Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Estudo Geoquímico e Gênese das Couraças de Ferro da Formação Rio Bonito - Rio Grande do Sul - Brasil

Cesar Dorneles Willig, Milton Luiz Laquintinie Formoso
Pesquisas em Geociências, 2 (1): 37-48, Set./Dez., 1973.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21860>

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos **UFRGS**

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - Set./Dez., 1973.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

estudo geoquímico e gênese das coudaças de ferro da formaçaõ rio bonito - rio grande do sul - brasil*

CESAR DORNELES WILLIG**

MILTON LUIZ LAQUINTINIE FORMOSO***

SINOPSE

No Rio Grande do Sul ocorrem «coudaças de ferro» (essencialmente Fe_2O_3 nas formas de goethita e hematita) resultantes de intensa ferrificação, em escala regional, e estratigraficamente no topo dos arenitos da Formação Rio Bonito, do Sub-Grupo Guatá, do Gondwana do Estado.

Os tipos de crostas encontradas são: arenitos de impregnação; crostas conglomeráticas; preenchimento de juntas e crostas escoriáceas não oolíticas.

Dados de subsuperfície, obtidos em explorações das camadas de carvão em diversos locais do Estado, mostram que essas ferrificações normalmente não ocorrem em subsuperfície.

Este couraçamento, na opinião dos autores, não está condicionada pelos fatores morfo-bioclimáticos responsáveis pela evolução dos solos ferralíticos (laterização) representando, contudo, um registro paleo-climático distinto no Rio Grande do Sul.

A gênese da ferrificação é, entretanto, relacionada à evolução dos solos desenvolvidos sobre a Formação Palermo, imediatamente sobreposta às áreas ferrificadas. Tal relação é fundamentada na descrição do modo de ocorrência das couraças, características morfológicas e mineralógicas dos solos da Formação Palermo e em considerações teóricas do comportamento geoquímico do ferro a baixa temperatura e a baixa pressão.

SUMMARY

Regionally distributed indurated iron crusts formed by ferric oxide cementation of permeable lithologies older than the Palermo Formation occur in Rio Grande do Sul State, Brasil. This ferrification is particularly important at the top of Rio Bonito Sandstones situated just under The Palermo Formation, both belonging to the Gondwana section of the State.

Those iron crusts can be included in four types:

1. Impregnation Sandstones - This type consists of variable grain-sized and well-to-badly classified quartzic sandstones whose intergranular spaces are almost completely filled with ferric oxides which may partially replace the quartz grains;
2. Conglomeratic Crusts - Ferrified arenitic conglomerates which preserve the primary sedimentary as well as ferrified colluvial conglomerates are included in this type. These conglomerates may contain older iron

* - Trabalho apresentado no XXII Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte - MG - 1968.

** - Auxiliar de Ensino (RETIDE), Departamento de Geologia do Instituto de Geociências e Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS.

*** - Professor de Geoquímica do Instituto de Geociências da UFRGS e Assessor da Fundação de Ciência e Tecnologia.

crusts transported with other clastic sedimentary material;

3. Joint Filling - Massive, well-crystallized ferric oxides (Hematite) can be precipitated in vertical jointing fractures and in sub-horizontal fractures developed in beds of low permeable rocks as shales, siltstones and even sandstones which became impermeable by previous ferrifications;

4. «Scoriaceous» Crusts - The ferrification of altered granular plutonic rocks of the Rio Grande do Sul shield which is directly overlain by The Palermo Formation is the fourth type of indurated iron crusts. These crusts show a «scoriaceous» structure with cavities filled with kaolinite or gibbsite, formed from feldspars.

Drill cores for coal prospecting in the Rio Grande do Sul State area do not show these ferrifications, indicating that the latter are restricted to the outcropping parts of Rio Bonito Sandstones.

The occurrence of indurated surface crusts formed by ferric oxide cementation must be locally distinguished from lateritic (or ferrallitic) alteration.

The regional development of laterites and lateritic soils is due to alteration of several rock types under special conditions of climate and environment. Iron crusts may also develop in different morfo-bio-climatic conditions: from tropical to temperate environments, with or without forest type of vegetation. In temperate and subtropical environments they are generally local and are likewise related to local conditions of environment and do not form a horizon in soil profile.

In the authors' opinion, the formation of studied iron crusts does not reflect the influence of morfo-bio-climatic factors responsible for the evolution of lateritic soils but it is regionally distributed and shows a distinct paleo-climatic Register.

The total iron content of drill core representative samples of The Palermo Formation, two from the Irui area (Cachoeira County) and the third from Candiota (Pinheiro Machado County) showed respectively 5%, 7% and 11% of Fe_2O_3 .

The weathering of Palermo sedimentary rocks form low, flat areas and the weathered material is rich in montmorillonite as identified by X-Ray diffraction in low-depth drill core and outcrop samples. The soil developed over the altered Palermo has the morphological and mi-

neralogical characteristics of poorly drained soils with temporary hydromorphic conditions. According to the aspects of those soils and also based upon theoretical considerations on the geochemistry of iron (at low temperature and low pressure), the authors think that the genesis of iron crusts is due to lateral migration of iron in solution related to the evolution of Palermo Formation soils. Then the formation of crusts would be related to the hydromorphic conditions of those rocks and therefore indirectly connected with rainfall, annual distribution of rainfall and other climatic factors which develop the saturation of soils of The Palermo Formation.

As the Palermo Formation is being eroded, there remain ferric oxides cementing the permeable horizons of subjacent rocks.

INTRODUÇÃO

O presente trabalho refere-se ao estudo geoquímico da intensa ferrificação de extensão regional desenvolvida, principalmente, no topo dos arenitos da Formação Rio Bonito, formando uma faixa ferrificada ao longo da Depressão Periférica.

A Depressão Periférica, uma das quatro grandes unidades geomórficas do Rio Grande do Sul, corresponde a uma larga faixa, na qual afloram as rochas sedimentares Gondwânicas, com cotas mais baixas, em torno do Escudo, entre este e o Planalto Basáltico (AB'SABER, 1960).

A ocorrência de couraças endurecidas, superficiais ou não, constituídas essencialmente por Fe_2O_3 , é, em certos casos, um fenômeno nitidamente distinto da alteração ferralítica. Enquanto esta é responsável pelo desenvolvimento regional, sobre as diversas litologias dos solos ferralíticos (laterização) implicando, desta forma, num condicionamento morfo-bio-climático especial, aquelas, embora favoravelmente desenvolvidas, nessas mesmas regiões, podem também desenvolver-se em outras condições ambientais.

As ferrificações, desenvolvidas em latitudes outras que não as intertropicais são, geralmente, de distribuição mais restrita, sugerindo a concorrência de fatores de ordem local na sua formação e não constituem (a não ser em condições especiais) elemento morfológico de um perfil do solo.

No Rio Grande do Sul, o desenvolvimento de ferrificações, em horizontes permeáveis, é um fenômeno comum até em depósitos subatuais, como é o caso, por exemplo, da ferrificação do fino leito de «conglomerado basal» de um terraço aluvial do Rio dos Sinos, próximo à Vila Scharlau, em São Leopoldo. Essas feições, ao contrário das verificadas, principalmente nos níveis permeáveis da Formação Rio Bonito, são sempre de caráter mais local, enquanto as couraças, objeto deste estudo, são de desenvolvimento regional, implicando, por isso, na busca de fatores de ordem regional para sua compreensão.

O clima atual desta faixa ferrificada compreende áreas caracterizadas por uma precipitação média anual entre 1.400 e 1.700mm, temperatura média máxima anual entre 23 e 25°C, temperatura média mínima anual entre 12 e 14°C, temperatura média anual entre 18 e 19°C. Para toda a faixa, a variação de precipitação anual, no período de novembro a fevereiro é em torno da metade da precipitação dos meses mais chuvosos, junho a setembro (MORENO, 1961).¹³

Este couraçamento, na opinião dos autores, apesar de apresentar expressão regional, não está condicionado pelos fatores morfoclimáticos responsáveis pelo desenvolvimento dos solos ferralíticos (laterização) representando, contudo, um registro paleoclimático distinto no Rio Grande do Sul.

MANEIRA DE OCORRÊNCIA - TIPOS PETROGRÁFICOS - MINERALOGIA

Uma breve inspeção na área aflorante das rochas Gondwânicas já permite observar o apreciável enriquecimento absoluto em óxidos de ferro dos níveis, com boa permeabilidade, das unidades basais, Itararé e Rio Bonito.

A acumulação do ferro traduz-se na formação de «couraças de ferro» que, por sua resistência, vão exercer nítida influência nos detalhes geomorfológicos das áreas onde essas Formações afloram. (fig. 1 e 2)

Fica evidenciado um controle estratigráfico para a localização dessa ferrificação, se for observado que camadas com boa permeabilidade, aflorantes em áreas próximas ou não, pertencentes a formações situadas estratigraficamente acima da Formação Rio Bonito apresen-

tam, geralmente, apenas um cimento ferruginoso e não formam, se não rara e, em alguns locais, crostas de óxidos de ferro.

Por outro lado, os dados de subsuperfície, obtidos através de sondagens, galerias e desmonte a céu aberto, para a exploração das camadas de carvão da Formação Rio Bonito, em diversos locais do Estado, permitem constatar que as ferrificações observadas, em superfície, tanto nesta Formação como no Sub-Grupo Itararé, normalmente não ocorrem em subsuperfície.

Nestas áreas, além dos arenitos impregnados por óxidos de ferro verifica-se, em certos locais, também a cimentação dos conglomerados arenosos que constituem o talus da encosta dos degraus formados pela alternância de arenito, endurecido no topo pela ferrificação e camadas mais moles de folhelhos e/ou siltitos. (fig. 2)

Nos folhelhos, siltitos e mesmo nos arenitos cuja permeabilidade decresceu pela ferrificação, a concentração do ferro expressa-se pelo preenchimento das juntas, onde se formam placas de óxido de ferro.

Os tipos de crostas, encontrados no campo, podem ser enquadrados num dos itens abaixo:

Arenitos de impregnação - são os arenitos cujos espaços intergranulares são intensamente cimentados por óxidos de ferro. A fração detrítica original dessas rochas ferrificadas pode apresentar as mais diversas características texturais de granulometria e classificação, porém, em qualquer camada com características texturais constantes ou variáveis, da base ao topo, a ferrificação é, geralmente, mais intensa no topo, por uma espessura menor que 50cm. Comparando a espessura da parte ferrificada do topo de camadas com distintas características texturais que condicionam a permeabilidade, as camadas mais permeáveis apresentam maior espessura ferrificada. De um modo geral, somente 10 a 50cm do topo está ferrificado, embora possam ser encontradas camadas de arenitos grossos, com espessura superior a 1m, totalmente ferrificadas. A estrutura primária da rocha sedimentar, em certos casos, ficou preservada na parte cimentada, porém, onde a ferrificação foi mais intensa, os grãos detríticos do arenito são parcial ou totalmente substituídos pelo óxido de ferro, sem preservação da estrutura original.

Crostas conglomeráticas - na Formação Rio Bonito ocorrem níveis de arenito conglomerático e conglomerados arenosos que podem estar ferrificados, formando crostas conglomeráticas que guardam a estrutura primária da rocha sedimen-

SECÇÃO GEOLÓGICA NA ÁREA PRÓXIMA AO ARROIO CANDIOTA, MOSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE A FORMAÇÃO DE COURAÇAS E A SEQUÊNCIA GEOLÓGICA.

FIGURA 1

tar. Como os horizontes conglomeráticos são mais comuns na base da Formação e nas ocorrências esparsas do Grupo Itararé, é neste intervalo estratigráfico que estas crostas são mais comuns. Os diamictitos e tilitos do Grupo Itararé normalmente não acumulam óxidos de ferro como os conglomerados arenosos da Formação Rio Bonito, porém, nas áreas onde afloram, é muito comum a formação de crostas conglomeráticas que constituem talus de encosta. Estas crostas podem conter fragmentos de crostas pré-existentes e toda a sorte de fragmentos detríticos, predominando grãos angulares de quartzo, provenientes do retrabalhamento dos diamictitos e consequente retirada da fração lutácea que o impermeabilizava.

Preenchimento de juntas — são as placas maciças do óxido de ferro, em geral, bem cristalizadas como hematita, desenvolvidas nas juntas verticais e planos sub-horizontais, particularmente permeáveis, de litologia com baixa permeabilidade, folhelhos, siltitos e mesmo arenitos previamente impermeabilizados pela ferrificação. A espessura dessas placas varia desde menos de um milímetro até alguns centímetros. Em áreas de intenso fraturamento, com alta densidade de juntas, chegaram a formar-se pequenas cavidades irregulares de óxidos de ferro, usadas ocasionalmente como cinzeiros ornamentais.

Crostas «escoriáceas» — as rochas granulares, graníticas e gnáissicas, pertencentes ao complexo cristalino do Escudo Sul Riograndense, são «arenizadas» pela ação do intemperismo, com a preservação ou não da estrutura original da rocha. Na área onde foi estudado o couraçamento, ou seja, na borda da bacia gondwânica, no Estado do Rio Grande do Sul, esse material pode ocorrer ferrificado. Neste caso, a couraça apresenta uma estrutura «escoriácea» não oolítica, com espaços internos irregulares parcialmente preenchidos por caulinita que, em certos casos, pode ser notado provir de feldspatos alterados. Notou-se que este tipo de crostas ocorre particularmente nas áreas onde a Formação Rio Bonito tem pouca expressão ou está ausente, havendo ou não rochas do Grupo Itararé. Contudo, a Formação Palermo, cujo caráter transgressivo é acentuado, geralmente ocorre nas proximidades, assentando discordantemente sobre o Embasamento Cristalino. Note-se, particularmente, a região de contato Granito de Encruzilhada — Palermo, próximo a Capivarita, e a região a noroeste de Hulha Negra, município de Bagé,

onde a Formação Palermo assenta sobre rochas graníticas e magmáticas.

O estudo por difração de raios X, da forma mineralógica apresentada pelos óxidos de ferro de qualquer dos tipos de crostas acima descritas, revelou tratar-se de goethita, para as crostas de cores amareladas mais quebradiças, e hematita para as de cores mais escuras, muito duras e compactas. É muito comum também a ocorrência de misturas de óxidos de ferro muito mal cristalizados, com diversos graus de hidratação.

É particularmente importante, para a compreensão do caráter regional da ferrificação, a observação da posição estratigráfica relativa das rochas ferrificadas (fig. 1 e 2), com especial atenção ao caráter litológico e a composição mineralógica da Formação Palermo.

Situada imediatamente acima da Formação Rio Bonito, a Formação Palermo, de um modo geral, no Rio Grande do Sul corresponde a uma deposição homogênea de silte com areia muito fina, argilosa que pode graduar, lentamente, a fácies mais argilosas. Esta Formação apresenta-se nitidamente transgressiva sobre as unidades mais antigas.

Devido à monotonia litológica e a consequente ausência de diferenças de resistência à erosão, a área aflorante da Formação Palermo é levemente ondulada, tendendo a plana.

Todas as amostras de superfície e baixa profundidade da Formação Palermo, analisadas por difração de raios X, para a execução de diversos trabalhos, têm revelado a montmorilonita como o mineral predominante (FORMOSO & FIGUEIREDO, 1966).⁵

A presença, em superfície, de um material muito argiloso onde predomina a montmorilonita, não é exclusiva da Formação Palermo. A Formação Irati, situada estratigraficamente acima, também apresenta esta característica. Esta, porém, expressa-se morfologicamente por um relevo mais acentuado devido a sua maior heterogeneidade litológica (presença de lentes de calcário maciço). Esses detalhes vão exercer particularmente influência na evolução do intemperismo (pedogênese) nessas Formações.

COMPORTAMENTO GEOQUÍMICO DO FERRO E A GÊNESE DAS COURAÇAS

A compreensão das condições de solubilidade, migração e precipitação do ferro deve ser

SECCÃO GEOLÓGICA EM CAPIVARITA, RIO PARDO, MOSTRANDO A
 RELAÇÃO ENTRE A FORMAÇÃO DE COURAÇAS E A SEQUÊNCIA
 LITOLÓGICA.

FIGURA 2

iniciada pelo estudo das variáveis que influem nessas condições.

Os parâmetros que vão determinar a espécie química que um elemento pode assumir, nas condições ambientais de temperatura e pressão, num dado sistema, são: natureza e atividade das espécies dissolvidas participantes do equilíbrio, Eh e pH.

Considerando as formas mineralógicas mais comuns, segundo as quais o ferro ocorre nos sedimentos, constata-se que cinco variáveis definem o sistema: Eh, pH, atividade de HS^- , P_{CO_2} e atividade de Fe^{++} em solução (CURTIS & SPEARS, 1968). GARRELS & CHRIST (1965, p. 196) apresentam boa argumentação, indicando que a influência de outras espécies dissolvidas é pequena, podendo ser ignorada.

Faz-se necessária uma análise da variação de cada um desses parâmetros, no ambiente natural, a fim de que a escolha (da qual dependerá os campos de estabilidade das formas envolvidas) não recaia naqueles menos significativos. Em outras palavras, as considerações teóricas, baseadas na discussão de diagramas de equilíbrio bidimensionais que levam em conta Eh e pH, só podem ser extrapoladas para um ambiente natural se as atividades das espécies dissolvidas que vão influir apreciavelmente no estado final, podem ser assumidas como constantes ou variáveis entre limites estreitos.

Numerosas medidas de pH dos solos são disponíveis na literatura e, considerando que os valores das medidas (pH dos solos) sofrem a influência de muitos fatores, tais como o método usado, variações sazonais, etc., o uso desses valores para fins interpretativos deve levar em conta estes aspectos. Apesar disso, a apreciação dos resultados publicados permite constatar que o pH dos solos varia entre amplos limites (3,0 a 9,0 e normalmente oscila entre 4,5 e 6,8) com o tipo de solo, apresentando inclusive variações sazonais que, em casos extremos, é superior a 2 unidades. A variação sazonal normal situa-se entre 0,5 e 1 unidade de pH (DUCHAUFOR, 1965, p. 88).

Ao contrário dos dados de pH, poucos estudos sistemáticos têm sido realizados a respeito do Eh dos diferentes tipos de solos. Entretanto, tanto os dados disponíveis como a observação das associações de minerais dos solos permitem generalizar que a maioria dos solos é oxidante em relação ao sistema $\text{Fe}^{++}/\text{Fe}^{+++}$, exceto os caracterizados por hidromorfia, os quais são também aqueles onde as variações sazonais de

Eh podem ser particularmente acentuadas (DUCHAUFOR, 1965, p. 91).

Quanto às atividades de HS^- e HCO_3^- , devido a não detecção de pirita ou siderita nas amostras estudadas, é razoável admitir que: ou as condições Eh e pH não permitem que eles se formem e/ou as atividades iônicas destas espécies estão abaixo das atividades mínimas necessárias para a formação desses minerais.

A figura 3 é o diagrama Eh/pH, mostrando os campos de estabilidade das espécies químicas de ferro, considerando-se 10^{-6} a atividade iônica limite em equilíbrio com o sólido. Este diagrama é de GARRELS & CHRIST (1965, p. 195), modificado pela edição das linhas verticais baseadas nos produtos de solubilidade de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ e $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e das respectivas constantes de ionização (HEM & CROPPER, 1959). Este gráfico foi sobreposto a outro dos mesmos autores (p. 381) o qual fornece a posição aproximada de alguns ambientes naturais em relação ao Eh e pH.

Da observação do gráfico, podem ser tiradas as seguintes conclusões de importância para o caso em foco:

- 19) Os ambientes em equilíbrio com as condições da atmosfera não podem apresentar Fe^{++} .
- 29) O pH acima de 4,5 faz com que o Fe^{+++} precipite como hidróxido férrico, cujo produto de solubilidade, obtido nas condições de laboratório, varia, conforme o autor, de 10^{-35} a 10^{-38}M (SEGALEN, 1964, p. 7).
- 39) A mobilização efetiva do ferro, em solução, somente se pode dar em condições particulares de Eh e pH.

Apesar da maioria dos solos apresentar condições Eh/pH tais que o ferro deva sempre estar precipitado, nota-se apreciável redistribuição desse elemento durante a evolução das rochas e solos sob a intemperização.

Por outro lado, já há vários anos, numerosos autores (DEMOLON & BASTISSE, 1938, 1945, 1946); (HEM, 1960); (MANDL, GRANER & NENBERG, 1953) vem estudando o efeito de diversos anions sobre a solubilidade dos óxidos de ferro. Entre estes, cita-se, principalmente, os produtos orgânicos solúveis, tais como hidroxídeos, aminoácidos, certos produtos como a caseína etc. Dentre os ácidos orgânicos capazes de complexar o ferro, os mais estudados são o ácido oxálico, o ácido tartárico, o ácido cítrico e o ácido tânico (HEM, 1960)^a, os quais formam

DIAGRAMA DE Eh-pH
DE ESPÉCIES MINERALÓGICAS E IONS
DE Fe EM EQUILÍBRIO (a Fe^{+++} , a $\text{Fe}^{++} = 10^{-6}$ m).

FIGURA 3

complexos muito mais estáveis com o Fe^{++} do que com o Fe^{+++} . MANDL, GRANER & NENBERG (1953) demonstraram, em laboratório, que um grande número de produtos orgânicos naturais podem fazer com que o ferro permaneça em solução, em condições tais que, normalmente precipitaria. Entre os produtos, cuja ação é mais eficaz, citam-se os ácidos hidroximonocarboxílicos (lático), dicarboxílicos (malônico) e celuronatos, além dos já citados. Deve ser sublinhado que a maioria dos produtos acima enumerados figura numa ou noutra fase como produto de decomposição da matéria orgânica.

Baseados nesses aspectos, diversos autores (SOSSAIT, 1958, 1959); SEGALÉN, 1964; HEM, 1960) têm relacionado a mobilização do ferro nos solos, através de vários processos, tais como poder complexante, formação de quelatos, possibilidade de sol protetor, poder redutor da matéria orgânica em solução, condições de Eh e pH, ação bacteriana, predominando um ou outro processo, conforme o caso.

Contudo, poucos autores conseguiram evidenciar, nos solos e ambientes de deposição, o ferro combinado a produtos orgânicos. Entre esses, cita-se BECOING & MOORE (1959) apud SEGALÉN, (1964). Entretanto, FOLLETT, et alii (1965) demonstram que a remoção da fração solúvel em solução alcalina fraca, das argilas de solos, exerce forte influência na eficiência da extração do óxido de ferro pelo ditionito. Assim, sugerem que o óxido de ferro nos solos estaria principalmente na forma de complexos sílico-aluminosos amorfos da fração mineral, já que a destruição da matéria orgânica pela água oxigenada não melhorou a eficiência da citada extração.

É interessante notar, ainda, a existência de uma convergência de processos físico-químicos, capazes de solubilizar e mobilizar o ferro, nas mesmas condições físico-químicas em que a matéria orgânica altera-se lentamente, carregando as águas com produtos orgânicos solúveis complexantes. Essas condições, capazes de pôr o ferro em solução, se encontram nos solos de circulação restrita, com baixo valor Eh, e geralmente ácidos. Por outro lado, a acumulação do ferro nas condições de intemperismo só é encontrada nos níveis de ampla circulação, onde os valores de Eh resultam em condições oxidantes, extrema instabilidade da matéria orgânica e do Fe^{++} . No afã de encontrar um mecanismo que obedeça às limitações impostas pelas características físico-químicas dos compostos

de ferro envolvidos nesse estudo, bem como às limitações impostas pelas condições de ocorrência das crostas de ferro, segue-se um sumário e a análise desses aspectos.

As principais características do modo de ocorrência que devem ser ressaltadas são:

- 19) Distribuição regional da ferrificação.
- 29) Acumulação de ferro controlada pela permeabilidade da rocha, quanto mais permeável (inclusive, quanto maior a densidade de juntas) maior a concentração (o que exclui a possibilidade de concentração do ferro por ascensão capilar).
- 39) Área de distribuição da Formação Palermo, de caráter transgressivo e situada imediatamente acima da Formação Rio Bonito, levemente ondulada devido a sua homogeneidade litológica, cujo produto de intemperismo é um solo muito argiloso, onde predomina a montmorilonita.

Este terceiro aspecto parece apresentar particular importância no que concerne à fonte de ferro e, em vista disto, será proveitosa uma breve análise do solo que evolui sobre esta Formação.

O solo desenvolvido sobre a Formação Palermo apresenta todas as características morfológicas de um solo mal e regularmente drenado, tais como: relevo suave, levemente ondulado; cores cinza-escuro, com granulometria rica nas frações finas; altamente montmorilonítico, o que impõe ao solo um comportamento essencialmente argiloso, impermeabilizado; teor em óxido de ferro livre muito baixo (GOEDERT & FORMOSO, 1970). Portanto, apresenta as condições dos solos com certa hidromorfia, os quais se caracterizam por serem saturados, temporária ou permanentemente, pela água. No caso dos solos da Formação Palermo, dada a existência de fendas de contração que se formam durante a estação seca, cujas paredes assumem uma coloração amarelada pela precipitação do ferro, antes em solução, é evidente que eles não são permanentemente saturados, não podendo, assim, serem enquadrados nos solos do «tipo gley», mas antes no dos solos mal drenados, classificados na categoria dos pseudo-gleys, pelos agrônomos europeus. Nesses solos, devido ao acúmulo de água, que migra muito lentamente, repousando sobre uma zona impermeabilizada, desenvolvem-se condições ácidas e redutoras, necessárias à solubilização e mobilização do ferro. A água praticamente estagnada carrega-se de produtos or-

gânicos solúveis, provenientes da decomposição lenta e, em geral, ácida dos restos orgânicos. A atividade biológica, bem como a oxidação, por oxigenação da matéria orgânica, consome o oxigênio dissolvido, resultando na relativa acumulação de humus e emprestando características reductoras e asfixiantes ao meio. Nessas condições, a água que se desloca lentamente, nesse solo, apresenta os requisitos redutores e complexantes em relação ao ferro que solubiliza e passa a migrar. Quando a solução atinge o topo das camadas aeradas e permeáveis da formação adjacente, a carga solúvel é oxidada, precipitando o ferro na forma de hidróxido férrico. Este precipitado evolui, por envelhecimento por dessecação, produzindo as couraças de ferro.

O grau de couraçamento está, portanto, indiretamente relacionado com a pluviosidade e distribuição anual das chuvas que irão condicionar a saturação dos solos da Formação Palermo nas diversas áreas da Depressão Periférica.

Sobre a disponibilidade de ferro na Formação Palermo, a predominância de argilas do grupo das smectitas contendo ferro na sua constituição mineralógica já é indicio suficiente.

A determinação de ferro total em três amostras representativas de testemunhos de sondagem da Formação Palermo, duas de Iruí, município de Cachoeira do Sul, outra de Candiota, município de Pinheiro Machado, revelaram: 5,0%, 7,0% e 11% de Fe_2O_3 , respectivamente.

A figura 4 tem o objetivo de apresentar a idéia de como evoluíram as couraças de ferro, aqui descritas. À medida que a Formação Palermo vai lentamente recuando por erosão, deixa um rastro de óxidos de ferro no topo dos horizontes permeáveis subjacentes.

Por outro lado, a evolução de um solo sobre uma crosta assim formada, a qual pode funcionar como um horizonte de baixa permeabilidade, irá remobilizar lentamente o ferro que migra, lateralmente, indo precipitar nos horizontes de boa permeabilidade, situados, topograficamente, abaixo.

Desta forma, pode ser explicada a formação dos degraus ferrificados na figura 1.

A contribuição de ferro da própria formação ferrificada deve ser pequena.

Os arenitos da Formação Rio Bonito, cortados em sondagens nas pesquisas de carvão, apresentam, em geral, um cimento levemente ferruginoso (indicando que as águas que neles

percolam apresentam condições oxidantes em relação ao sistema $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$).

Raramente têm sido encontradas camadas locais e descontínuas de arenitos piritosos de impregnação de algumas dezenas de centímetros de espessura, associados às camadas de carvão. A não ser em fontes associadas a esse intervalo, (as águas das minas, em geral muito ácidas e ricas em ferro, devido à oxidação da pirita associada ao carvão), as fontes localizadas nos contatos basais dos arenitos com folhelhos, nas encostas de degraus, não depositam ferro, pelo menos em quantidade sequer semelhante a que ocorre no topo dos arenitos (ver figura 1).

Além disso, é muito pouco provável que as crostas de ferro tenham se formado pela ascensão capilar de soluções com ferro que, por evaporação em superfície, precipitaria. Do ponto de vista físico, as rochas cuja percentagem de poros interconectados, não capilares, é elevada (caso dos arenitos, conglomerados e, em especial, juntas), a corrente ascendente de água, por capilaridade, é sempre muito fraca chegando, em certos casos, a ser praticamente nula. Nos períodos de seca, com forte evaporação, esta corrente não pode compensar as perdas por evaporação. Assim, os horizontes superficiais tendem a ressecar e essa ressecação aumenta progressivamente em profundidade. Nos períodos de chuva, nesses mesmos materiais, nos quais a ascensão capilar é negligenciável verifica-se, como movimento predominante da água, a penetração descendente por gravidade. Nos materiais estudados, observa-se que quanto maior a permeabilidade da rocha, maior a concentração de ferro e, portanto, menor deve ter sido a contribuição por capilaridade. Esse mecanismo não pode ser admitido na formação das couraças exceto, provavelmente, nas fases posteriores de remobilizações e recimentações locais.

A formação de couraças de ferro, semelhante às aqui descritas (portanto, não ligadas a processos de laterização) e que ocorrem alhures no Estado, com características mais locais, está, na opinião dos autores, ligada a um mesmo mecanismo. A fonte do ferro deve ser procurada nas áreas cuja evolução do solo criava as condições necessárias para a mobilização do ferro, em solução, que migra até um local mais areado onde precipita, alimentando o couraçamento pela cimentação de horizontes permeáveis.

A ferrificação do fino leito de «conglomerado basal» de um terraço aluvial do Rio dos

EVOLUÇÃO DAS COURAÇAS DE FERRO

FIGURA 4
(explicação no texto)

Sinos, mencionado na introdução deste trabalho, hoje em processo erosivo, apresenta uma posição favorável à sua formação, isto é, ser um nível permeável sob um depósito aluvial argiloso. É interessante observar que é comum a instalação de banhados, com solos do tipo gley e pseudo-gley, nas planícies aluviais.

Dada a resistência relativa acentuada das couraças, elas tendem a permanecer sempre em condições oxidantes, topograficamente elevadas, onde a retenção de umidade é baixa e a vegetação é rala.

Pela seleção de uma área de afloramento da Formação Rio Bonito, onde as crostas, através do tempo, ficaram razoavelmente bem preservadas, seria fácil a obtenção de uma estimativa da quantidade de ferro concentrado nas crostas, bem como da quantidade de ferro que vem em solução no solo da Formação Palermo, sobrejacente, nas diferentes estações do ano. Com esses dados, poder-se-ia ter uma idéia da ordem de grandeza do tempo necessário para a formação do couraçamento daquela área, supondo-se o clima atual como aproximadamente constante.

Por outro lado, nessas mesmas áreas, onde as crostas estão razoavelmente bem preservadas, observa-se certa heterogeneidade na distribuição das couraças que, uma vez mapeadas numa escala adequada, significarão o registro para aquela área, das alternâncias de clima mais e menos úmido de um passado próximo, cujo espaço de tempo pode ser estimado dentro de certos limites.

AGRADECIMENTOS

O presente artigo é parte de uma série de trabalhos em andamento relativos a Geoquímica do Intemperismo. Para o desenvolvimento deste importante campo de pesquisa, tem sido decisiva a colaboração da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, Conselho Nacional de Pesquisas e Conselho de Pesquisas da UFRGS, aos quais os autores desejam prestigiar e agradecer. Nossos agradecimentos aos funcionários e professores da UFRGS pela boa vontade no desempenho das tarefas direta e indiretamente relacionadas com o andamento dos trabalhos.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- AB'SABER, A. N. - 1960 - Nótula sobre as Superfícies Aplainadas do Rio Grande do Sul. *Notícias Geomorfológicas*, São Paulo, 5: 54-6.
- CURTIS, C. D. & SPEARS, D. A. - 1968 - The Formation of sedimentary iron minerals. *Economic Geology*, Lancaster, 63 (3): 257-62.
- DUCHAUFOR, Ph - 1965 - *Précis de Pédologie*. Paris, Masson.
- FOLLETT, E. A. C. et alii - 1965 - Chemical dissolution in the study of soil clays. *Clay Minerals*, London, 6: 23-43.
- FORMOSO, M. L. L. & FIGUEIREDO Fº, P. M. - 1966 - Estudo sedimentológico do Grupo Guatá. *Publicação Especial da Escola de Geologia*, Porto Alegre, 12: 1-55, 12 fig.
- GARRELS, R. M. & CHRIST, C. L. - 1965 - *Solutions, minerals and equilibria*. New York, Harper.
- GOEDERT, W. & FORMOSO, M. L. L. - 1970 - Argilo-minerais dos principais solos da região Litoral-Sul do Rio Grande do Sul. *Notas e Estudos da Escola de Geologia*, 2 (1): 55-66, 4 fig., 1 tab.
- HEM, J. D. & CROPPER, W. H. - 1959 - A survey of ferrous-ferric chemical equilibria and redox potentials. *Geological Survey Water-Supply Paper*, Washington, 1459-A: 1-45.
- 1960 - Complexes of ferrous iron with tannic acid. *Geological Survey Water-Supply Paper*, Washington, 1459-D: 75-94.
- 1960 - Restraints on dissolved ferrous iron imposed by bicarbonate, redox potential and pH. *Geological Survey Water-Supply Paper*, Washington, 1459-B: 33-55.
- MAIGNIEN, R. - 1966 - *Compte rendu de recherches sur les latérites*. Paris, UNESCO, 155 p. (Recherches sur les ressources naturelles, 4).
- MILLOT, G. - 1964 - *Géologie des argiles*. Paris, Masson.
- MORENO, J. A. - 1961 - *Clima do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura.
- MOTA, F. S. & GOLDERT, C. O. - 1966 - Evapotranspiração potencial do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Rio de Janeiro, 1: 155-63.
- SEGALIN, P. - 1964 - *Le fer dans les sols*. Paris, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.