à crescente estabilidade de agregados promovida pela abundante produção de polissacarídeos, importante também como reserva protéica. As observações de fotomicrografias produzidas em microscópio eletrônico de varredura ilustram de modo inequívoco o papel da mucilagem de polissacarídeos na estruturação de agregados, unindo a matéria orgânica fresca, principalmente filamentos de alga, à parte mineral.

As espécies de algas isoladas em meio de cultura e inoculadas em ambiente controlado mostraram-se eficientes em colonizar os saprolitos, após duas semanas de incubação. Os resultados abrem a perspectiva do uso de inóculo de algas como procedimento complementar na recuperação de taludes ou áreas degradadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRECHT, S. L. Eukaryotic algae and cyanobacteria. In: SYLVIA, D. M., FUHRMANN, J. J., HARTEL, P. G. e ZUBERER, D. A. (Eds.). **Principles and applications of soil microbiology**. Upper Saddle River: Prentice Hall, p. 94-113, 1999.
- BARKER, W. W., WELCH, S. A. e BANFIELD, J. F. Biogeochemical weathering of silicate minerals. In: BANFIELD, J. F. e NEALSON, K. H. (Eds.). **Reviews in Mineralogy. Geomicrobiology: interactions between microbes and minerals**. Washington: Mineralogical Society of America, 35: 391-428, 1998..
- BREMNER, J. M. Nitrogen-Total. In: SPARKS, D. L. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, Pt. 3, p. 1085-1121, 1996. (SSSA Book Series: 5)
- CHENU, C. Clay – or sand – polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: water related properties and microstructure. **Geoderma**, 56: 143-156, 1993.
- COFFIN, D. E. A method for the determination of free iron in soils and clays. **Canadian Journal of Soil Science**, 43: 7-17, 1963.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil. Rio Espera. Folha SF.23-X-B-IV, Estado de Minas Gerais. Escala 1: 100 000. Texto explicativo**. Brasília: DNPM/CPRM, 200 p., 1991.
- DORIOZ, J M., ROBERT, M. e CHENU, C. The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. **Geoderma**, 56: 179-194, 1993.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 212 p., 1997.
- EMERSON, W. W. The plastic limit of silte, surface soils in relation to their content of polysaccharide gel. **Australian Journal Soil Research**, 33: 1-9, 1995.
- FISCHER, W. R. Microbiological reactions of iron in soils. In: STUCKI, J. W., GOODMAN, B. A. e SCHWERTMANN, U. (Eds.) **Iron in soils and clay minerals**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, p. 715-748, 1988. (NATO Advanced Study C, Mathematical and physical sciences, v. 217)
- FITZPATRICK, E. A. **Soil microscopy and micromorphology**. Chichester: John Wiley, 304 p., 1993.

- FORTUN, A., BENAYAS, J. e FORTUN, C. The effects of fulvic and humic acids on soil aggregation: a micromorphological study. **Journal of Soil Science**, 41:563-572, 1990.
- GUERRA, J. G. M. e SANTOS, G. A. Métodos químicos e físicos. In: SANTOS, G. A. e CAMARGO, F. A. O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, p. 267-291, 1999.
- HAYNES, R. J. e SWIFT, R. S. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. **Journal of Soil Science**, 41:73-83, 1990.
- HUANG, P. M. e VIOLANTE, A. Influence of organic acids on crystallization and surface properties of precipitation products of aluminium. In: HUANG, P. M. e SCHNITZER, M. (Eds.) **Interactions of soil minerals with natural organics and microbes**. Madison: Soil Science Society of America, p. 159-221, 1986. (SSSA Spec. Pub. n. 17)
- LONGTON, R. E. The role of bryophytes and lichens in terrestrial ecosystems. In: BATES, J. W. e FARMER, A. M. (Eds.) **Bryophytes and lichens in a changing environment**. Oxford: Clarendon Press, p. 32-76, 1992.
- McKEAGUE, J. A e DAY, J. H. Dithionite and oxalate - extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science**, 46: 13-22, 1966.
- MEHRA, O. P. e JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**. New York: Pergamon Press, p. 317-327, 1960. (7th Natl. Conf. on Clays and Clay Minerals)
- METTING, F. B. Algae and cyanobacteria. In: PAGE, A. L. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, Pt. 2, p. 427-458, 1994.
- NELSON, D. W. e SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: PAGE, A. L. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, Pt. 2, p. 539-579, 1982.
- NEUMAN, C. M., MAXWELL, C. D. e BOULTON, J. W. Wind transport of sand surfaces crusted with photoautotrophic microorganisms. **Catena**, 27: 229-247, 1996.
- OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. In: TINSLEY, J. e DARBYSHIRE, J. F. (Eds.). **Biological processes and soil fertility**. The Hague: Martinus Nijhoff / Dr. W. Junk Publishers, p. 319-337, 1984. (Developments in Plant and Soil Sciences, 11)
- OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, 53: 377-400, 1993.
- PÉREZ, F. L. Microbiotic crusts in the high equatorial Andes, and their influence on paramo soils. **Catena**, 31: 173-198, 1997.

- ROBERT, M. e BERTHELIN, J. Role of biological and biochemical factors in soil mineral weathering. In: HUANG, P. M. e SCHNITZER, M. (Eds.) **Interactions of soil minerals with natural organics and microbes**. Madison: Soil Science Society of America, p. 453-495, 1986. (SSSA Spec. Pub. n. 17)
- SCHWERTMANN, U. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: STUCKI, J. W., GOODMAN, B. A. e SCHWERTMANN, U. (Eds.) **Iron in soils and clay minerals**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, p. 267-308, 1988. (NATO Advanced Study C, Mathematical and Physical Sciences, v. 217)
- SHEN, S., PEPPER, G. E., HASSETT, J. J. STUCKI, J. W. Acidity and aluminum toxicity caused by iron oxidation around anode bars. **Soil Science**, 163: 657-664, 1998.
- SILVER, M., EHRLICH, H. L. e IVARSON, K. C. Soil mineral transformation mediated by soil microbes. In: HUANG, P. M. e SCHNITZER, M. (Eds.) **Interactions of soil minerals with natural organics and microbes**. Madison: Soil Science Society of America, p. 497-519, 1986. (SSSA Spec. Pub., n. 17)
- SOON, Y. K. Fractionation of extractable aluminium in acid soil: a review and a proposed procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 24: 1683-1708, 1993.
- STONE, A. T. Reactions of extracellular organic ligands with dissolved metal ions and mineral surfaces. In: BANFIELD, J. F. e NEALSON, K. H. (Eds.). **Reviews in Mineralogy. Geomicrobiology: interactions between microbes and minerals**. Washington: Mineralogical Society of America, 35:309-344, 1998.
- TAN, K. H. The release of silicon, aluminium, and potassium during decomposition of soil minerals by humic acid. **Soil Science**, 129: 5-11, 1980.
- TEDESCO, M. J., WOLKWEISS, S. J. e BOHNEN, H. **Análise de solo, planta e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, 156 p., 1985. (Boletim Técnico, 5)
- TISDALL, J. M. e OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, 33: 141-163, 1982.
- WHITTIG, L. D. e ALLARDICE, W. R. X-ray diffraction techniques. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy / Soil Science Society of America, Pt. 1, p. 331-362, 1986.
- ZIMMERMAN, W. J. Microbial biotechnology and applications in agriculture. In: METTING, F. B. (Ed.). **Soil microbial ecology. Applications in agricultural and environmental management**. New York: Marcel Dekker, p. 457-479, 1993.