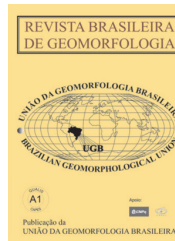


www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, nº 1 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1264>



# O PAPEL DA DINÂMICA DO RELEVO NA EVOLUÇÃO DE COURAÇAS NO VALE DO RIO CONCEIÇÃO, QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG

## THE ROLE OF THE RELIEF DYNAMICS IN DURICRUSTS EVOLUTION ON CONCEIÇÃO RIVER VALLEY, QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG

**Wilton Franklin Alves de Figueiredo Filho**

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP:31.270-901. Brasil  
E-mail: wellsiet@hotmail.com

**Fábio Soares de Oliveira**

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP:31.270-901. Brasil  
E-mail: fabiosolos@gmail.com

**Luiz Fernando de Paula Barros**

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP:31.270-901. Brasil  
E-mail: luizfpbarros@yahoo.com.br

**Henrique Amorim Machado**

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP:31.270-901. Brasil  
E-mail: henriquegeo@hotmail.com

**Antônio Pereira Magalhães Junior**

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP:31.270-901. Brasil  
E-mail: magalhaesufmg@yahoo.com.br

### Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):  
18/07/2018  
Aceito (Accepted):  
16/11/2018

### Palavras-chave:

Cronossequência; Lateritas;  
Evolução da Paisagem.

### Keywords:

Chronossequence; Laterite;  
Landscape Evolution.

### Resumo:

Estudos petrológicos utilizando análises macromorfológicas, micromorfológicas, mineralógicas e microquímicas foram realizados para identificar possíveis variações faciológicas de couraças nos distintos níveis deposicionais fluviais do vale da bacia do Rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, e compreender sua relação com o relevo. Sua posição na paisagem sugere que estas sejam as couraças mais jovens do Quadrilátero Ferrífero e que sua formação testemunhe a dinâmica de formação e transformação dos mantos de alteração nesse importante domínio geológico-geomorfológico do Brasil. Pesquisas anteriores revelaram a existência de níveis cimentados intercalados com sedimentos finos e os denominaram de couraças conglomeráticas. Os resultados aqui encontrados reiteram essa denominação e esclarecem que a variação composicional do cimento

permite o reconhecimento de três distintas fácies: F1 – couraças aluminosas; F2 – couraças ferro-aluminosas e F3 – couraças ferruginosas. Todos os tipos ocorrem no nível deposicional fluvial mais alto, com destaque para F1 e F2, ao passo que nos demais níveis apenas o tipo F3 foi identificado. As organizações microestruturais sugerem relações genéticas entre as fácies. Antigos níveis de couraça ferro-aluminosa teriam sofrido desferruginização, remobilizando o ferro e concentrando alumínio, formando as couraças do tipo F1. Como essas se localizam no nível mais alto, a variedade de fácies pode ser utilizada como um importante indicador de evolução do relevo, caracterizando uma cronosequência.

#### Abstract:

Petrological studies using macromorphological, micromorphological, mineralogical and microchemical analyzes were performed to identify possible faciological variations of duricrusts in the different fluvial depositional levels of the Conceição River valley, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, and to understand its relation with the relief. Its position in the landscape suggests that these are the youngest duricrust of the Quadrilátero Ferrífero, and that its formation proves the dynamics of formation and transformation of weathering mantles in this important geological-geomorphological domain of Brazil. Previous research has revealed the existence of cemented levels interspersed with fine sediments and called them conglomeratic duricrusts. The results found here reiterate this denomination and clarify that the compositional variation of the cement allows identifying three distinct facies: F1 – aluminous duricrust; F2 – iron-aluminous duricrust and F3 – ferruginous duricrust. All types (especially F1 and F2) occur at the highest depositional level, and in the other levels only type F3 was identified. Microstructural organizations suggest genetic relationships between the facies. Old levels of iron-aluminous duricrust have undergone deferruginization, remobilizing the iron and concentrating aluminum, forming the type F1. As these are located at the highest fluvial level, the variety of facies can be used as an important indicator of the landscape evolution, characterizing a chronosequence.

## 1. Introdução

Condições ambientais caracterizadas por elevada umidade e temperatura são típicas de climas tropicais (NAHON, 1991). A partir delas ocorre maior intemperismo químico das rochas, frequentemente caracterizado pela lixiviação de elementos solúveis, como Ca, Mg, K, Na, e enriquecimento de outros menos móveis, como Fe, Al, Ti, Zr, etc. Na sua maior manifestação, essas condições caracterizam o processo de laterização (TARDY, 1993), ou intemperismo laterítico, sendo seu produto genericamente chamado de lateritas ou formações lateríticas – ainda que possua grande diversidade tipológica entre si.

As couraças ferruginosas se inserem no conceito de lateritas. De forma geral, são consideradas como rochas e/ou formações superficiais endurecidas compostas por materiais heterogêneos cimentados por óxidos e hidróxidos de Fe (NAHON, 1991). Segundo Tardy & Roquin (1992), sua formação depende de dois momentos climáticos distintos: um período com acentuada umidade para o intemperismo e acúmulo de Fe e um período mais seco para que haja sua desidratação e concreção que, por efeito, pode envolver diversos constituintes

em sua matriz. Adicionalmente, sua origem pode estar associada a processos de enriquecimento relativo e/ou absoluto (GOUDIE, 1973), motivo pelo qual sua ocorrência sugere condições ambientais específicas e a sua localização na paisagem tem muito a dizer sobre a evolução desta (DELVIGNE, 1998).

A formação de couraças ferruginosas ocorre principalmente associada a dois processos (GOUDIE, 1973; MCFARLANE, 1976): i) acumulação relativa de ferro através do intemperismo *in situ* de rochas em clima tropical sazonal e equatorial úmido e/ou, ii) enriquecimento absoluto de ferro em áreas de descarga do nível freático. No primeiro caso há uma concentração de ferro a partir da lixiviação dos demais constituintes e no segundo o ferro é transportado pelas águas subterrâneas em solução e/ou como quelatos, acumulando-se em ambientes como estuários, pântanos, lagoas, brejos e vales fluviais (PHILLIPS, 2000; WIDDOWSON, 2007; TANNER & KHALIFA, 2010).

Esses e outros modelos foram discutidos por Augustin *et al.* (2014), sendo referidos como “Modelo do *Residuum*” (laterita autóctone, *in situ* ou verdadeira), “Modelo de Oscilação do Nível Freático”, “Modelo

Pedogênico” (por *descensum* ou por *ascensum*), “Modelos de Acumulação Absoluta” (laterita alóctone, com transporte, ou falsa laterita), “Modelo Fluvial” e “Modelo detrítico”. Destaca-se que, segundo Goudie (1973), o modelo fluvial inclui a deposição de material ou de precipitados nos fundos de vales ou sopés de vertentes, a deposição ou alteração de material pela ação periódica da água na forma de fluxos em lençol ou nos terraços, bem como o processo de enriquecimento absoluto pela acumulação e precipitação de óxidos e hidróxidos de Fe e Mn pelas águas de rios, ou de olhos d’água, em condições redutoras. Por sua vez, de acordo com McFarlane (1976), o modelo detrítico inclui um processo policíclico em que se assume a existência de fragmentos de couraças pré-existentes que seriam parcialmente dissolvidos e transportados, num primeiro momento, para terem os grãos cimentados levando a sua reconsolidação, num segundo momento.

Em algumas áreas, a presença de rochas ricas em ferro faz com que ambos os processos sejam possíveis, resultando na presença de couraças desde as posições cimeiras do relevo até as vertentes e fundos de vale (PAIN & OLLIER, 1995; FURNISS *et al.*, 1999; VASCONCELOS *et al.*, 2013). Esse é o caso do Quadrilátero Ferrífero (QF), região central de Minas Gerais (MG), uma das áreas no Brasil que mais se destacam pela presença de couraças ferruginosas. Algumas ocorrências foram denominadas de canga por Eschwege em 1822 (DORR, 1964). Sua importância no controle estrutural do relevo e na história de evolução da paisagem em geral (MC FARLANE, 1976) e do QF (BARBOSA & RODRIGUES, 1967; DORR, 1969; VARAJÃO, 1991; SALGADO *et al.*, 2008) é amplamente conhecida, sobretudo a partir das ocorrências em posições altas do relevo, sendo escassos os estudos nos vales.

Nesse contexto se insere a bacia do Rio Conceição, localizada na porção nordeste do QF, cujas pesquisas realizadas por Barros & Magalhães Jr. (2013) e Barros (2015) revelaram um conjunto bastante interessante desses materiais. De acordo com Barros & Magalhães Jr. (2013), no vale do rio Conceição ocorrem níveis deposicionais fluviais (“terraços”) cuja fácies basal apresenta sedimentos cimentados por óxi-hidróxidos de Fe alternados com níveis deposicionais com sedimentos não cimentados. Os materiais cimentados foram descritos como “couraças conglomeráticas ferruginosas”, cuja constituição envolve seixos subangulares a arredondados de itabirito, hematita, quartzo e quartzito, com

calibres entre 0,3 a 20 cm, aleatoriamente suportados por um cimento de coloração avermelhada.

A identificação de couraças ferruginosas nos níveis deposicionais supracitados despertou o interesse por compreender como a dinâmica do relevo no fundo de vale pode ter influenciado na sua gênese, o que pode ser estudado a partir da identificação e caracterização das variações faciológicas. Conforme Meunier & Velde (1979) a identificação das fácies de alteração, reconhecidas como as variações macro e micromorfológicas no manto de intemperismo, pode fornecer importantes informações sobre a gênese dos materiais e os processos relacionados. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi identificar e caracterizar as variações macro e micromorfológicas de couraças conglomeráticas no vale do Rio Conceição e, a partir delas, discutir o papel da dinâmica do relevo na sua gênese e evolução.

## **2. Materiais e Métodos**

### **2.1 Área de estudo**

A bacia do Rio Conceição está localizada na borda leste do QF e drena para o Rio Piracicaba, por sua vez, afluente da margem esquerda do Rio Doce. A área da bacia abrange parte dos municípios de Barão de Cocais, Catas Altas, São Gonçalo do Rio Abaixo e Santa Bárbara. A área dista cerca de 100 km de Belo Horizonte via BR-381.

O QF é uma área que sempre despertou o interesse científico por sua diversificada geologia e geomorfologia. Os estudos na região destacam a tectônica, o papel das estruturas regionais e da denudação diferencial na evolução do relevo (KING, 1956; BARBOSA & RODRIGUES, 1967; DORR, 1969; VARAJÃO, 1991; ALKMIM & MARSHAK, 1998; SALGADO *et al.*, 2008). A Bacia do Rio Conceição incorpora grande parte da diversidade geológica do QF (Figura 1), apresentando: (i) rochas de complexos cristalinos (gnaisses, migmatitos e granitóides do Arqueano); (ii) rochas do Supergrupo Rio das Velhas (principalmente, xistos e filitos de idade arqueana) e (iii) rochas do Supergrupo Minas (principalmente itabiritos – Formações Ferríferas Bandadas – e quartzitos do Paleoproterozoico), além de registros cenozoicos, como as bacias sedimentares de Fonseca, Gandarela e Gongo Soco (SGARBI *et al.*, 1992; SAADI *et al.*, 1992; SANT’ANNA *et al.*, 1997).

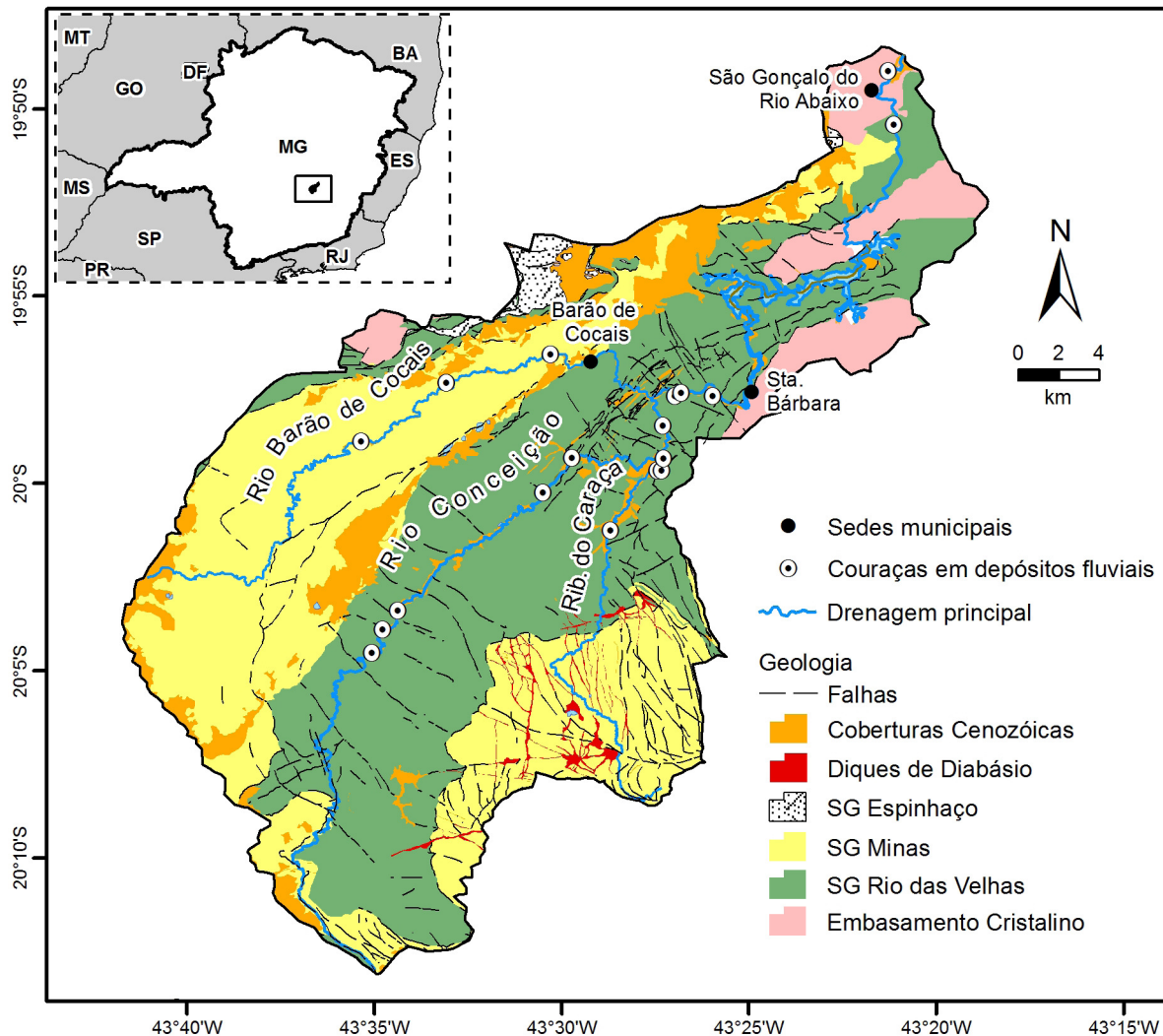


Figura 1 – Localização e contexto geológico da bacia do Rio Conceição.

O quadro bioclimático no qual a bacia está inserida é marcado pela influência de um clima, segundo classificação de Köppen, do tipo CWb (tropical de altitude, com chuvas de verão e verões frescos) nas porções mais elevadas e do tipo CWa (tropical de altitude, com chuvas de verão e verões quentes) nas porções mais rebaixadas. A precipitação média anual é de 1.500 mm e a temperatura de 22°C (SEA 1980). Os remanescentes de vegetação nativa incluem campos rupestres e de altitude, mata de candeia, mata estacional semidecidual e áreas de transição para o cerrado (CARVALHO FILHO *et al.*, 2010). Os campos rupestres incluem fitofisionomias raras, como os campos ferruginosos (MOURÃO & STEHMANN, 2007).

O Vale do Rio Conceição corresponde a um anticlinal invertido, cujo arcabouço estrutural está associado a litologias do Supergrupo Rio das Velhas, em que se

distinguem duas unidades de paisagem (CARVALHO FILHO *et al.*, 2010):

i) nas cabeceiras, em um patamar elevado, encontram-se colinas convexas de topos relativamente amplos, recobertos por vegetação campestre, entre 1.300 e 1.450 m de altitude. Predominam Cambissolos Háplicos de textura média e Neossolos Litólicos, que nos trechos de maior declividade dos vales tendem a ser cascalhentos e pedregosos. A norte, ocorre relevo fortemente ondulado a ondulado, sob vegetação de floresta subperenifólia, que recobre Latossolos Vermelho-Amarelos de textura argilosa e caráter ácrico, em geral associados com Cambissolos. Ocorrem também pequenas várzeas com Gleissolos Háplicos ou Melânicos, sob campo higrófilo. O limite dessa unidade mais elevada é bastante acentuado, marcado pela presença

de altas cachoeiras e não raro, exposições rochosas ou vales muito íngremes.

ii) abaixo das cabeceiras do vale, o Rio Conceição é ladeado por uma sucessão de elevações de cumes estreitos, em que se destaca a Mata Atlântica. O relevo é montanhoso a fortemente ondulado, dissecado por uma drenagem em treliça, ocorrendo principalmente Cambissolos nas encostas côncavas e trechos mais íngremes, e em menor proporção Latossolos Vermelho-Amarelos em topos um pouco mais amplos e encostas de conformação convexa. A jusante, o Rio Conceição é ladeado por pequenos terraços e encostas onduladas, ocupadas por Latossolos Vermelhos, com maior expressão na proximidade da confluência com o Rio Caraça.

## 2.2 Trabalhos de campo e amostragem

Diversas ocorrências de couraças ferruginosas podem ser observadas na bacia do Rio Conceição, de

acordo com levantamento de Barros e Magalhães Jr. (2013) e Barros (2015) (Figura 1). A partir da compartimentação dos distintos registros fluviais apresentada por Barros (2015), foi selecionada uma sequência de níveis fluviais escalonados no vale do Rio Conceição, especificamente no médio curso (próximo à confluência com o Ribeirão do Caraça), que contém os três níveis amplamente encouraçados reportados pelo autor: N3, N5 e N7 (Tabela 1; Figura 2). Trabalhos de campo foram realizados para reconhecimento da área e identificação das variações faciológicas das couraças presentes nestes níveis. Essa identificação foi feita a partir de atributos morfológicos, texturais e estruturais. Foram destacados, conforme proposto por Nahon (1977), a cor e o arranjo entre cimento e fragmentos na escala macroscópica. A partir das variações identificadas, reportadas neste estudo como *fácies de alteração*, foram coletadas 12 amostras indeformadas para caracterização mineralógica e micromorfológica.

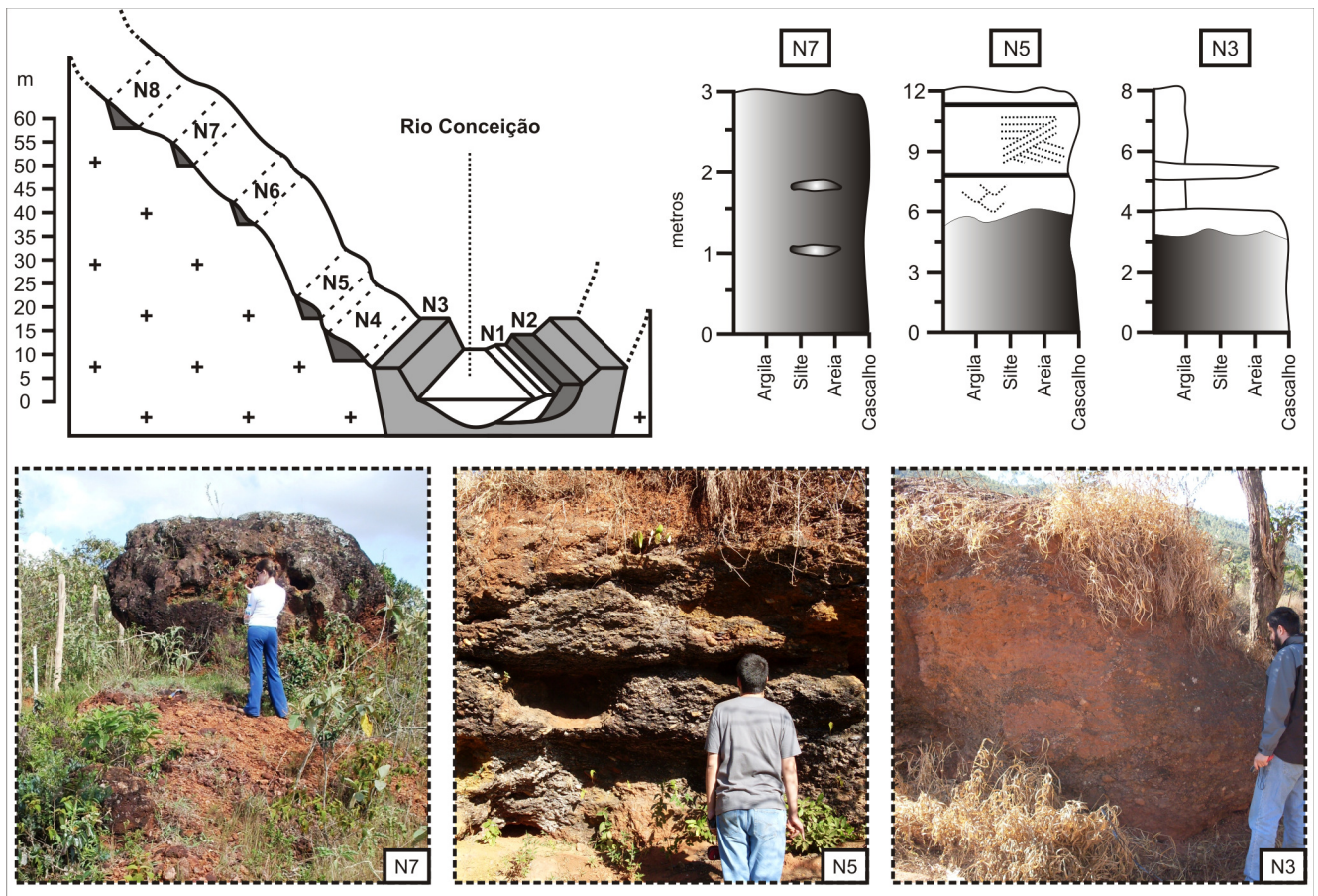


Figura 2 – Representação da sequência escalonada de depósitos fluviais do vale do Rio Conceição, perfis estratigráficos e imagens representativas destacando os níveis N3, N5 e N7, nos quais foram coletadas as amostras utilizadas neste estudo.

**Tabela 1: Dados gerais sobre os níveis deposicionais dos sedimentos amostrados – baseado em Barros (2015).**

Nível Depositional	Altura (m)	Cotas de ocorrência (m)	Fase correspondente de evolução fluvial regional e idade (ka = mil anos)
Nível 7 – N7	50	780	Fase? – >83 ka
Nível 5 – N5	15	765-730	Fase 2 – 47 ka
Nível 3 – N3	0	790-635	Fase 4 – 26 ka

### 2.3 Caracterização micromorfológica, microquímica e mineralógica

Com as amostras coletadas, foram confeccionadas lâminas delgadas e polidas na dimensão 1,8 x 30 x 40 mm. A caracterização micromorfológica foi realizada em microscópio petrográfico trinocular da marca Zeiss, modelo Axiophot, com câmera fotográfica acoplada. Foi utilizada a terminologia de Stoops (2003) para a caracterização das microestruturas e termos específicos dos sistemas de alteração utilizados por Nahon (1991), Delvigne (1998) e Stoops & Marcelino (2010). Sítios representativos foram selecionados para observação no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo QUANTA FEI 3D acoplado com quatro sensores de espectroscopia EDS, do Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais. As lâminas selecionadas foram recobertas com filme condutor de carbono e montadas em suporte metálico, sendo obtidas imagens de elétrons retroespalhados.

A análise mineralógica foi realizada por Difractometria de raios-x. Com o auxílio de um martelo, fragmentos do cimento entre os clastos foram separados e posteriormente pulverizados em almofariz de ágata. As amostras foram acondicionadas em porta amostras e levadas ao Difractômetro Empyrean da Panalytical com radiação de  $\text{CuK}\alpha$ , no intervalo de 2 a  $70^\circ 2\theta$ . Os difratogramas foram interpretados no Software X'Pert HighScore Plus e através de padrões da literatura (BRINDLEY & BROWN, 1980).

## 3. Resultados

### 3.1 Aspectos macromorfológicos

Macromorfolologicamente, as couraças foram agrupadas em três fácies de alteração (Figura 3). As duas primeiras, F1 e F2, são encontradas apenas no nível N7 e a terceira, F3, nos níveis N7 (esparsamente), N5 e N3. As três fácies possuem arcabouço e matriz semelhantes em termos morfológicos e de composição, isto é, clastos

de formatos diversos, em sua maioria arredondados e alongados (seixos rolados), e também uma menor quantidade de clastos angulosos. Os clastos mais arredondados são aqueles de maior e menor tamanho, respectivamente 15-25 e 0,5-1 cm no maior eixo, enquanto muitos seixos alongados correspondem a itabirito com bandamento, o que provavelmente influencia no seu formato. A presença de seixos cimentados no arcabouço e matriz corrobora com o termo “conglomeráticas” utilizado por Barros (2015).

O arcabouço é polimítico, ocorrendo seixos de quartzito, itabirito, filito e xisto; além de fragmentos monomineralicos, como quartzo, hematita, placas de mica (muscovita e sericita principalmente) e calcedônia. A matriz é formada por grãos de tamanho areia, de composição quartzosa e hematítica, além de placas de muscovita. A presença da fração argila é pouco comum, sendo representada, quando presente, por pequenos nódulos com tamanho inferior a 1mm de diâmetro.

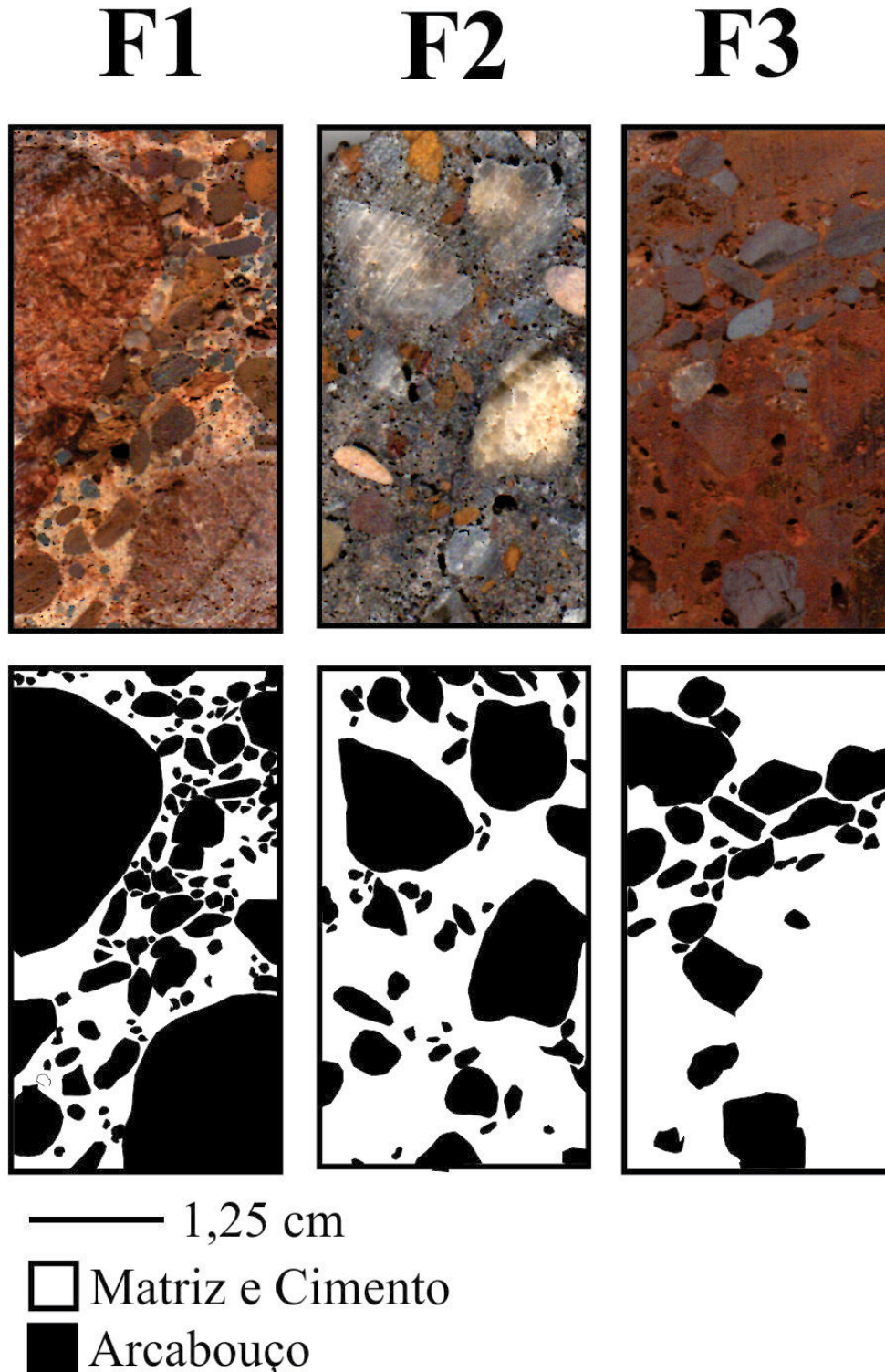
A principal diferença entre as três fácies de alteração é o cimento, sobretudo em relação a sua cor e dureza. Na fácies F1 ocorre um cimento mais claro, em tons amarelados (10YR 7/8) e com resistência moderada a ser fragmentado pelo martelo. Na fácies F2 ocorre um cimento de aspecto heterogêneo, com pontuações amareladas a vermelho-amareladas (5YR 7/8 e 5/6), num fundo acastanhado a acinzentado. Trata-se do nível de mais fácil desagregação e a depender da amostra, os seixos podem ser desmembrados com a própria mão. F3, por sua vez, apresenta um cimento muito duro e avermelhado (2,5R 3/6), com dificuldades expressivas de ser fragmentado.

### 3.2 Aspectos micromorfológicos e mineralógicos

Micromorfolologicamente, o cimento na fácies de alteração F1 possui composição aluminosa e ocorre na forma de septos de gibbsita, formados por cristais dentilhados, perpendiculares aos clastos (Figuras 4A, 4B e 4C). Os cristais possuem um brilho vítreo em nícois

cruzados e tamanho variando entre 20 e 40  $\mu\text{m}$ . Embora sejam estruturas semelhantes àquelas formadas pelo processo de alitização (DELVIGNE, 1998), não são observadas pseudomorfoses, tampouco conservações de volumes e outras feições isalteríticas. Em termos composicionais, o conteúdo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é, em média,

66% (Figura 4D), corroborando com a mineralogia, que apresenta picos bem definidos de gibbsita (Figura 4D). Como não é possível separar o cimento de alguns fragmentos da matriz, aparecem também no difratograma picos de outros minerais, como hematita, quartzo e goethita.



*Figura 3 - Aspecto macromorfológico das distintas fácies de alteração das couraças conglomeráticas identificadas.*

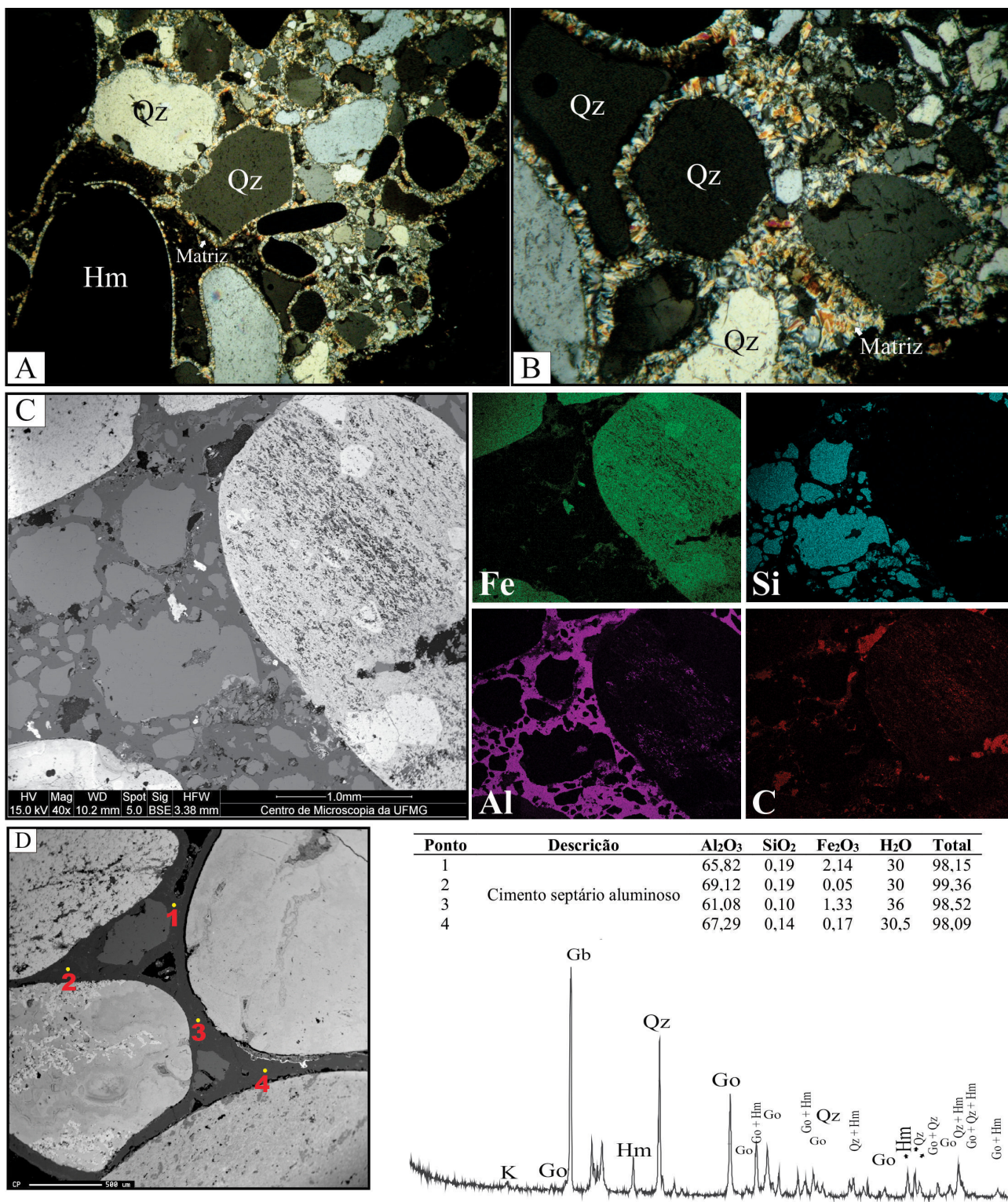


Figura 4 – Aspecto micromorfológico das couças conglomeráticas com cimento aluminoso, evidenciando: A e B - fotomicrografias obtidas em microscópio óptico (níveis cruzados) das organizações septárias do cimento aluminoso e porosidade secundária associada; C – Mapas microquímicos dos elementos Fe, Al, Si, e C obtidos por sonda EDS acoplada em MEV, com respectivas imagens de elétrons retroespalhados. As porções coloridas indicam a presença do elemento químico indicado no canto inferior esquerdo de cada imagem; D - Microanálises pontuais obtidas por microsonda WDS acoplada em Microscópio Eletrônico de Varredura, com respectivas imagens de elétrons retroespalhados. Os números nas imagens indicam as posições em que foi posicionado o feixe e realizadas as leituras. Os elementos analisados foram Al, Si, Fe, além do conteúdo de água, todos reportados em óxidos. Difratograma de Raios-X (radiação CoK $\alpha$ ) do cimento ferruginoso e matriz associada. K = caulinita; Go = goethita; Mv = muscovita; Qz = quartzo e Hm = hematita.



A fácies de alteração F2, a exemplo de F1, é micromorfológicamente caracterizada pela presença de septos no espaço entre os clastos da matriz e o arcabouço (Figuras 5A, 5B). Os septos também revestem seixos e cristais de quartzo, diferenciando-se da fácies F1 por serem mais fragmentados e/ou possuir formato arredondado, semelhante a pisólitos. São reconhecidas duas zonas nos septos. Na porção interna, próximo aos clastos, ocorre

uma coloração avermelhada, cujo comportamento sob nícois cruzados sugere composição ferruginosa, o que é confirmado pelas análises microquímicas (Figuras 5E, 5F). Na porção externa é possível observar um material translúcido, de cor vítrea em nícois cruzados (Figura 5D), composto por gibbsita (Figuras 5E, 5F). Essas zonas aluminosas estão presentes principalmente na forma de interdigitações e sempre nas bordas dos septos.

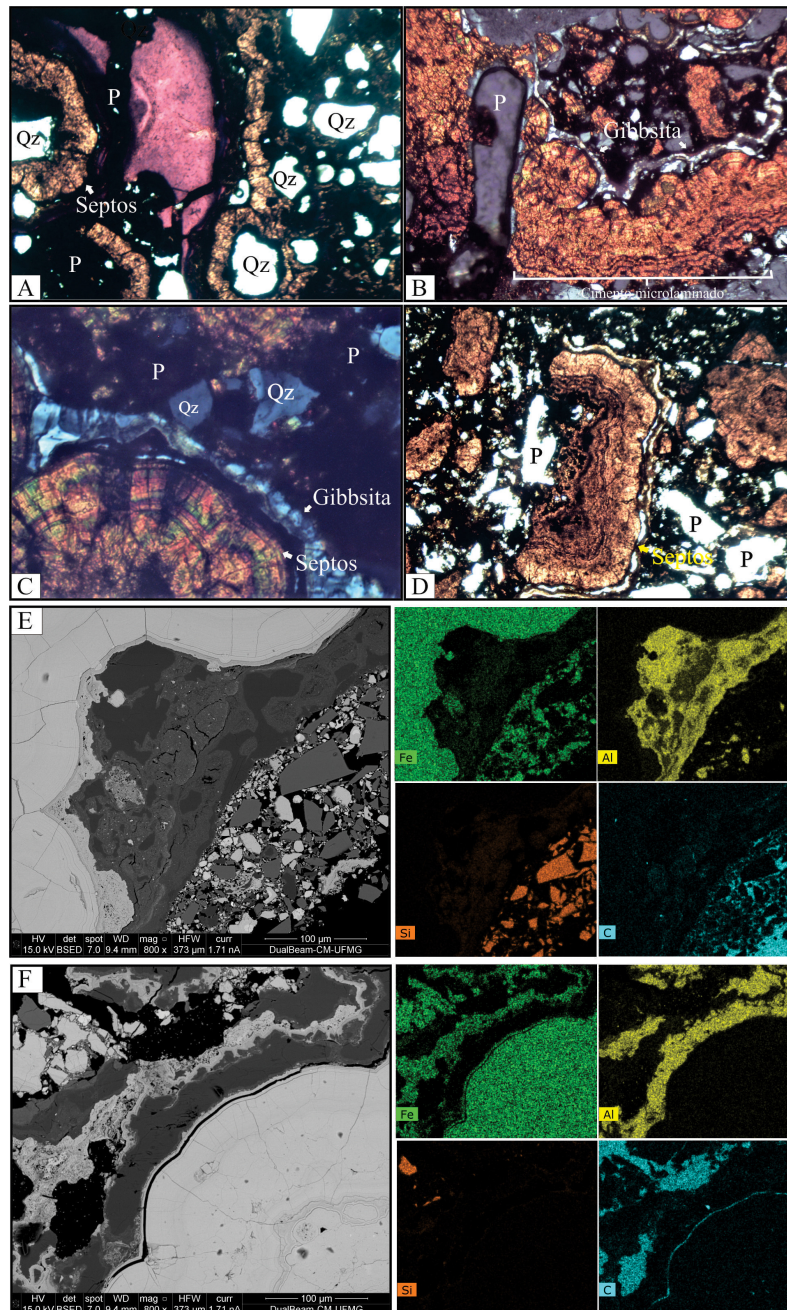


Figura 5 – Aspecto micromorfológico das couraças conglomeráticas com cimento ferro-aluminoso, evidenciando: A, B, C e D – fotomicrografias obtidas em microscópio óptico (nícois cruzados) das organizações septárias do cimento ferruginoso com septos de gibbsita associados e material de aspecto argiloso de coloração vermelho-escuro; E e F – Mapas microquímicos dos elementos Fe, Al, Si, e C obtidos por sonda EDS acoplada em MEV, com respectivas imagens de elétrons retroespalhados. As porções coloridas indicam a presença do elemento químico indicado no canto inferior esquerdo de cada imagem. Qz = quartzo e P = poro.

A fácies de alteração F3 é uma típica couraça conglomerática ferruginosa. Apresenta arcabouço e matriz envolvidos por um cimento na forma de septos de goethita (Figuras 6A, 6B). Esses são compostos por cristais aciculares orientados de forma perpendicular à superfície dos fragmentos da matriz e arcabouço, formando *splits* isolados, como obser-

vado por Stoops (1970). Organizados desta maneira, os septos se encontram quase sempre no entorno dos grãos, constituindo uma feição de revestimento. Algumas porções do cimento apresentam também microlaminações, semelhantes àquelas observadas na fácies F2. Essas zonas laminadas também constituem revestimentos (STOOPS, 2003).

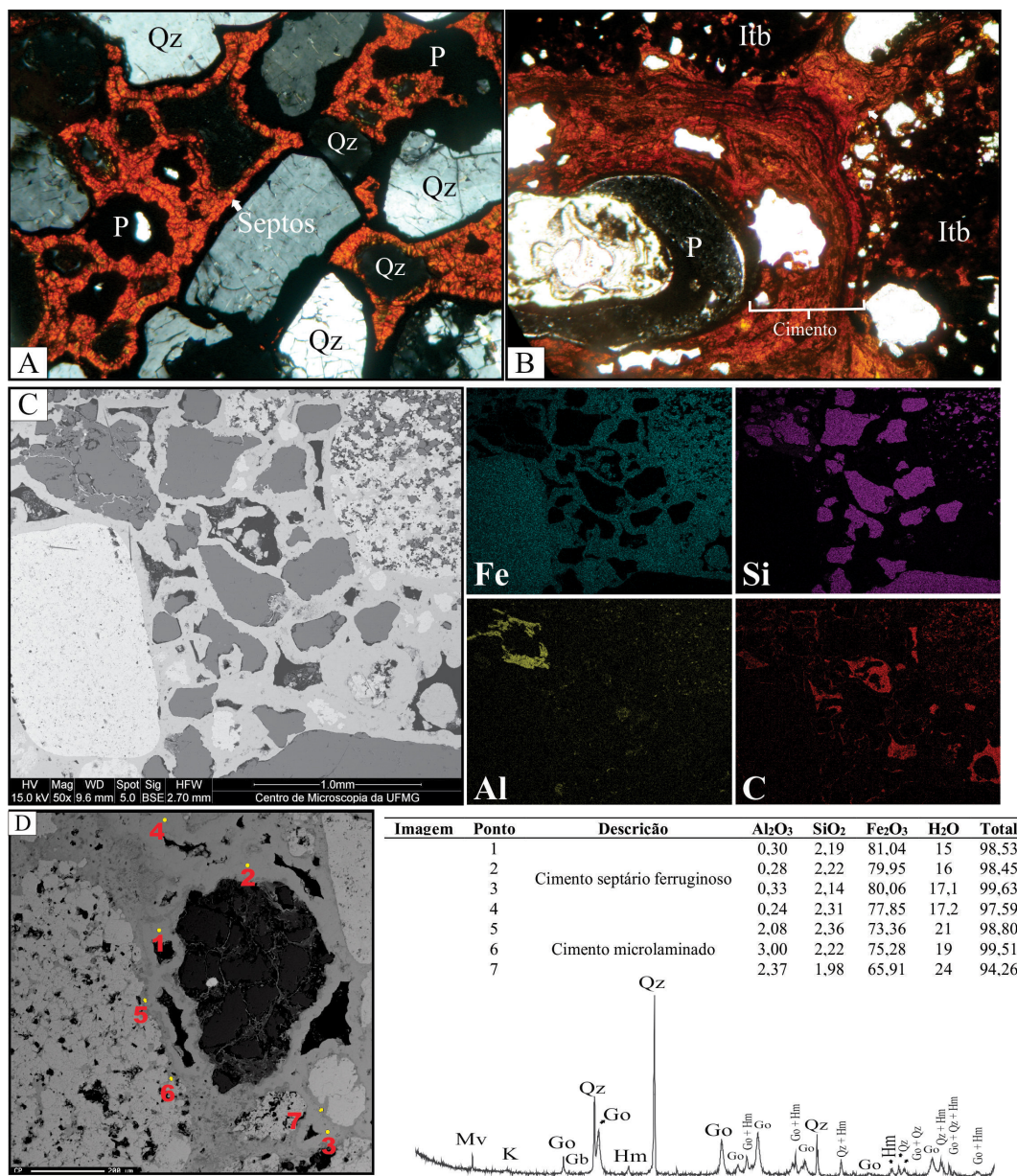


Figura 6 – Aspecto micromorfológico das couraças conglomeráticas ferruginosas, evidenciando: A e B - fotomicrografias obtidas em microscópio óptico (nícois cruzados) das organizações do cimento ferruginoso e porosidade secundária associada; C – Mapas microquímicos dos elementos Fe, Al, Si, e C obtidos por sonda EDS acoplada em MEV, com respectivas imagens de elétrons retroespalhados. As porções coloridas indicam a presença do elemento químico indicado no canto inferior esquerdo de cada imagem; D - Microanálises pontuais obtidas por microsonda WDS acoplada em Microscópio Eletrônico de Varredura, com respectivas imagens de elétrons retroespalhados. Os números nas imagens indicam as posições em que foi posicionado o feixe e realizadas as leituras. Os elementos analisados foram Al, Si, Fe, além do conteúdo de água, todos reportados em óxidos. Difratograma de Raios-X (radiação CoK $\alpha$ ) do cimento ferruginoso e matriz associada. K = caulinita; Go = goethita; Mv = muscovita; Qz = quartzo e Hm = hematita.

A análise mineralógica do revestimento confirma a presença da goethita (principal) e hematita (Figuras 6C, 6D) como constituintes principais. A composição química corrobora com a análise mineralógica, com 80% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e 16,3% de  $\text{H}_2\text{O}$ . O conteúdo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  é inferior a 1%, indicando maior pureza dos óxidos e hidróxidos de ferro (CORNELL & SCHWERTMANN, 2003). Nas zonas microlaminadas (Figura 6 pontos 11, 12 e 13), o conteúdo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é inferior, com média de 71,5%, havendo um acréscimo na participação do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  e maior conteúdo de água.

#### 4. Discussão

As três fácies de alteração identificadas e sua caracterização revelaram a presença de uma diversidade de couraças conglomeráticas até então desconhecida na região. Além da couraça ferruginosa, reportada por Barros & Magalhães Jr. (2013), foram identificadas também as couraças ferro-aluminosa e aluminosa.

A gênese das couraças pode ser compreendida a partir dos modelos de acumulação geoquímica relativa e absoluta (D'HOORE, 1954). A posição das couraças no fundo de vale e o fato de estarem envoltas por paisagens altas sustentadas por rochas ricas em ferro, sugere que a fonte dos elementos que constituem o cimento, sobretudo o cimento ferruginoso, é principalmente alóctone e, em menor grau, o intemperismo dos próprios seixos depositados. As feições observadas macroscopicamente e confirmadas em escala microscópica sustentam uma origem alóctone para o ferro, sendo elas: i) a ausência de córtex de alteração na maioria dos seixos, ii) o contato abrupto entre clastos e cimento e iii) a presença de uma cimentação contínua, formando uma camada. Uma representação esquemática desse processo é apresentada na Figura 7.

Stoops & Marcelino (2010) denominaram esse tipo de organização de *Gravel-Rich Layer*, enfatizando que, embora os constituintes sejam fragmentos soltos, eles aparecem unidos por um cimento aglutinador, formando camadas. Esse fato indica que a cimentação generalizada dos clastos teria ocorrido a partir da chegada de soluções via oscilação do freático, onde os espaços intergrãos foram preenchidos quando esses ainda se encontravam inconsolidados. Situação semelhante foi observada por Eswaran *et al.*, (1981) que indicou a gênese de couraças com a organização conglomerática fortemente associada ao enriquecimento absoluto.

Thomas (1994) corrobora com uma origem alóctone para materiais com essa morfologia, reiterando que as áreas superiores do relevo, e a consequente alteração de suas rochas, representa uma fonte potencial de elementos químicos (como o ferro) para as posições de fundo de vales.

A fonte de ferro necessário à formação do cimento que predomina nas fácies de alteração F2 e F3 seria o intemperismo das rochas e de outros níveis de couraças ferruginosas existentes em posições superiores da paisagem no QF. Conforme destacado por Spier *et al.* (2006), as soluções que migram no interior do manto de alteração na região são influenciadas pelo esvaziamento geoquímico das formações ferríferas bandadas, as BIF's. Em algumas áreas do QF o intemperismo das rochas ferruginosas chegou a formar saprolitos com mais de 450 m de profundidade. Esse processo envolve a exportação de uma quantidade considerável de ferro. Monteiro *et al.* (2014) corroboram com essa ideia, enfatizando que o balanço de massa envolvido no prolongado processo de formação de cangas nas áreas de topos abarca uma grande quantidade de exportação de ferro, incorporando-o às águas subterrâneas que, de maneira policíclica, poderão servir de fonte externa para o enriquecimento absoluto de couraças em ambientes à jusante.

Sobre o cimento de composição aluminosa, encontrado na fácies F1, alguns aspectos devem ser discutidos. A despeito de possuir um comportamento semelhante ao Fe, o Al é um elemento ainda menos móvel e por isso envolvido em migrações proximais e, por vezes, apenas dentro do próprio perfil (DELVIGNE, 1998). Ainda assim, é provável que soluções enriquecidas em Fe transportem também Al em solução, porém em menores quantidades e/ou distâncias. Por esse motivo as couraças ferruginosas apresentam alumínio em sua constituição, principalmente na estrutura dos hidróxidos de ferro, como a goethita aluminosa.

Até o presente, a origem de grande parte das bauxitas descritas no território brasileiro foi associada à alteração hidrolítica de rochas e sedimentos, sendo enquadradas como bauxitas lateríticas (CARVALHO, 1989). Mesmo que a literatura considere a origem sedimentar para alguns depósitos de bauxita (VALENTON, 1978), esses não foram identificados no Brasil, nem tampouco depósitos atribuídos majoritariamente à acumulação de alumínio exportado de posições superiores do relevo. Bonifas (1959) e Maignien (1958, 1966) demonstraram

que o alumínio pode migrar em solução, dadas as condições do meio, mas que esse processo ocorre de maneira restrita, sendo muito mais comum a acumulação relativa na formação de couraças aluminosas. Existem evidências que mostram a formação de fácies de alteração associadas à migração proximal do alumínio, como a evolução de bauxitas compactas proposta por Oliveira *et al.* (2013),

mas os autores reconhecem que essas fácies representam estágios evolutivos de uma fácies isalterítica primária. Nesses termos, parece pouco provável que soluções aluminosas provenientes do desmonte e/ou remobilização de antigas superfícies ricas em Al tenham representado a fonte do alumínio que, em solução, teria migrado e cimentado os níveis encontrados no vale do Rio Conceição.

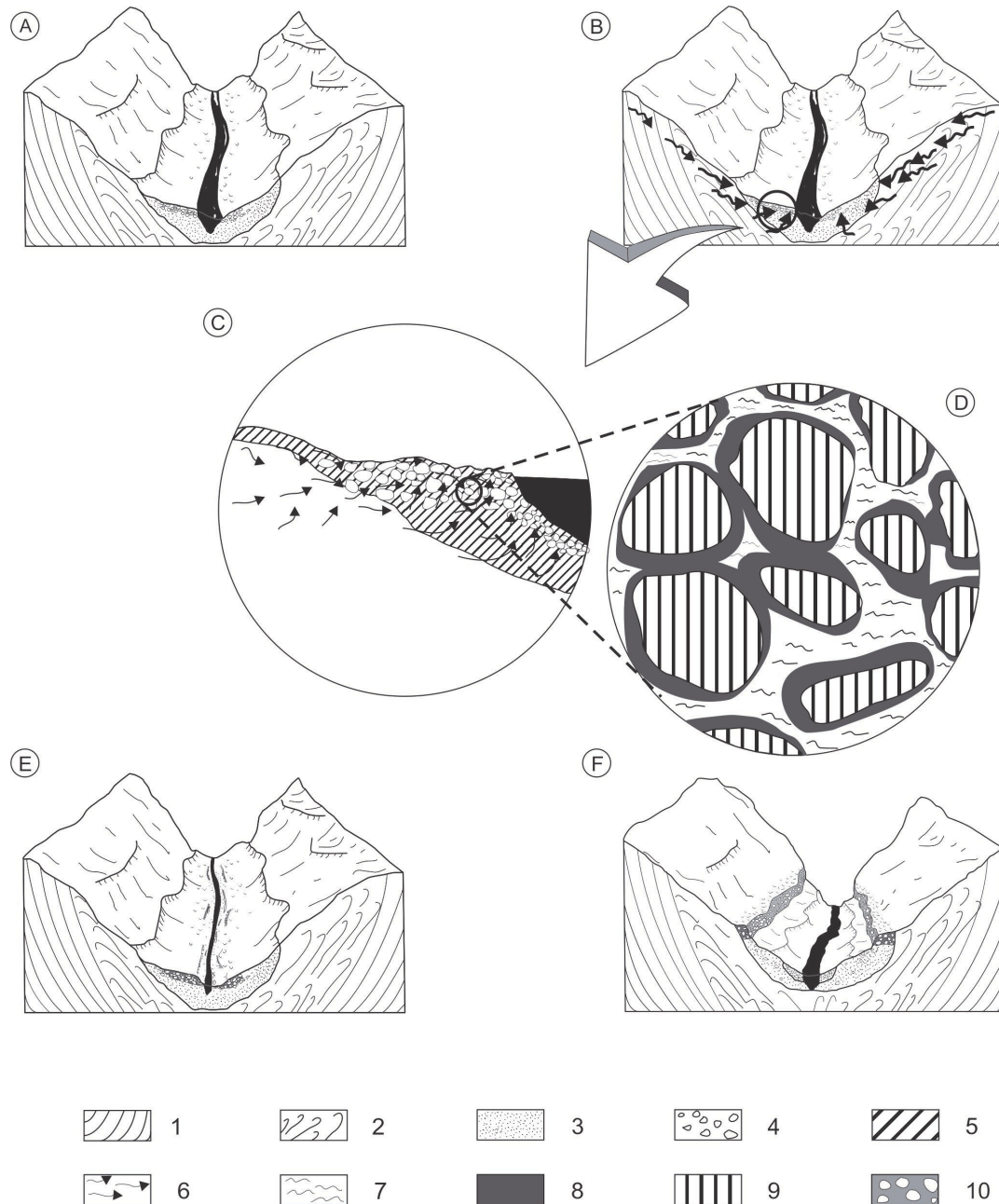


Figura 7 – Representação simplificada do modelo de formação do cimento ferruginoso das couraças conglomeráticas em fundos de vale. Em A, o canal deposita em sua planície de inundação, os seixos transportados; em seguida (B) o Ferro em solução, vindo das porções mais altas da vertente e também da dissolução do próprio material transportado, envolve os seixos. Em C o sentido de ascensão da migração do ferro é destacada, preenchendo e entupindo micros e macros poros, como ilustrado em D; Em E, uma mudança para clima mais seco resulta no endurecimento irreversível deste material; Com um input energético, o canal entalha o relevo e abandona o terraço congeccionado (F).

Considerando as organizações micromorfológicas observadas e estabelecendo uma relação entre elas, a origem da couraça conglomerática aluminosa parece estar relacionada a processos de degradação de uma couraça ferruginosa preexistente. A gibbsita está presente de duas maneiras nas couraças descritas. Na fácies F1 ela ocorre formando completamente o cimento que separa os clastos. Na fácies F2 ela ocorre de maneira descontínua e sempre na borda dos septos e zonas microlaminadas, cuja análise microquímica revelou serem de composição ferro-aluminosa. Assim, é provável que o arranjo observado na degradação da fácies F2 possa dar origem à fácies F1, o que seria possível através do processo de desferruginização.

A desferruginização, já abordada por Nahon (1976), Leprun (1979), Delvigne (1998), entre outros, é característica de ambientes de climas tropical e equatorial em que as formações lateríticas ferruginosas, em condições de intenso intemperismo geoquímico, são submetidas à mobilização das fases amorfas do Fe. O início do processo é a fragmentação física das couraças associada à colonização vegetal e consequente crescimento de raízes. Posteriormente, conforme destacam Alexander & Cady (1962), ocorre a dissolução do cimento, com notável preferência para a mobilização do ferro em detrimento do alumínio. Mudanças nas condições físico-químicas – como a incorporação de matéria orgânica e a oscilação do nível freático – podem ser responsáveis por isso. Os septos compostos principalmente de goethita são progressivamente alterados e mobilizados. Haveria, a partir disso, enriquecimento relativo em sílica e/ou alumínio e, a depender da atividade do silício, seria remineralizada a caulinita ou a gibbsita. O ferro remobilizado, por sua vez, pode contribuir para a cimentação de níveis encouraçados em posições inferiores do relevo. Autores como Santos *et al.* (2004) e Santos & Varajão (2004) já reportaram a desferruginização como um processo importante na transformação mineral de fácies argilosas em depósitos do QF.

Considerando a posição das couraças nos distintos níveis fluviais (Figura 2) e seus atributos micromorfológicos e mineralógicos, a relação genética parece ser estabelecida pela transformação da fácies F2 em F1 e consequente movimentação de material que contribuiu com a formação da fácies F3. A composição primária da couraça mais antiga, situada no nível mais alto (N7), era ferro-aluminosa, provavelmente cimentada por Al-goethita. Sua alteração envolveu o enriquecimento

em Al, que precipitou na forma de gibbsita, e exportação do ferro. Assim, o papel da dinâmica do relevo na transformação de uma fácies em outra foi fundamental.

Nos períodos de relativa aridez climática e quietude tectônica ocorre a abertura lateral do vale e formação de espessos pacotes sedimentares rudáceos, posteriormente transformados em couraças a partir da acumulação absoluta de ferro, sendo este proveniente dos processos de formação e evolução geoquímica de couraças (“cangas”) nas áreas de topo (BARROS, 2015; BARROS *et al.*, 2016). Assim, a formação das couraças ocorre em ambiente de fundo de vale, onde se acumulam os sedimentos grossos e as soluções enriquecidas em ferro. Entretanto, quando as couraças formadas são expostas acima da drenagem após um ou mais períodos de rejuvenescimento tectônico, sobretudo sob clima mais úmido, as novas condições de drenagem e a exposição às intempéries levam à degradação e transformação das couraças, favorecendo a desferruginização e enriquecimento em alumínio. Dessa forma, os produtos dos processos evolutivos das couraças podem ser utilizados como paleoindicadores da evolução do relevo.

O processo de formação das couraças através da cimentação ferruginosa é considerado dinâmico e rápido, mas sua degradação, exportação do ferro, remobilização e remineralização do alumínio demanda tempo. Isso explicaria a presença exclusiva de couraças aluminosas no nível deposicional mais antigo, N7 (Figura 2). As datações feitas por LOE no estudo de Barros (2015) posicionam o N7 numa idade superior a 83 ka (e, provavelmente, inferior a 140 ka) e os níveis subsequentes em idades relativas decrescentes, inspirados na ideia de sucessão deposicional cronológica. A relação genética entre as fácies identificadas reitera essa ideia, demonstrando que, a partir de sua formação, essas couraças passaram por processos evolutivos via alteração geoquímica.

## **5. Considerações Finais**

O estudo petrográfico das couraças no vale do Rio Conceição revelou a presença de distintas fácies de alteração, representadas por couraças ferruginosas, ferro-aluminosas e aluminosas. Os três tipos ocorrem no nível de terraço mais alto, ao passo que nos níveis inferiores predomina a couraça ferruginosa. Os atributos micromorfológicos denotam uma relação genética entre elas. As couraças ferruginosas e ferro-aluminosas parecem ter sido submetidas a processos de alteração

geoquímica que resultaram na exsudação do ferro e consequente enriquecimento em alumínio. Como produto, formou-se a couraça cimentada por gibbsita, envolvendo clastos de composição diversificada. O posicionamento das fácies de alteração nos distintos níveis fluviais sugere a presença de uma cronologia na evolução do relevo. O posicionamento destas couraças no fundo de vale e as idades obtidas por LOE para os sedimentos associados sugerem ser elas as mais jovens do Quadrilátero Ferrífero e que, ainda assim, já experimentam processos evolutivos. Estes reiteram a relação desses materiais com mudanças das condições ambientais com fases de entulhamento dos fundos de vale e dissecação pela rede de drenagem.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG – Projeto APQ-00695-17 – Universal 2017 - pelo fomento às atividades da pesquisa.

### Referências Bibliográficas

- ALEXANDER, L.T.; CADY, F.G. **Genesis and hardening of laterite in soils**. Technical Bulletin 1282. US Department of Agriculture, Washington, D.C, 1962. 90 p.
- ALKMIM, F.F.; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**. 90, 1998. p. 29–58.
- AUGUSTIN, C.H.R.R.; LOPES, M.R.S.; SILVA, S.M. LATERITAS: um conceito ainda em construção. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 14 (3), 2013, p. 241–257.
- BARBOSA, G.V.; RODRIGUES, D.M.S. **Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte, IGC/UFGM. 1967. 130p.
- BARROS, L. F. P. **Implicações geomorfológicas e paleoambientais de registros sedimentares fluviais do Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais**. 2015. 126 f. (Tese – Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- BARROS, L.F.P.; MAGALHÃES JR., A.P. Quaternary alluvial sedimentation in the Conceição river valley, southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**. 43(3), 2013. p. 535–554.
- BARROS, L.F.P.; GOMES COE, H. H.; SEIXAS, A. P.; MAGALHÃES JR., A.P.; DAMASIO MACARIO, K. C. Paleobiogeoclimatic scenarios of the Late Quaternary inferred from fluvial deposits of the Quadrilátero Ferrífero (Southeastern Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, 67, 2016. p. 71-88.
- BONIFAS, M. Contribution à l'étude géochimique de l'alteration latéritique. **Mem. Serv. Carte Géol. d'Alsace et Lorraine**, 17, 1959. 159p.
- BRINDLEY, G.W.; BROWN, G. **Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification** (Monograph 5). Min. Soc., London, 1980. 495 p.
- CARVALHO FILHO, A., CURTI, N., SHINZATO, E. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 45(8), 2010. p. 903–916.
- CARVALHO, A. **As Bauxitas no Brasil**. 1989. 134f. Tese (Livre Docência) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- CORNELL, R.M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence, and uses**. Weinheim: Wiley VCH, 2003. 664 p.
- D'HOORE, J. **L'accumulation des sesquioxydes libres dans les sols tropicaux**. Bruxelles. ISEAC, 110 (62), 1954. 132 p.
- DELVIGNE, J. E. **Atlas of micromorphology of mineral alteration and weathering**. 3rd ed. Canadian Mineralogist Special Publication, 1998. 509 p.
- DORR, J.V.N. Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. **Economy Geology**, 59, 1964. 1203-1240 p.
- DORR, J.V.N. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. United States Geological Survey. 1969, 110 pp. (Professional Paper 641A).
- ESWARAN, H.; COMERMA, J.; SOORYANARAYANAN, V. Scanning electron microscopic observations on the nature and distribution of iron minerals in plinthite and petroplinthite. In.: **Lateritisation Processes: proceedings of the International Seminar on Lateritisation Processes** (Trivandrum, India). Balkema, Rotterdam, 1981. p. 335–341.
- FURNISS, G., HINMAN, N.W., DOYLE, G.A., RUNNELLS, D.D. Radiocarbon-dated ferricrete provides a record of natural acid rock drainage and paleoclimatic changes. **Environmental Geology**, 37(1–2), 1999. p. 102-106.
- GOUDIE, A. **Duricrust in tropical and subtropical landscapes**. Oxford: Clarendon Press, 1973. 174p.
- KING, L. A geomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geografia**, 18(2), 1956. p. 147–265.

- LEPRUN, J.C. **Etude de 'évolution d'un système d'exploitation sahélien au Mali: Volet pédologique**. A.C.C., Lutte contre l'aridité en milieu tropical. ORSTOM/ DGRST Rapp, Paris, 1979. 27 p.
- MAIGNIEN, R. **Le cuirassement des sols en Guinée**. Mémoires Carte Géol. AlsaceLorraine, Strasbourg, 16, 1954. 239 p.
- MAIGNIEN, R. **Review of research on Laterites**. Natural Resources Research, UNESCO IV, 1966. 148p
- McFARLANE, M.J. **Laterite and Landscape**. London: Academic Press, 1976. 151 p.
- MEUNIER, A.; VELDE, B. Weathering mineral facies in altered granites” The importance of local small-scale equilibria. **Mineralogical Magazine**, 43, p. 261-268.
- MONTEIRO, H.S.; VASCONCELOS, P.M.; FARLEY, K.A.; SPIER, C.A.; MELLO, C.L. (U–Th)/He geochronology of goethite and the origin and evolution of cangas. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 131, 2014. p. 267–289. DOI:10.1016/j.gca.2014.01.036
- MOURÃO, A.; STEHMANN, J. R. Levantamento da flora do campo rupestre sobre canga hematítica couraçada remanescente na Mina do Brucutu, Barão de Cocais, MG. **Rodriguésia**, 58 (4), 2007. p.775-786.
- NAHON, D. B. L'alteration des roches ultrabasiques de Irkigon de Biankouma, Cote d'Ivoire. I. Le massif de Sipilou. **Rapport Sci. Terre, Univ. Abidjan**, 20, 1977. 19 p.
- NAHON, D. B. Cuirasses ferrugineuses et encrôtements calcariés au Senegal Occidental et en Mauritanie. Systèmes Évolutifs: Geochimie, structures, relais et coexistence. **Mem. Set. Géol.**, 44, 1976. 232 p.
- NAHON, D. B. **Introduction to the petrology of soils and chemical weathering**. John Wiley & Sons, New York, 1991. 313 p.
- OLIVEIRA, F. S.; VARAJAO, A. F. D. C.; VARAJAO, C. A. C.; BOULANGÉ, B.; SOARES, C. C. V. Mineralogical, micromorphological and geochemical evolution of the facies from the bauxite deposit of Barro Alto, Central Brazil. **Catena** (Cremlingen), 105, 2013. p. 29-39.
- PAIN, C.F.; OLLIER, C.D. Inversion of relief – a component of landscape evolution. **Geomorphology**, 12, 1995. p. 151-165.
- PHILLIPS, J.D. Rapid development of ferricretes on a subtropical valley side slope. **Geografiska Annaler**. 82(A), 2000. p. 69-78.
- SAADI, A.; SGARBI, G.N.C.; ROSIERE, C.A. A Bacia do Gongo Soco; uma nova bacia terciária no Quadrilátero Ferrífero: controle cárstico e/ou tectônico?. In.: CONG. BRAS. GEOL., 37, 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo, SBG, 1992, 1, 1992. p. 600- 601.
- SALGADO, A. A. R.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, C.A. C. ; COLIN, F.; VARAJÃO, A. F. D. ; NALINI JUNIOR, H. A. . Relief evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil) by means of (<sup>10</sup>Be) cosmogenic nuclei. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, 52, 2008. p. 317-323.
- SANTOS M.C., VARAJÃO, A. F. D. C., YVON, J. Genesis of clayey bodies in Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Catena**, 55, 2004. p. 277 – 291.
- SANTOS, M.D.C.; VARAJÃO A.F. D.C. Sedimentation and Pedogenic features in a clay deposit in Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 76. 2004. 21p.
- SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA–SEA. **Atlas de zoneamento agroclimático do Estado de Minas Gerais**. 1980. Disponível em: <<http://www.ide.ufv.br/geominas/>>.
- SGARBI, G.N.C.; FANTINEL, L.M.; MASOTTI, F.S. Geologia dos sedimentos lacustres da Bacia terciária do Gandarela. **Revista da Escola de Minas**, 45, 1992. p. 118-122.
- SPIER, C.A.; VASCONCELOS, P.M.; OLIVIERA. S.M.B. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronological constraints on the evolution of lateritic iron deposits in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Chemical Geology**, 234, 2006. p.79–104.
- STOOPS, G.; MARCELINO, V. Lateritic and Bauxitic Materials. In.: Stoops, G., Marcelino, V. & Mees, F. (eds.), **Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths**. Elsevier, Amsterdam, 2010. p.329–350.
- STOOPS, G. Scanning electron microscopy applied to the micromorphological study of a laterite. **Pedologie**, 20, 1970. p. 268–280.
- STOOPS, G. **Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections**. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 2003. 184 p.
- TARDY, Y., ROQUIN, C. Geochemistry and evolution of lateritic landscapes. In.: Martini I.; Chesworth W. (eds) **Weathering, Soils and Paleossols**, Elsevier, Amsterdam, 1992. p. 407-43.
- TARDY, Y. **Pétrologie des latérites et des sols tropicaux**. Masson, Paris, 1993. 535p.
- THOMAS M.F. **Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes**. J. Wiley & Sons, 1994. 482 p.

TANNER, L.H.; KHALIFA, M.A. Origin of ferricretes in fluvial-marine deposits of the Lower Cenomanian Bahariya Formation, Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt. **Journal of African Earth Sciences**, 56, 2010. p. 179–189.

VALENTON, I. **Bauxites**. Elsevier, Development in Soil Science, 1, 1972. 213 p.

VARAJÃO, C.A. A questão da ocorrência das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, 21, 1991. p. 131–145.

VASCONCELOS, P.M., HEIM, J.A., FARLEY, K.A., MONTEIRO, H., WALTENBERG, K.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and (U–Th)/He –  $^4\text{He}/^3\text{He}$  geochronology of landscape evolution and channel iron deposit genesis at Lynn Peak, Western Australia. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 117, 2013. p. 283–312.

WIDDOWSON, M., 2007. Laterite and ferricrete. In: NASH, D.J.; MCLAREN, S.J. (Eds.), **Geochemical Sediments and Landscapes**. Blackwell, Malden, Massachusetts, p. 46–94.