

Idades paleomagnéticas de crostas lateríticas da Amazônia Paleomagnetic ages of lateritic crusts in Amazonia

Adriana Maria Coimbra Horbe^{1, II}

^IUniversidade Federal do Amazonas. Manaus, Amazonas, Brasil

^{II}Universidade de Brasília. Brasília, Distrito Federal, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta os primeiros resultados de datação relativa de crostas lateríticas na Amazônia por meio do emprego de técnicas paleomagnéticas. Para tal estudo, foram selecionadas amostras provenientes de sete localidades representativas da evolução de eventos lateríticos na Amazônia sobre rochas do embasamento Proterozoico e sedimentares Paleozoicas. Para seis dessas ocorrências, as crostas lateríticas se correlacionaram com a curva da deriva continental da América do Sul para eventos posteriores ao Cretáceo. Desse modo, as crostas mais antigas, desenvolvidas sobre as formações Prosperança e Nhamundá (rochas sedimentares do Neoproterozoico e Siluriano Inferior, respectivamente), indicam idades entre 70 e 80 Ma, enquanto que, para as crostas bauxíticas de Miltônia e Trombetas (Formações Alter do Chão e Itapecuru, ambas do Cretáceo Superior) e para as crostas mais recentes e exclusivamente ferruginosas de Manaus (Formação Alter do Chão), indicam-se, respectivamente, idades entre 28-50 Ma e 10 Ma. Tais idades, que são compatíveis com a evolução geológica da lateritização da Amazônia, permitiram identificar, com maior precisão, a cronologia da formação das crostas ferruginosas e bauxíticas e forneceram novos subsídios para delimitar superfícies de exposição e a correlação com a evolução tectônica da região durante o Cenozoico.

Palavras-chave: Cenozoico. Superfícies de exposição. Geomorfologia. Bauxita.

Abstract: This work presents the first results about the dating of lateritic crusts in Amazonia using the paleomagnetism technique. For the study were selected samples from seven sites that represent the lateritic evolution on craton rocks and on Paleozoic sedimentary rocks in Amazonia. For six of these occurrences, the lateritic crusts could be correlated with the curve of the continental drift of South America for post-Cretaceous events. In this way, the oldest crusts developed on Prosperança and Nhamundá Formations (sedimentary rocks of Neoproterozoic and Lower Silurian, respectively) indicate ages between 70 and 80 Ma, while for the bauxite crusts of Miltonia and Trombetas (Alter do Chão and Itapecuru Formations, both Upper Cretaceous) and the most recent and exclusively ferruginous crusts of Manaus (Alter do Chão Formation) are suggested, respectively, ages between 28-50 Ma and 10 Ma. Such ages, which are compatible with the geological evolution of the lateritization in the Amazon, allow to identify, with greater precision, the chronology of the formation of the bauxite and ferruginous crusts and provided new subsidies to delimit areas of exposure and the correlation with the tectonic evolution of the region during the Cenozoic.

Keywords: Cenozoic. Weathering surfaces. Geomorphology. Bauxite.

HORBE, A. M. C., 2014. Idades paleomagnéticas de crostas lateríticas da Amazônia. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 9(1): 93-104.

Autor para correspondência: Adriana Maria Coimbra Horbe. Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Campus Universitário Darci Ribeiro. Brasília, DF, Brasil. CEP 70910-900 (ahorbe@unb.br).

Recebido em 07/08/2013

Aprovado em 25/03/2014

Responsabilidade editorial: Hilton Tulio Costi



INTRODUÇÃO

Nos últimos 30 anos, vários trabalhos sobre intemperismo na Amazônia foram publicados, nos quais se detalham os tipos de perfis, os processos envolvidos, os períodos de formação de crostas lateríticas e a relação com a geomorfologia (por exemplo, Dennen & Norton, 1977; Grubb, 1979; Costa, 1997; Horbe *et al.*, 2001, Kotschoubey *et al.*, 1997, 2005; Costa *et al.*, 2006). As crostas lateríticas, produto do intenso intemperismo das rochas em climas tropicais, são consideradas, quando de composição mais aluminosa (bauxítica), como mais antigas (Paleógeno), enquanto as de composições mais ferruginosas são compreendidas como mais jovens, portanto do Neógeno (Costa, 1991, 2007). Pelo fato de as crostas representarem o resíduo do intemperismo e marcarem superfícies de exposição, o correto enquadramento permite estudar a evolução geomorfológica de uma região e os efeitos da neotectônica.

A técnica geocronológica ainda é pouco aplicada na lateritização, devido à dificuldade de datar óxi-hidróxidos de ferro e alumínio, os minerais mais abundantes formados por esse processo. Entretanto, estudos recentes (a exemplo de Pidgeon *et al.*, 2004; Shuster *et al.*, 2005; Lima, 2008) viabilizaram a utilização de goethita na datação dos eventos lateríticos via U-Th-He e de óxi-hidróxidos de manganês, portadores de potássio, por Ar-Ar (Vasconcelos *et al.*, 1994; Ruffet *et al.*, 1996). Com a técnica Ar-Ar foram obtidas idades entre 60 e 70 Ma para a crosta laterítica da mina Igarapé Azul, na região de Carajás, Pará (Vasconcelos *et al.*, 1994; Costa *et al.*, 2006).

Diante desse cenário, o paleomagnetismo apresenta potencial utilidade, que se baseia no fato de que, sob determinadas condições, certa fração do conteúdo dos óxi-hidróxidos de ferro preserva a magnetização remanente da época de sua formação. Portanto, estudos paleomagnéticos podem prover subsídios para a datação relativa, por meio da comparação dos polos paleomagnéticos obtidos com a curva da deriva polar aparente (Butler, 1998). No caso da América do Sul usa-se a curva de Ernesto (2006) para eventos posteriores ao Cretáceo, período em que

provavelmente se formaram as crostas lateríticas na Amazônia (Kotschoubey *et al.*, 1997, 2005). Na Austrália e na Índia, a técnica paleomagnética tem se mostrado particularmente efetiva devido à rápida deriva latitudinal desses continentes durante o Paleógeno (Smith, 1996). Apesar de a América do Sul não ter passado por grandes deslocamentos nos últimos 200 Ma (Randall, 1998; Ernesto, 2006), a técnica de paleomagnetismo em crostas lateríticas foi utilizada com excelentes resultados na Guiana Francesa (Théveniaut & Freyssinet, 1999, 2002).

Este trabalho teve como objetivo verificar a aplicabilidade do paleomagnetismo na datação relativa de crostas lateríticas. Para isso, tomou-se, previamente, o cuidado de efetuar uma amostragem ampla, de modo a cobrir o maior intervalo possível da cronologia de eventos lateríticos na Amazônia. Para esse fim, foram selecionadas rochas do embasamento e rochas sedimentares Paleozoicas, sobre as quais se desenvolveram crostas lateríticas. Essa seleção cobriu sete áreas, que já foram alvo de estudos geológicos, mineralógicos e geoquímicos anteriores (Fernandes Filho, 1996; Boulangé & Carvalho, 1997; Horbe *et al.*, 2001; Kotschoubey *et al.*, 2005; Peixoto & Horbe, 2008), e que retratam a evolução da lateritização na Amazônia (Figura 1).

MATERIAL E MÉTODOS

CONTEXTO GEOLÓGICO

As crostas ferruginosas estudadas apresentam espessura entre 0,5 e 3,5 m, são porosas, maciças, colunares, localmente protopisolíticas, avermelhadas a marrons e compostas basicamente por hematita e, em menor proporção, goethita, caulinita e gibbsita (Fernandes Filho, 1996; Peixoto & Horbe, 2008). Enquadram-se nesse tipo as crostas desenvolvidas sobre as formações Prosperança, em Presidente Figueiredo, e Alter do Chão, em Balbina e Manaus, todas no estado do Amazonas (Figura 1). Observa-se que na base da crosta ferruginosa de Balbina há uma incipiente crosta aluminosa (Horbe *et al.*, 2001).



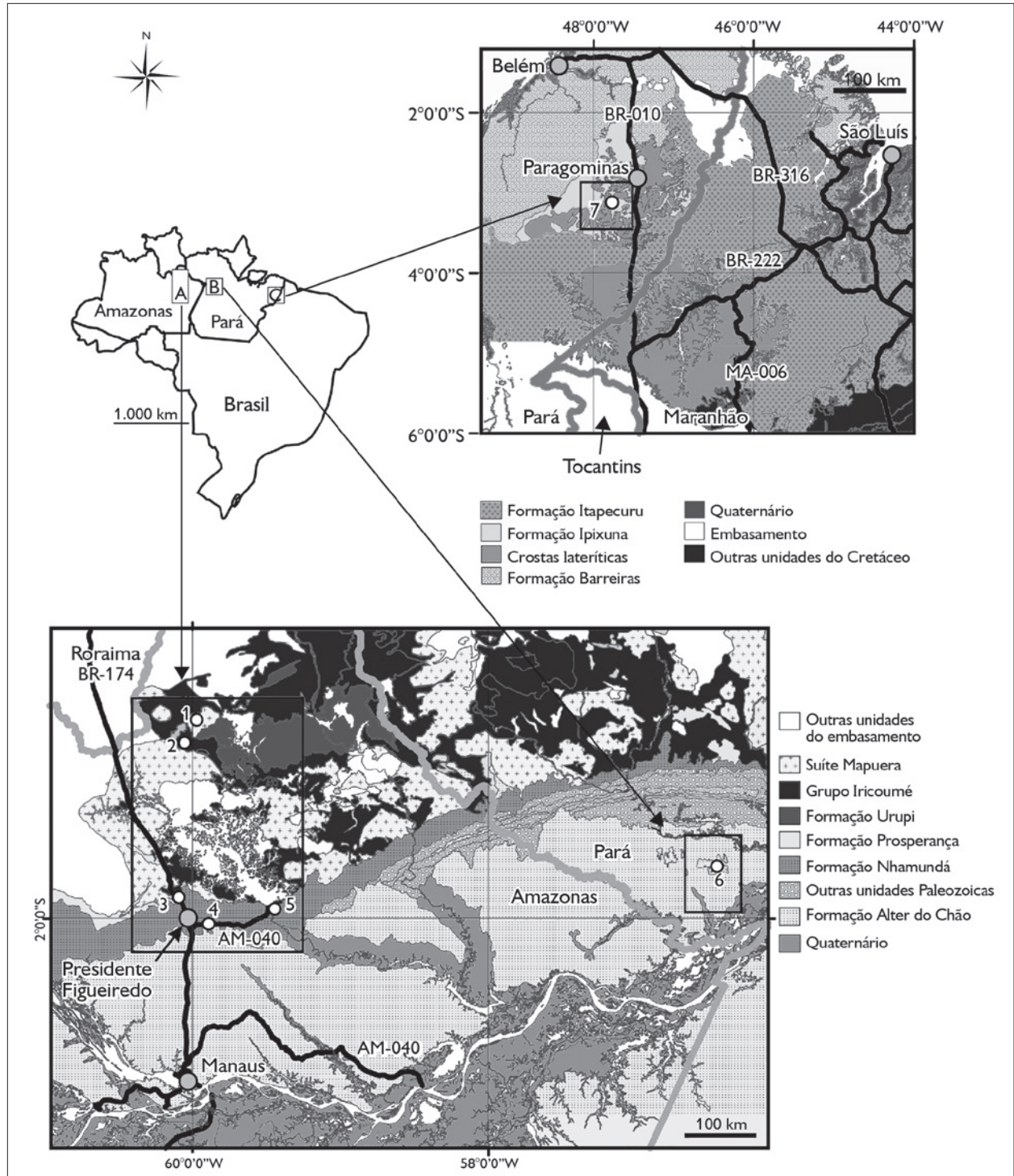


Figura 1. Mapa geológico e de localização das ocorrências de crostas lateríticas estudadas: A) região nordeste do Amazonas, que inclui as ocorrências de Pitinga (1 e 2), as desenvolvidas sobre a Formação Prosperança (3), sobre a Formação Alter do Chão, em Balbina (4) e sobre a Formação Nhamundá (5); B) sobre a Formação Alter do Chão, em Trombetas (6); C) sobre a Formação Itapecuru, em Miltônia (7).

As crostas alumínio-ferruginosas, ou bauxíticas, têm entre 0,1 e 4,0 m de espessura, são porosas, maciças e pisolíticas no topo, avermelhadas a rosadas, com predomínio de gibbsita sobre caulinita, hematita e goethita. Gibbsita porcelanada envolve os pisólitos ferruginosos no topo dessas crostas e quartzo ocorre nos dois tipos de crosta. Essas crostas ocorrem sobre rochas graníticas e vulcânicas do Supergrupo Uatumã (Suíte Mapuera e Grupo Iricoumé, respectivamente), sedimentares da Formação Nhamundá, no NE do Amazonas, Formação Itapecuru, em Miltônia, e Formação Alter do Chão, em Trombetas, ambas no Pará (Figura 1) (Boulangé & Carvalho, 1997; Horbe *et al.*, 2001; Kotschoubey *et al.*, 2005; Peixoto & Horbe, 2008).

AMOSTRAGEM

Amostras de crostas lateríticas foram coletadas com o auxílio de perfuratriz (Analytical Service Company, Carlsbad, USA), adaptada a um motor Still à gasolina tipo motosserra, que possibilita a obtenção de testemunhos de até 20 cm de comprimento por 2,5 cm de diâmetro. As crostas lateríticas, por terem, em geral, alta porosidade, fragmentam-se facilmente durante a perfuração, o que dificulta a amostragem, de modo que é possível obter, em média, apenas 1 ou 2 espécimes por perfuração. Consequentemente, para prover boa representatividade

e maior precisão ao processo subsequente de aquisição de dados, são necessárias várias perfurações tanto na lateral como na vertical das exposições.

Ao todo, foram amostradas crostas de sete regiões distintas (Figura 1 e Tabela 1), com total de 175 amostras analisadas. Essa amostragem ressalta dois aspectos importantes, um de caráter regional, amostrando as principais zonas de ocorrência de crostas lateríticas, onde ocorrem os principais depósitos de bauxita na Amazônia; e outro mais local, no NE do Amazonas, com crostas desenvolvidas a partir de rochas de idades distintas, visando a um enfoque de evolução do relevo, já que crostas lateríticas demarcam superfícies de exposição.

PROCEDIMENTO ANALÍTICO

Por ocasião das atividades de campo, foram obtidas as coordenadas geográficas das amostras, assim como o azimute magnético e mergulho relacionado à perfuração. Essas medidas são necessárias para a recuperação, após os processos de desmagnetização, da orientação da direção da magnetização remanescente natural (MRN).

Em laboratório, foram medidas, em cada amostra, a MRN e a susceptibilidade magnética (SM). Essas medidas foram feitas inicialmente em temperatura ambiente e após sucessivas etapas de aquecimento até a desmagnetização total das amostras, ou seja, até atingir a temperatura de

Tabela 1. Dados de intensidade de magnetização e susceptibilidade magnética.

Crostas	Tipo	Coordenadas		Intensidade de magnetização mA/m	Susceptibilidade magnética 10 ⁻⁶ SI
Supergrupo Uatumã – Mina Pitinga					
Sobre rocha granítica	Al-Fe	0° 47' 00" S	60° 02' 54" W	0,02 a 6,2	151 a 653
Sobre rocha vulcânica	Al-Fe	0° 40' 10" S	59° 55' 53" W		
Formação Prosperança	Fe	1° 46' 43" S	59° 59' 28" W	0,9 a 12,9	377 a 817
Formação Nhamundá	Al-Fe	1° 56' 48" S	59° 25' 24" W	0,1 a 6,6	12,6 a 616
Formação Alter do Chão, Miltônia	Al-Fe	3° 15' 52" S	47° 42' 24" W	0,4 a 6,0	3 a 25
Formação Alter do Chão, Trombetas	Al-Fe	1° 40' 47" S	56° 27' 22" W	1,4 a 9,9	4,2 a 101
Formação Alter do Chão, Balbina	Fe	2° 02' 54" S	59° 55' 00" W	0,1 a 18	50 a 641
Formação Alter do Chão, Manaus	Fe	3° 03' 41" S	60° 05' 12" W	2 a 23	339 a 980



bloqueio dos portadores magnéticos. O aquecimento foi a cada 50 °C, entre 100 e 500 °C, e a partir dessa temperatura as medidas passaram a ser a cada 30 °C até a desmagnetização final da amostra, em torno de 660 °C. Essas sucessivas etapas de desmagnetização permitem identificar a componente magnética, que, ao ser tratada por análise de componente principal no *software* REMASOFT, fornece o vetor de desmagnetização médio de cada amostra, e inferir o tipo de mineral magnético presente na amostra. O vetor, por sua vez, fornece a inclinação e a declinação do polo paleomagnético médio com relação ao polo magnético da Terra e, portanto, a posição relativa da amostra (Butler, 1998). Com o conjunto de polos das amostras, obtém-se o polo virtual do local ou sítio, que, comparado à curva da deriva polar aparente, permite estimar a idade relativa das rochas investigadas. Para essas medidas, realizadas no laboratório de Paleomagnetismo do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, foram utilizados um magnetômetro Agico modelo JR6, fabricado na República Checa, um susceptíbilmetro e um forno desmagnetizador.

RESULTADOS

PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DAS CROSTAS

Os valores de intensidade de MRN (Tabela 1) foram mais elevados nas crostas ferruginosas (até 23 mA/m) do que nas aluminosas (até 9,9 mA/m), padrão este que também se verifica para os dados de susceptibilidade magnética (até 980×10^{-6} SI nas ferruginosas e até 101×10^{-6} SI nas aluminosas) e sugere relação direta com a concentração dos minerais magnéticos.

Pela análise dos dados de desmagnetização térmica, é possível identificar três padrões magnéticos distintos para as crostas investigadas. A maioria das amostras estudadas (133) perdeu gradativamente a magnetização até 660 °C (Figura 2A) e, portanto, tem apenas uma componente de magnetização, cuja curva

resultante é sugestiva da ocorrência de hematita (Butler, 1998). Em menor proporção há aquelas amostras que exibem aumento de magnetização entre 100 e 300 °C e depois a perdem gradualmente (Figura 2B), o que indica a ocorrência de duas componentes magnéticas naturais, ligadas a goethita e hematita, respectivamente, já que esses são os minerais de ferro, com potencial magnético, encontrados nas crostas (Butler, 1998). O terceiro padrão é o das amostras com feições de desmagnetização complexas, sem definição de um vetor de desmagnetização (Figura 2C). Para os cálculos dos polos, foram utilizadas apenas as amostras com perda gradativa de magnetização, que refletem a presença de hematita em sua composição mineralógica.

DIREÇÕES PALEOMAGNÉTICAS E PALEOLATITUDES

Das 133 amostras com magnetização relacionada basicamente à hematita, ou seja, as que têm perda gradativa da magnetização até 660 °C, 107 foram utilizadas para a determinação das direções de inclinação e declinação média do polo da ocorrência, pois apresentaram parâmetros de precisão e confiabilidade em torno da direção medida mais elevados e erros na posição dos polos menores (Tabela 2). Apenas nas crostas de Miltônia e Trombetas foi possível determinar direções paleomagnéticas diferentes para o topo e a base da crosta (Figura 3).

Foram utilizadas 17 amostras na obtenção do polo das crostas desenvolvidas sobre rochas vulcânicas e graníticas do Supergrupo Uatumã ocorrentes na mina do Pitinga (Figura 3A). Destas, foram selecionadas oito direções para o cálculo das coordenadas do polo ($358,8^\circ$ longitude E e $41,1^\circ$ latitude S; Tabela 2, Figura 4). Contudo, as coordenadas não permitiram correlacionar o polo obtido com a curva de Ernesto (2006), provavelmente devido ao erro elevado ($\sim 23^\circ$). Esse problema poderia ser superado com análises de número maior de amostras, de modo a aumentar a confiabilidade das medidas.



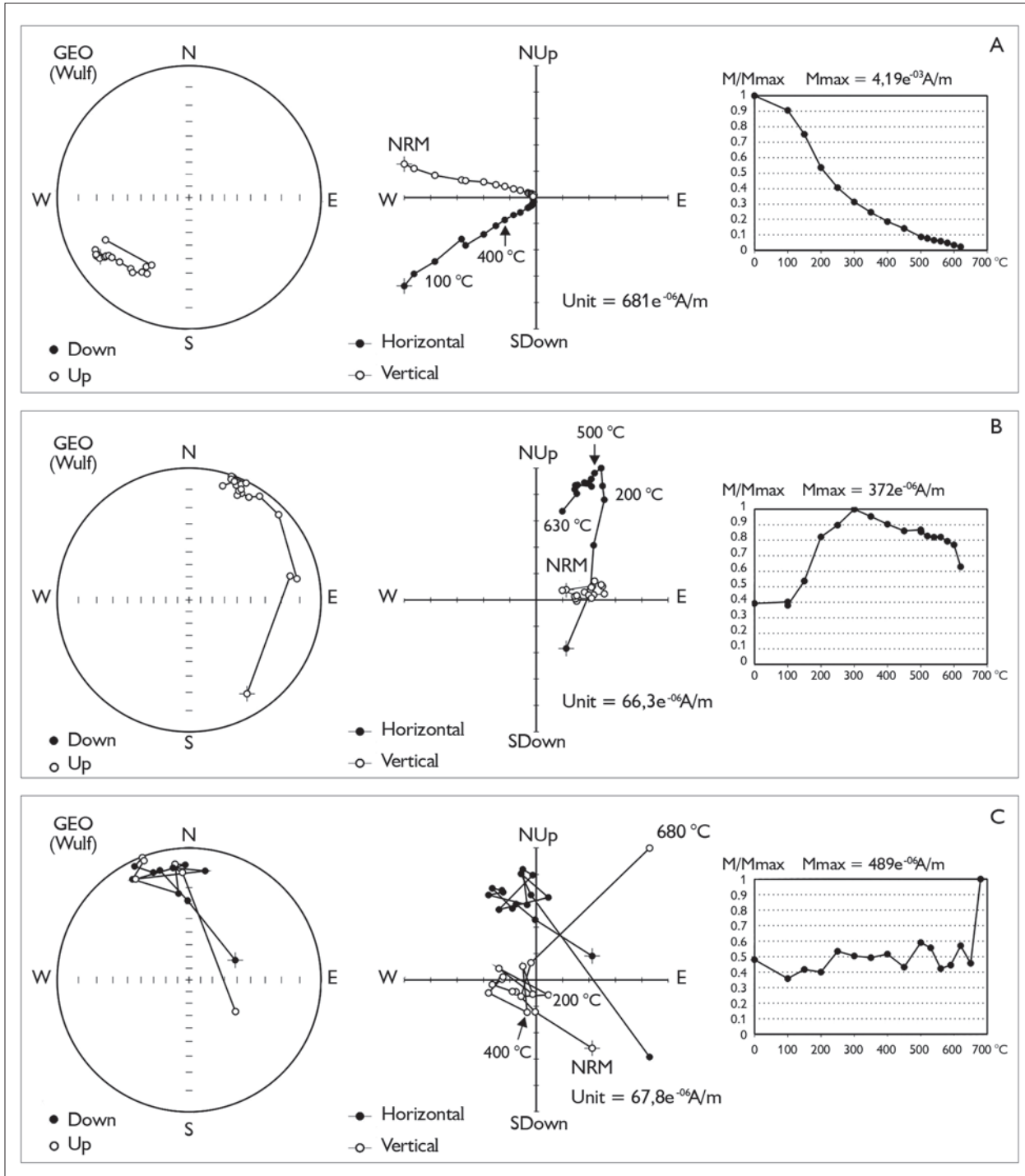


Figura 2. Exemplos das trajetórias de desmagnetização térmica em projeção estereográfica e ortogonal (Zijderveld) e curva de intensidade *versus* campo aplicado/temperatura das amostras estudadas. A) Observa-se perda gradativa da magnetização até 700 °C; B) aumento de magnetização entre 100 e 300 °C, ligada à transformação de goethita em hematita e posterior perda gradual da magnetização; C) perda irregular de desmagnetização, com padrões magnéticos complexos.



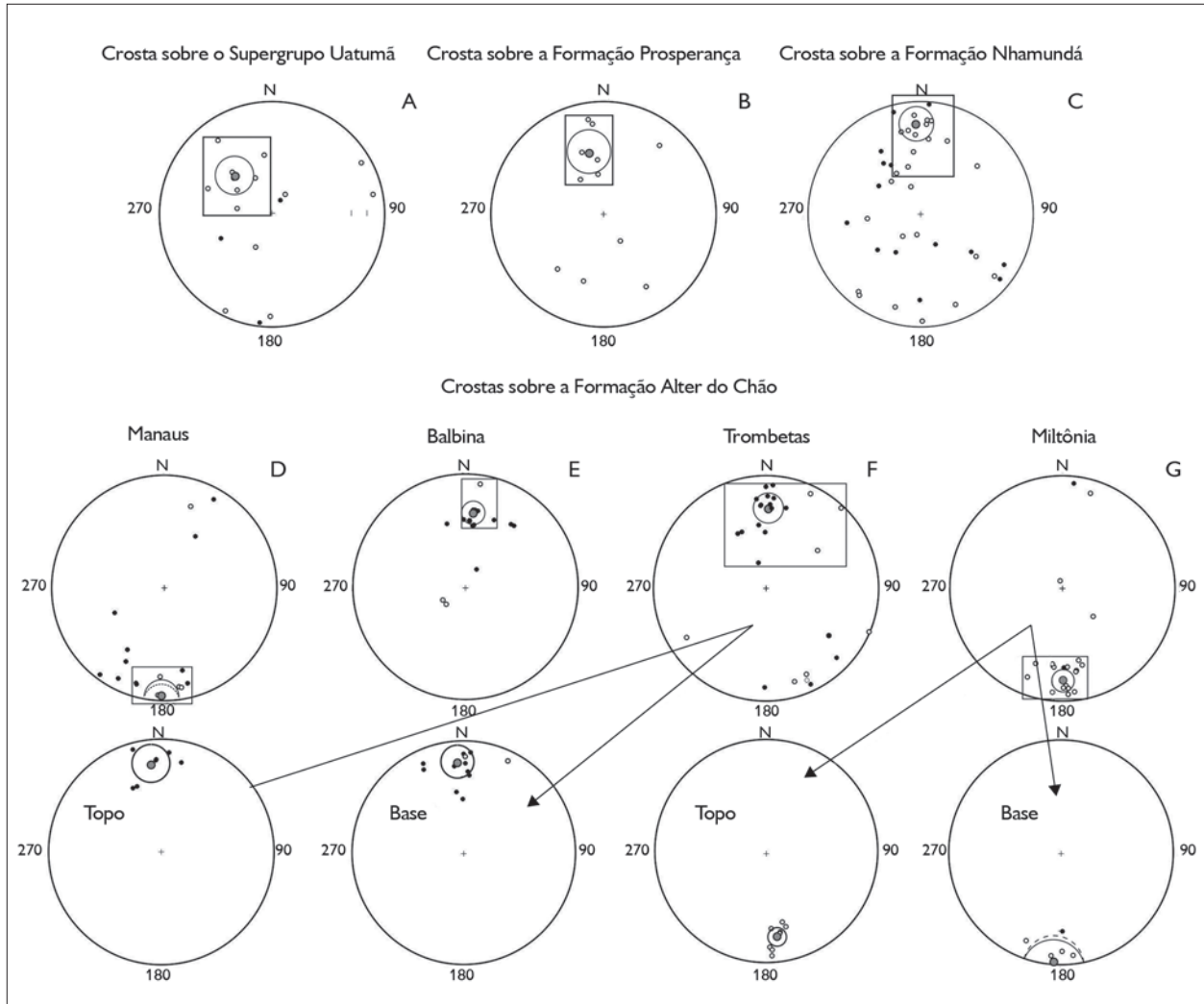


Figura 3. Projeção estereográfica com as direções paleomagnéticas das crostas lateríticas estudadas (ver Tabela 2). Os retângulos delimitam os pontos utilizados no cálculo dos polos; o tamanho do círculo menor marca a dimensão do erro no cálculo do polo; os pontos cheios e vazados indicam polaridade reversa e normal, respectivamente. A) Crosta sobre o Supergrupo Uatumã; B) crosta sobre a Formação Prosperança; C) crosta sobre a Formação Nhamundá; D-G) crostas sobre a Formação Alter do Chão: Manaus (D), Balbina (E), Trombetas (F) e Miltônia (G).

As demais crostas apresentaram polos correlacionáveis com a curva de Ernesto (2006) e indicaram idades entre 10 e 80 Ma (Tabela 2 e Figura 4). Como a deriva da América do Sul entre 50 e 80 Ma foi pequena (Ernesto, 2006), pode-se considerar que as crostas sobre as formações Prosperança e Nhamundá se desenvolveram nessa época, com a tendência de a segunda ser um pouco mais antiga (80 Ma) do que a primeira (70 Ma). As crostas aluminosas

de Miltônia e Trombetas tendem a ser mais jovens (50 Ma), mas, quando a base e o topo são tratados separadamente, é possível constatar que, enquanto a base das crostas indica ser mais antiga (80 Ma), especialmente a de Miltônia, o topo tem melhor correlação com os polos de 28 e 50 Ma (Figura 4). A crosta ferruginosa de Balbina está próxima do polo de 50 Ma, enquanto a crosta ferruginosa de Manaus é mais jovem, com 10 Ma (Figura 4).

Tabela 2. Direções paleomagnéticas e polos paleomagnéticos. Legendas: n = número total de amostras; N = número de amostras consideradas no cálculo das direções paleomagnéticas; Dec = declinação; Inc = inclinação; k = parâmetro de precisão; α_{95} = confiabilidade em torno da direção medida; Lon E = longitude leste; Lat S = latitude sul; PaleoLat = paleolatidade; dp e dm = erros na posição do polo.

Locais	n	N	Dec	Inc	k	α_{95}	Lon E	Lat S	PaleoLat	dp	dm	
Supergrupo Uatumã, Pitinga	17	8	315,3	-41,1	9,47	23,0	358,8	41,1	-23,6	17	27,9	
Formação Prosperança	11	5	350,0	-28,0	20,3	17,4	336,4	73,6	-14,9	10,4	19	
Formação Nhamundá	25	16	354,6	-22,8	14,86	10,6	328,6	78,7	-11,9	6,0	11,2	
Formação Itapecuru/ Alter do Chão	Miltônia	21	16	179,6	-11,7	30,19	6,8	309,9	80,8	-5,9	3,5	6,9
	Topo	10	8	183,7	-1,3	25,55	15,4	356,0	84,6	-0,7	7,7	15,4
	Base	5	5	10,7	3,6	41,93	14,4	169,0	81,8	-3,3	7,1	14,1
	Trombetas	27	17	2,1	15,5	16,57	9,0	-49,3	79,5	7,9	4,8	9,3
	Topo	10	4	2,9	16,1	92,57	9,6	-45,8	79,0	8,2	5,1	9,9
	Base	17	10	2,5	12,8	24,38	10,0	-45,0	80,8	6,5	5,2	10,2
	Balbina	15	8	5,9	22,1	46,48	8,2	-36,3	75,3	11,5	4,6	8,7
	Manaus	17	10	181,4	1,3	29,07	9,1	331,8	87,3	0,7	4,6	9,1

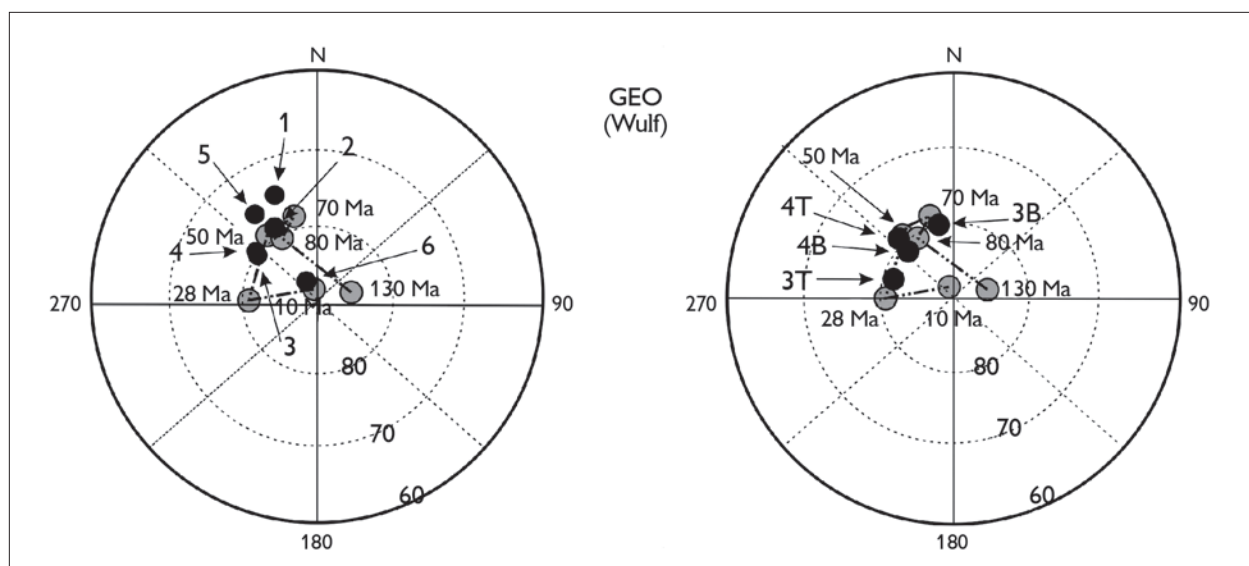


Figura 4. Posição dos polos paleomagnéticos das crostas: 1) sobre a Formação Prosperança; 2) sobre a Formação Nhamundá; 3) sobre a Formação Alter do Chão, em Miltônia; 4) sobre a Formação Alter do Chão, em Trombetas; 5) sobre a Formação Alter do Chão, em Balbina; 6) sobre a Formação Alter do Chão, em Manaus; B representa a base e T o topo da crosta; polos em cinza e linha tracejada representam a curva da deriva polar aparente para a Placa Sul-Americana, segundo Ernesto (2006).

DISCUSSÃO

MINERAIS MAGNÉTICOS

Os padrões de magnetização relacionados à hematita (perda gradativa de magnetização) e goethita (perda de

magnetização entre 100 e 300 °C, que corresponde à sua temperatura de desidratação; Cornell & Schwertmann, 1996; Butler, 1998) coincidem com a composição mineral identificada por difração de raios-x nessas crostas (Fernandes Filho, 1996; Boulangé &



Carvalho, 1997; Horbe *et al.*, 2001; Kotschoubey *et al.*, 2005; Peixoto & Horbe, 2008).

A hematita é o mineral magnético mais abundante das crostas lateríticas e a responsável pelo aumento da susceptibilidade magnética das crostas ferruginosas estudadas em relação às aluminosas. Por ser a fase desidratada, a hematita está relacionada aos eventos mais antigos de formação de crosta que requerem climas tropicais sazonais (Tardy & Roquin, 1998) e, portanto, é o mineral mais indicado para determinar a idade relativa das crostas lateríticas. A goethita é a fase hidratada e, portanto, mais adaptada às condições tropicais úmidas atuais, apesar de também estar em equilíbrio com a gibbsita (Tardy & Roquin, 1998). Assim, as amostras com perda gradual de magnetização até 700 °C (Figura 2A), que refletem a predominância da hematita como principal mineral magnético, são as mais indicadas para determinar a componente magnética das crostas lateríticas.

CRONOLOGIA DA LATERITIZAÇÃO NA AMAZÔNIA

A cronologia obtida por paleomagnetismo mostra que as crostas lateríticas estudadas se desenvolveram entre 10 e 80 Ma, o que se coaduna com os trabalhos geológicos, mineralógicos e geoquímicos desenvolvidos por Fernandes Filho (1996), Boulangé & Carvalho (1997), Horbe *et al.* (2001), Kotschoubey *et al.* (2005) e Peixoto & Horbe (2008). Portanto, esse longo período confirma os eventos lateríticos polifásicos definidos na Amazônia, que remontam ao final do Cretáceo e início do Paleógeno e as fases de bauxitização entre o Eoceno e início do Oligoceno (Costa, 1997; Kotschoubey *et al.*, 2005). São também cronologicamente coincidentes com as idades das crostas manganíferas de Carajás, datadas pelo método Ar-Ar (Vasconcelos *et al.*, 1994; Ruffet *et al.*, 1996; Costa *et al.*, 2006).

As crostas mais antigas na região estudada, com idades entre 50 e 80 Ma, desenvolvem-se sobre as formações Prosperança e Nhamundá, com idades respectivamente do Neoproterozoico e Siluriano Inferior (Caputo, 1984;

Cunha *et al.*, 1994). Esse também foi o período em que se desenvolveram as crostas aluminosas de Miltônia e Trombetas, sobre as formações Itapecuru e Alter do Chão, respectivamente das Bacias do Parnaíba e Amazonas, depositadas durante o Cretáceo Superior (Caputo, 1984; Cunha *et al.*, 1994; Anaisse Junior, 1999). Essas crostas, ambas com idades entre 50 e 80 Ma, comprovariam a necessidade de um longo processo de lateritização para o desenvolvimento das crostas aluminosas. A variação na idade entre a base e o topo das crostas, assim como constatado por Théveniaut & Freyssinet (2002) na Guiana Francesa e no Suriname, indica que os topos das crostas são mais jovens. Portanto, a gibbsita porcelanada, que envolve os pisólitos ferruginosos no topo das crostas aluminosas, está relacionada a uma segunda fase mais recente de bauxitização (28 a 50 Ma), correlata ao Eoceno e já identificada na Amazônia por Boulangé & Carvalho (1997), Kotschoubey *et al.* (2005) e Horbe (2011).

A crosta ferruginosa sobre a Formação Alter do Chão, que ocorre em Balbina, com idade de 50 Ma, a mesma do topo das crostas de Miltônia e Trombetas, justifica o porquê do desenvolvimento incipiente da crosta aluminosa nessa ocorrência (Horbe *et al.*, 2001). Em Manaus, a formação de crosta ferruginosa, com 10 Ma, estabelecida também sobre a Formação Alter do Chão, é compatível com a incipiente evolução do perfil e a ausência de horizonte aluminoso (Fernandes Filho *et al.*, 1997).

A cronologia confirma o que já havia sido inferido por Costa (1991, 1997), Horbe *et al.*, (2001) e Kotschoubey *et al.*, (2005), de que as crostas mais antigas preservadas na Amazônia datam do final do Cretáceo e início do Paleógeno e, de acordo com este trabalho, desenvolvidas entre 70 e 80 Ma. Permite concluir também que é necessário um período de pelo menos 50 Ma para formar crostas aluminosas bem desenvolvidas na Amazônia e que a segunda etapa de bauxitização no topo das crostas de Miltônia e Trombetas, entre 28 e 50 Ma, correspondente ao Paleoceno e início do Eoceno, foi responsável pelo desenvolvimento da gibbsita porcelanada, pela incipiente

crosta aluminosa sobre a Formação Alter do Chão em Balbina e pelo espessamento das crostas sobre as unidades mais antigas. Esse fato indica que o perfil original de Balbina e correlato ao de Trombetas deve ter sido truncado, com posterior retomada da lateritização entre 28 e 50 Ma.

IMPLICAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS E TECTÔNICAS

Considerando-se que a idade da Formação Alter do Chão é a mesma nas regiões de Manaus, Balbina e Trombetas, bem como a cronologia das crostas, ficam evidentes três superfícies regionais de aplanamento na região: 1) a mais antiga, representada pelas crostas alumino-ferruginosas de Trombetas, à qual Miltônia está relacionada, pelas crostas desenvolvidas sobre as formações Nhamundá e Prosperança e provavelmente pelas que ocorrem sobre as rochas do embasamento em Pitinga, formadas entre 70 a 80 Ma e, portanto, durante o Cretáceo Superior; 2) a superfície marcada pela crosta ferruginosa e incipiente crosta aluminosa associada, desenvolvida sobre a Formação Alter do Chão em Balbina e que representa a segunda fase de bauxitização ocorrida no topo das crostas das regiões de Trombetas e Miltônia, formada há 50 Ma, correspondente ao final do Paleoceno e início do Eoceno; 3) a superfície marcada por crostas ferruginosas também desenvolvidas sobre a Formação Alter do Chão, porém na região de Manaus, com 10 Ma e correlacionada ao final do Mioceno. Essas superfícies, que indicam três eventos de pediplanização, estão ligadas à instabilidade tectônica identificada por Fernandes Filho *et al.* (1997) nos perfis lateríticos da região.

Desse modo, é possível identificar, no NE do Amazonas, um evento de pediplanização que truncou os perfis mais antigos entre 50 e 70 Ma, de modo que as crostas na região de Trombetas e as desenvolvidas sobre as formações Prosperança e Nhamundá são seus relictos. Após essa fase, houve nova etapa de estabilidade tectônica, que deu origem à crosta ferruginosa e à incipiente crosta aluminosa desenvolvidas sobre a Formação Alter

do Chão, em Balbina, há 50 Ma. Nessa época, os perfis originados em Trombetas e Miltônia foram retomados e desenvolveram gibbsita porcelanada no topo da crosta. A ausência dessa crosta aluminosa nas cercanias de Manaus indica a ocorrência de uma longa fase de instabilidade tectônica na região, de modo que somente há 10 Ma houve novamente condições para a formação de crostas lateríticas neste local. Relictos dessa crosta ferruginosa são encontrados apenas na porção oeste da cidade de Manaus, especialmente nas proximidades da Ponta Negra, indicando que após sua formação ocorreram novos eventos erosivos, ligados a reativações tectônicas, responsáveis pela rotação de crostas, como constatado por Fernandes Filho *et al.* (1997). Essas múltiplas fases de pediplanização, com formação de crostas lateríticas e truncamento de perfis por erosão, estão de acordo com os eventos tectônicos identificados na região por Costa *et al.* (2001), que estão ativos desde pelo menos o Mioceno (Silva, 2005), sendo os responsáveis pela movimentação vertical de blocos e pelo controle da drenagem. Genericamente, essas superfícies podem ser correlacionadas, respectivamente, às superfícies Sul-Americana, Velhas e Paraguaçu, de King (1956).

A presença de crosta laterítica sobre rochas sedimentares miocênicas da Formação Novo Remanso, cujas características estruturais (Rozo *et al.*, 2005) as correlacionam com as crostas observadas sobre a Formação Barreiras (Horbe & Costa, 1997), mas que são diferentes daquelas desenvolvidas sobre a Formação Alter do Chão, em Manaus (Fernandes Filho, 1996), indica serem elas mais jovens do que 10 Ma e marca a existência de uma quarta superfície de aplanamento na região. Porém, como a Formação Novo Remanso ainda não foi totalmente mapeada na região, não é possível definir a extensão dessa superfície.

Esse conjunto de superfícies reflete o caráter polifásico das crostas lateríticas e comprova a necessidade de um longo período de exposição para seu desenvolvimento, além da necessidade de estabilidade tectônica para sua preservação.



Apesar da identificação dessas quatro superfícies no NE do Amazonas, a idade de 50 Ma determinada para a crosta ferruginosa na Formação Alter do Chão, em Balbina, portanto mais jovem que a das crostas desenvolvidas na região de Trombetas, com 70 a 80 Ma, justifica a formação incipiente de crosta aluminosa nesse local. A ocorrência de apenas essa crosta mais jovem a oeste da região de Trombetas está ligada aos múltiplos eventos tectônicos, com truncamento de perfis, identificados por Fernandes Filho *et al.* (1997), Costa *et al.* (2001) e Silva (2005), entre outros, durante o Mesozoico e Cenozoico na região, eventos esses que promoveram o intenso esculpimento da paisagem. Os platôs sustentados pelas crostas são os relictos dessas superfícies.

CONCLUSÃO

Os dados inéditos obtidos por este estudo, que possibilitaram uma estimativa acerca da cronologia das crostas lateríticas, são claramente indicativos de que técnicas relacionadas ao paleomagnetismo podem ser aplicadas de maneira eficaz na identificação da época de formação desse tipo de rocha na Amazônia, apesar de a deriva da Placa Sul-Americana no Cenozoico ter sido pequena. Tais considerações encontram apoio pela identificação de quatro eventos de lateritização na Amazônia, com o primeiro tendo ocorrido entre 70 e 80 Ma, o segundo entre 28 e 50 Ma, o terceiro há cerca de 10 Ma, enquanto um quarto evento, mais recente, corresponde às idades relativas de crostas ferruginosas sobre a Formação Novo Remanso, que é correlata à Formação Barreiras. Esses eventos determinaram o desenvolvimento de quatro superfícies de aplanamento.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro (processo 472426/2004-4); ao Professor M. L. Costa, pela ajuda em campo e pelas sugestões durante a elaboração do trabalho; ao Professor R. Trindade, pelo apoio na etapa inicial do trabalho e por permitir a utilização dos equipamentos

do Laboratório de Paleomagnetismo; e à Universidade Federal do Amazonas (UFAM), pela sua infraestrutura.

REFERÊNCIAS

- ANAISSE JUNIOR, J., 1999. **Fácies costeiras dos depósitos Itapecuru (Cretáceo), região de Açailândia, Bacia do Grajáú**: 1-88. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- BOULANGÉ, B. & A. CARVALHO, 1997. The bauxite of Porto Trombetas. In: A. CARVALHO, B. BOULANGÉ, A. J. MELFI & Y. LUCAS (Eds.): **Brazilian bauxites**: 55-73. USP/FAPESP/ORSTOM, São Paulo/Paris.
- BUTLER, R. F., 1998. **Paleomagnetism**: magnetic domains to geologic terrains. University of Arizona, Tucson. Disponível em: <<http://www.geo.arizona.edu/Paleomag/book/>>. Acesso em: 25 março 2008.
- CAPUTO, M. V., 1984. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**: 1-583. Thesis (PhD in Geology) – University of California, Santa Barbara.
- CORNELL, R. M. & U. SCHWERTMANN, 1996. **The iron oxides**: structure, properties, reactions, occurrences and uses. Wiley-VCH, Weinheim.
- COSTA, M. L., 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências** 21(2): 146-160.
- COSTA, M. L., 1997. Lateritization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. **Exploration and Mining Geology** 6(1): 79-104.
- COSTA, M. L., 2007. Introdução ao intemperismo laterítico e à lateritização. In: O. A. B. LICHT, C. S. B. MELLO & C. R. SILVA (Eds.): **Prospecção geoquímica de depósitos minerais metálicos, não metálicos, óleo e gás**: 1-788. SBGq/CPRM, Rio de Janeiro.
- COSTA, J. B. S., R. L. BEMERGUY, Y. HASUI & M. S. BORGES, 2001. Tectonics and paleogeography along the Amazon river. **Journal of South American Earth Sciences** 14(4): 335-347.
- COSTA, M. L., O. J. C. FERNANDEZ & M. E. R. REQUELME, 2006. O depósito de manganês do Azul, Carajás: estratigrafia, mineralogia, geoquímica e evolução geológica. In: O. J. MARINI, E. T. QUEIROZ & B. W. RAMOS (Eds.): **Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia**: 227-333. ADIMB, Brasília.
- CUNHA, P. R. C., F. G. GONZAGA, L. F. C. COUTINHO & F. J. FEIJÓ, 1994. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobras** 8(1): 47-55.
- DENNEN, W. H. & H. A. NORTON, 1977. Geology and geochemistry of bauxite deposits in the lower Amazon basin. **Economic Geology** 72(1): 82-89.



- ERNESTO, M., 2006. Drift of South American platform since Early Cretaceous: reviewing the apparent polar wander path. **Geociências** 25(1): 83-90.
- FERNANDES FILHO, L. A., 1996. **Geologia, mineralogia, geoquímica dos lateritos de Manaus – Amazonas**: 1-96. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- FERNANDES FILHO, L. A., M. L. COSTA & J. B. S. COSTA, 1997. Registros neotectônicos nos lateritos de Manaus – Amazonas. **Geociências** 16(1): 9-33.
- GRUBB, P. L. C., 1979. Genesis of bauxite deposits in the Lower Amazon Basin and Guianas coastal plain. **Economic Geology** 74(4): 735-750.
- HORBE, A. M. C., 2011. Oxygen and hydrogen isotopes in pedogenic minerals – implications for paleoclimate evolution in Amazonia during the Cenozoic. **Geoderma** 163(3-4): 178-184.
- HORBE, A. M. C. & M. L. COSTA, 1997. Solos gerados a partir do intemperismo de crostas lateríticas silicoferruginosas. **Acta Amazonica** 27: 241-256.
- HORBE, A. M. C., A. C. R. NOGUEIRA, M. A. HORBE, M. L. COSTA & K. SUGUIO, 2001. A lateritização na gênese das superfícies de aplanamento da região de Presidente Figueiredo-Balbina, nordeste do Amazonas. In: N. J. REIS & M. A. S. MONTEIRO (Eds.): **Contribuições à Geologia da Amazônia**: 2: 148-176. SBG-NO, Belém.
- KING, L. C., 1956. A geomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geografia** 2: 147-265.
- KOTSCHOUBEY, B., W. TRUCKENBRODT & B. HIERONYMUS, 1997. Bauxite deposits of Paragominas. In: A. CARVALHO, B. BOULANGÉ, A. J. MELFI & Y. LUCAS (Eds.): **Brazilian bauxites**: 75-106. USP/FAPESP/ORSTOM, São Paulo/Paris.
- KOTSCHOUBEY, B., W. TRUCKENBRODT & J. M. C. CALAF, 2005. Evolução geológica da porção meridional da província bauxitífera de Paragominas durante o Neógeno/Pleistoceno (noroeste da Bacia do Grajaú, nordeste do Pará e extremo oeste de Maranhão). **Revista Brasileira de Geociências** 35(2): 263-272.
- LIMA, M. G., 2008. **História do intemperismo na Província Borborema Oriental, nordeste do Brasil**: implicações paleoclimáticas e tectônicas: 1-251. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em: <<http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/1/7305>>. Acesso em: 18 fevereiro 2010.
- PEIXOTO, S. F. & A. M. C. HORBE, 2008. Bauxitas do nordeste do Amazonas. **Revista Brasileira de Geociências** 38(2): 406-422.
- PIDGEON, R. T., T. BRANDER & H. J. LIPPOLT, 2004. Late Miocene (U+Th)-⁴He ages of ferruginous nodules from lateritic duricrust, Darling Range, Western Australia. **Australian Journal of Earth Sciences** 51(6): 901-909.
- RANDALL, D. E., 1998. A new Jurassic-Recent apparent polar wander path for South America and a review of central Andean tectonic models. **Tectonophysics** 299(1-3): 49-74.
- ROZO, J. M. G., A. C. R. NOGUEIRA, A. M. C. HORBE & A. S. CARVALHO, 2005. Depósitos terciários da Bacia do Amazonas. In: A. M. C. HORBE & V. S. SOUZA (Eds.): **Contribuições à Geologia da Amazônia**: 4: 201-207. SBG-NO, Belém.
- RUFFET, G., C. INNOCENT, A. MICHARD, G. FÉRAUD, A. BEAUVAIS, D. NAHON & B. HAMELIN, 1996. A geochronological ⁴⁰Ar/³⁹Ar and ⁸⁷Rb/⁸⁷Sr study of K-Mn oxides from the weathering sequence of Azul, Brazil. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 60(12): 2219-2232.
- SHUSTER, D. L., P. M. VASCONCELOS, J. A. HEIM & K. A. FARLEY, 2005. Weathering geochronology by (U-Th)/He dating of goethite. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 69(3): 659-673.
- SILVA, C. L., 2005. **Análise da tectônica Cenozoica da região de Manaus e adjacências**: 1-282. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro.
- SMITH, R. E., 1996. Regolith research in support of mineral exploration in Australia. **Journal of Geochemical Exploration** 57(1-3): 159-173.
- TARDY, Y. & C. ROQUIN, 1998. **Dérive des continents paléoclimats et altérations tropicales**: 1-473. BRGM, Orléans.
- THÉVENIAUT, H. & PH. FREYSSINET, 1999. Paleomagnetism applied to lateritic profiles to assess saprolite and duricrust formation processes: the example of Mont Baduel profile (French Guiana). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 148(4): 209-231.
- THÉVENIAUT, H. & PH. FREYSSINET, 2002. Timing of lateritization on the Guiana Shield: synthesis of paleomagnetic results from French Guiana and Suriname. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 178(1-2): 91-117.
- VASCONCELOS, P. M., P. R. RENNE, G. H. BRIMHALL & T. A. BECKER, 1994. Direct dating of weathering phenomena by ⁴⁰Ar/³⁹Ar and K-Ar analysis of supergene K-Mn oxides. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 58(6): 1635-1665.

