

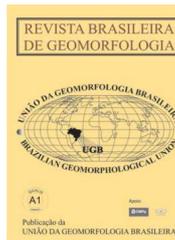


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 18, nº 2 (2017)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v18i2.1182>



TÉCNICA BOOLEANA APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE CROSTAS LATERÍTICAS NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

APPLIED BOOLEAN TECHNIQUE FOR THE IDENTIFICATION OF LATERITIC CRUSTS IN THE SW PORTION OF THE BRAZILIAN AMAZON

Isabel Leonor Iza Echeverria Herrera

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Rondônia
Br 364, Km 9,5 - sentido Acre, Porto Velho, Rondônia. CEP: 76.801-059. Brasil
Email: isaiza@gmail.com

Eliomar Pereira da Silva Filho

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Rondônia
Br 364, Km 9,5 - sentido Acre, Porto Velho, Rondônia. CEP: 76.801-059. Brasil
Email: eliomarfilho@uol.com.br

Edgar Romeo Herrera de Figueiredo Iza

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal. CEP: 70919-970. Brasil
Email: edgar.iza@cprm.gov.br

Adriana Maria Coimbra Horbe

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal. CEP: 70919-970. Brasil
Email: ahorbe@unb.br

Salem Leandro Moura dos Santos

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Rondônia
Br 364, Km 9,5 - sentido Acre, Porto Velho, Rondônia. CEP: 76.801-059. Brasil
Email: salemsantos@yahoo.com.br

Laura Nisinga Cabral

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Rondônia
Br 364, Km 9,5 - sentido Acre, Porto Velho, Rondônia. CEP: 76.801-059. Brasil
Email: laura_nisinga@yahoo.com.br

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
16/03/2017
Aceito (Accepted):
17/04/2017

Resumo:

A integração de dados altimétricos e gamaespectrométricos é uma ferramenta útil no mapeamento do regolito e identificação de crostas lateríticas, especialmente em áreas de difícil acesso, como é o caso da Amazônia. A área de estudo, localizada no sudoeste da Amazônia brasileira, tem dois padrões de ocorrência de crostas lateríticas. O primeiro está localizado na margem direita do rio Madeira e associado

Palavras-chave:
Gamaespectrometria;
Altimetria; Rondônia.

Keywords:
Gammaespectrometry;
Altimetry; Rondônia.

a platôs com altitudes entre 120 e 150 m e 180 e 204 m. O segundo, localizado na margem esquerda, ocorre em altitudes entre 80 e 110 m e está associado a relevo ondulado com desníveis locais inferiores a 5 m e não constituem platôs. A aplicação da técnica matemática booleana com dados multifonte contribuiu para a delimitação e hierarquização de áreas favoráveis para a ocorrência de crostas lateríticas. Os padrões de respostas radiométricos das crostas observados (altos valores de Th/K e U/K) permitiram a correlação de ocorrência de crostas da margem esquerda do rio Madeira com as da margem direita, possibilitando a delimitação cartográfica das crostas. Os resultados foram comparados com os atuais mapas de solo, geomorfológico e geológico, e propiciaram a confirmação da ocorrência das crostas associadas a latossolos, o refinamento cartográfico e a delimitação de áreas pouco favoráveis para a agricultura e potencialmente favoráveis ao fornecimento de material para construção civil (cascalho laterítico).

Abstract:

The integration of altimetric and gamaespectrometric data is a useful tool for mapping the regolith and the identification of lateritic crusts, especially in areas with difficult access, such as the Amazon. The area under study, located in the southwest portion of the Brazilian Amazon, has two patterns of lateritic crust occurrence. The first one is located on the right margin of the Madeira River and associated with plateaus with altitudes between 120 and 150 m and 180 and 204 m. The second one, located on the left margin of the river, occurs in altitudes between 80 and 110 m and is associated with undulated relief with altitude differences below 5 m and do not form plateaus. The application of mathematic techniques, such as the Boolean technique contributed with the delimitation and hierarquization of favorable areas for the occurrence of lateritic crusts and dismantling products. The radiometric response patterns of the crusts observed (high values of Th/K and U/K) allowed the correlation of the occurrence of lateritic crusts on the left margin of the Madeira river with those of the right margin, making possible the cartographic delimitation of the crusts. The results were compared with the current soil, geologic and geomorphologic maps, and facilitated the confirmation of the occurrence of lateritic crusts associated to oxisols, the cartographic refinement of the referred maps and the delimitation of areas less favorable for agriculture and potentially favorable for civil construction (lateritic gravel).

1. Introdução

As crostas lateríticas são materiais resultante da ação de intenso intemperismo químico em condições tropicais e, segundo Bigarella *et al.* (1996), os fenômenos de lateritização são importante para a geologia, pedologia e geomorfologia.

Para Penteadó (1978), as crostas lateríticas são de grande importância e têm afinidade com os processos modeladores da paisagem. A autora afirma que elas impedem a infiltração, reduzem a erosão mecânica e têm influência na conservação de antigas superfícies de erosão. Já para Büdel (1982), as crostas têm alta resistência à erosão e favorecem a inversão topográfica e a preservação de relevos antigos (paleosuperfícies).

A identificação e definição das áreas de ocorrência de crostas lateríticas pode ser feita diretamente com

trabalhos de campo, porém existem áreas de difícil acesso na Amazônia, seja pela limitada quantidade de estradas em extensas áreas ou pela presença de áreas especiais como terras indígenas e de proteção ambiental, e, em outros casos, as crostas estão cobertas por solos, dificultando a sua identificação. Assim, a integração de dados obtidos de forma remota, tais como o relevo (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e gamaespectrométricos, pode contribuir na sistematização das etapas pré, sin e pós campo e na identificação das características geoquímicas/geofísicas dos materiais regolíticos nestas áreas.

A aerogamaespectrometria é uma técnica de aquisição remota passiva que mede a concentração de potássio (K) e séries de radioisótopos de urânio (eU) e tório (eTh) em rochas e solos com profundidades de até 45 cm (GREGORY E HORWOOD, 1961; DICKSON

E SCOTT, 1997). A intensidade dos raios gama emitidos pela superfície depende da composição mineral da rocha ou regolito, natureza e tipo de intemperismo, heterogeneidade geológica, distribuição de solos alóctones ou autóctones, assim como da cobertura vegetal, umidade, etc. (WILFORD *et al.*, 1997; MINTY, 1997; DICKSON E SCOTT, 1997).

Nessa perspectiva, Wilford *et al.* (1997) utilizou dados gamaespectrométricos para a definição dos materiais regolíticos e sua associação com as formas de relevo e processos geomorfológicos. O autor afirma que a aerogamaespectrometria é bem compreendida quando relacionada a rochas, porém a resposta e distribuição de radioelementos em regolitos é menos conhecida. Em todo caso, o autor afirma que crostas lateríticas ferricretes desenvolvidos sobre *greenstones* são radiometricamente escurecidas em um diagrama ternário RGB (KThU). O referido autor mostra que rochas ácidas/félsicas têm altos valores de K, enquanto as rochas máficas têm baixos valores de K. O Th e o U, segundo Wilford *et al.* (1997), são encontrados em baixos teores em minerais primários, mas são mais comuns em minerais resistatos (resistentes ao intemperismo) tais como zircão e monazita.

Dickson e Scott (1997) afirmam que durante o processo de intemperismo, há lixiviação dos minerais alcalinos e alcalinos terrosos, implicando em um decaimento dos valores de potássio, e um enriquecimento de U e Th que tendem a formar óxidos e hidróxidos de ferro ou podem ser absorvidos por argilominerais, em outras palavras, há um significativo aumento nas razões Th/K e U/K.

Há diversos trabalhos que abordam a integração de dados multifonte (gamaespectrometria, magnetometria, geomorfologia, altimetria, solos, etc.) com o objetivo de estudar o regolito, identificar crostas lateríticas, destacar a intensidade do intemperismo ou mesmo caracterizar o solo de diferentes domínios geomorfológicos (DARNLEY E GRASY, 1971; TUCKER *et al.*, 1984; DUVAL, 1990; BURROUGH *et al.*, 1992; GRAHAM E BONHAM-CARTER, 1993; WILFORD *et al.*, 1997; DICKSON E SCOTT, 1997; MCKENZIE E RYAN, 1999; XIA *et al.*, 2007; ZHU *et al.* 2010; WILFORD, 2012; DENT *et al.*, 2013).

Xia *et al.* (2007) usaram dados de susceptibilidade magnética de diferentes domínios geomorfológicos para a caracterização de solo recente. Os resultados

discriminaram solos com características magnéticas distintas para o Oeste e Norte da China. Wilford (2012), por outro lado, usa dados de gamaespectrometria e altimetria para gerar uma equação matemática baseada em uma regressão múltipla para definir o índice de intensidade de intemperismo para Austrália. Os resultados propiciaram a discriminação de domínios de alto e baixo intemperismo.

No Brasil, a integração de dados multifonte tem sido cada vez mais aplicada contribuindo para estudos de diversas áreas, tais como geologia, geomorfologia, engenharia agrícola, entre outros (SOUZA, 1998; RUY *et al.*, 2006; DOS SANTOS *et al.*, 2008; CARRINO *et al.*, 2011; IZA *et al.*, 2016).

Souza (1998) utilizou dados gamaespectrométricos em uma área agricultável para correlacionar anomalias radiométricas com processos pedogenéticos e de fertilização fosfatada. A referida autora afirma que existe relação entre as anomalias de U e Th e latossolos roxos massivamente fertilizados com fosfatos.

Ruy *et al.* (2006) usaram eficientemente dados gamaespectrométricos, magnetométricos e imagens orbitais multiespectrais com o intuito de definir unidades litológicas para o refinamento do mapeamento geológico em uma área no sul do Cráton de São Francisco.

Por sua vez, Dos Santos *et al.* (2008) usaram dados gamaespectrométricos para a caracterização da fertilização de solos em uma região no noroeste do Estado do Rio de Janeiro. Os resultados obtidos indicaram uma perda dos radioelementos em relação às rochas fonte, e alegaram que a menor perda de potássio em relação aos outros elementos é associada ao suprimento deste elemento durante o processo de fertilização.

Carrino *et al.* (2011) utilizaram dados de gamaespectrometria e altimetria de uma área no sudoeste do Estado do Pará, e, por meio de estatística multivariada, identificaram platôs lateríticos associados a baixos valores de K e K/Th e altos valores de U/K, corroborando os dados obtidos por Dickson e Scott (1997) e Wilford *et al.* (1997).

Por outro lado, Iza *et al.* (2016) ao integrarem dados altimétricos e gamaespectrométricos delimitaram dois domínios lateríticos em intervalos altimétricos distintos: abaixo de 300 m e acima de 500 m associados a rochas-fonte distintas correlacionando-os

com superfícies de aplanamento.

Portanto, o uso de dados multifonte tem se mostrado uma ferramenta útil, especialmente quando apoiada por técnicas matemáticas e álgebra de mapas, no mapeamento do regolito, em estudos agrícolas, geomorfológicos e geológicos.

Desse modo, o objetivo deste trabalho é identificar e cartografar as principais áreas potenciais para a ocorrência de crostas lateríticas, aplicando a técnica booleana, por meio do método *index overlay* e álgebra de mapas, a dados altimétricos e gamaespectrométricos em uma área no sudoeste da Amazônia brasileira. Os resultados foram comparados com os mapas geomorfológico, de solos e geológico no intuito de validar os dados e sugerir refinamentos nas atuais cartografias. Essas informações, além de contribuir no estudo geomorfológico/geológico, poderão ser úteis na definição de áreas potenciais para a extração de cascalho laterítico, no estudo de áreas com limitações agrícolas e na compreensão da evolução paleoambiental da região.

2. Materiais e Métodos

O trabalho consistiu na integração e interpretação prévia dos dados altimétricos, geomorfológicos, pedológicos, geológicos e de aerogeofísica (gamaespectrometria). A base de dados altimétricos utilizada foi a do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 90 metros e recobrem toda a área de estudo.

Os dados gamaespectrométricos foram coletados pela FUGRO AIRBORNE SURVEYS para a CPRM no projeto denominado de “Rondônia Central – RO” (CPRM, 2010). Os principais produtos gerados a partir da aerogeofísica e utilizados neste trabalho foram as razões eU/K e eTh/K, no formato GRD, com células de 125 m. Esses produtos, em conjunto com o modelo digital do terreno (MDT – SRTM) foram integrados no processo seguinte que consistiu na modelagem por meio de álgebra de mapas. Os aspectos metodológicos e resultados apresentados por Iza *et. al.* (2016) são pioneiros na porção sudoeste do cráton amazônico (sudoeste da Amazônia brasileira) e foram utilizados como principal base metodológica para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Lógica Booleana

A lógica Booleana é um sistema matemático que cria regras ou expressões lógicas para selecionar, analisar e processar dados. Consiste em um sistema binário composto de “1” e “0”, onde “0” representa ‘falso’ e “1” representa ‘verdadeiro’. Bonham-Carter (1994) melhorou a técnica booleana por meio do método *index overlay* (MIO), o qual consiste na combinação de variáveis dando diferentes pesos a cada mapa de entrada, considerando o nível de importância de acordo com a hipótese avaliada. Assim, os dados de saída são classificados em valores de contagem apropriada para o mapeamento. O objetivo da técnica é produzir um mapa que mostre áreas hierarquizadas e distribuídas por cores de acordo com o nível de importância associado. Nesse trabalho, as áreas com maior nível de importância são aquelas associadas à maior probabilidade de ocorrência de crostas lateríticas.

Os mapas binários (0 e 1) de entrada foram gerados a partir das imagens das razões eTh/K, eU/K, assim como a imagem SRTM, identificando os intervalos altimétricos associados a crostas conforme observado em campo. As razões gamaespectrométricas supracitadas são indicativas de alto intemperismo e são frequentemente associadas a crostas lateríticas (BOYLE, 1982; DAUTH, 1997; CARRINO *et. al.*, 2011; WILFORD, 2012; IZA *et. al.*, 2016), motivo pelo qual foram consideradas no modelo matemático. Os valores mais altos (valores iguais ou maiores do que a média mais 1 vez o desvio padrão) de eTh/K e eU/K foram associados à maior probabilidade de ocorrência de crosta laterítica e, portanto, transformados em “1” e os valores mais baixos foram transformados em “0”, gerando novas imagens reclassificadas (0 e 1) para ambas as razões.

O procedimento com a imagem de elevação MDT foi diferente daquele usado nas imagens aerogeofísicas. Na margem direita do rio Madeira, foi usado o valor “1” para elevações maiores ou iguais do que 120 m, e “0” para as menores do que 120 m. Para a margem esquerda do rio, o valor “1” foi relacionado a altitudes entre 80 e 110 m, enquanto o valor “0” foi atribuído às altitudes menores do que 80 m e maiores do que 110 m. Esses intervalos de altitude foram determinados de acordo com os dados altimétricos verificados em campo.

Método *index overlay* (MIO)

No MIO, cada imagem (mapa) de entrada (MDT, eTh/K, eU/K) recebe um peso que depende da hipótese avaliada. Cada imagem é multiplicada pelo respectivo peso e depois somados, para finalmente serem normalizados pela soma dos pesos (Equação 1). O resultado final é representado pela variação de valores entre 0 e 1 (BONHAM-CARTER, 1994).

$$S = \frac{\sum_i^n W_i \text{class} (MAP_i)}{\sum_i^n W_i} \quad \text{Eq. 1}$$

onde S = score de saída ou classe, W_i = peso do i-ésimo mapa, class (MAP_i) representa o mapa de entrada da i-ésima variável, e n = número de variáveis.

Neste método foram usadas as razões Th/K e U/K, assim como o MDT, utilizando álgebra de mapas no ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). Os pesos utilizados foram 1, 2 e 4 (referentes a uma progressão geométrica de razão 2: $A_n = 2^{n-1}$) que permitiu discriminar visualmente conjuntos de variáveis em classes favoráveis ou desfavoráveis, assim como a individualização de cada variável ou suas respectivas combinações.

Para a margem direita do rio Madeira os pesos foram distribuídos seguindo a equação $(1 * eU/K + 2 * eTh/K + 4 * \text{relevo})/7$, considerando que o relevo tem maior influência neste domínio e é sustentado por crostas lateríticas. Para a margem esquerda a equação foi $(1 * eU/K + 2 * \text{relevo} + 4 * eTh/K)/7$, considerando que a razão gamaespectrométrica eTh/K, que representa geoquimicamente as crostas com topos planos pouco expressivos, tem maior importância. As classes finais variam entre 0 e 1 e indicam áreas com menor probabilidade (0) e maior probabilidade (1) de ocorrência de crostas lateríticas e seus produtos do desmantelamento.

2.2 Concordância do modelo

Para verificar o grau de concordância entre o modelo e os dados de campo, foi calculado o valor do coeficiente de Cohen kappa. Os dados de campo correspondem aos afloramentos visitados que constam de crostas lateríticas e materiais não lateríticos tanto para a margem esquerda quanto para a margem direita do rio Madeira, totalizando 100 locais.

A equação para o cálculo de kappa está definida como:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad \text{Eq. 2}$$

onde n é o número de amostras, x_{ii} é o valor na linha i e na coluna i, x_{i+} é a soma da linha i, x_{+i} é a soma da coluna i e c é o número de classes (COHEN, 1960).

Para a interpretação do valor kappa, considera-se, segundo Landis e Koch (1977), os seguintes intervalos: entre 0,8 e 1 concordância quase perfeita, entre 0,6 e 0,79 concordância substancial, entre 0,4 e 0,59 concordância moderada, entre 0,2 e 0,39 concordância fraca, entre 0,01 e 0,19 concordância pobre, e valores de kappa igual a 0 sem concordância.

A etapa final comparou os dados gerados com os mapas geológico, geomorfológico e de solos. Esse procedimento permitiu a análise dos dados gerados, a identificação das áreas com ocorrência de crostas lateríticas e, portanto, a delimitação de áreas de interesse para a extração de cascalho laterítico para construção civil e de áreas menos favoráveis para agricultura. A Figura 1 mostra o fluxograma com todos os procedimentos e respectivas etapas envolvidas no trabalho.

3. Contexto geológico e geomorfológico regional

A região norte do estado de Rondônia está localizada na porção sudoeste do cráton amazônico, mais especificamente na província Rondônia-Juruena que se estende desde o extremo oeste de Rondônia até o alto curso do rio Teles Pires a leste e é constituída pelos domínios Roosevelt-Juruena e Jamari (QUADROS E RIZZOTTO, 2007). Nos principais domínios há rochas graníticas Mesoproterozoicas (1,6 Ga), Neoproterozoicas (1 Ga), terraços fluviais, depósitos aluvionares e lacustres, coberturas detrito-lateríticas e coberturas sedimentares indiferenciadas. Destas unidades, em função do enfoque do trabalho, destaca-se a denominada coberturas detrito-lateríticas que compreende crostas lateríticas ferruginosas colunar/pisolítica-nodular e depósitos resultantes de seu desmantelamento que, frequentemente sustentam os platôs. Por vezes as crostas lateríticas estão sobrepostas por Latossolo (Figura 2).

O mapa geomorfológico de Rondônia (IBGE, 2013) destaca cinco unidades geomorfológicas: Planí-

cie Amazônica, Depressão do Ituxi – Jari, Depressão de Porto Velho, Depressão do Madeira – Ji-Paraná, Planaltos Residuais do Madeira – Ji-Paraná. A Depressão de Porto Velho 262Dt11 cobre a maior parte da área e contém os domínios mais significativos, tem

dissecação homogênea, relevo de topos tabulares com rampas suavemente inclinadas e pequenas elevações; e a 262Dt33, de dissecação tabular com densidade de drenagem média, coincide parcialmente com as áreas lateríticas identificadas neste trabalho.

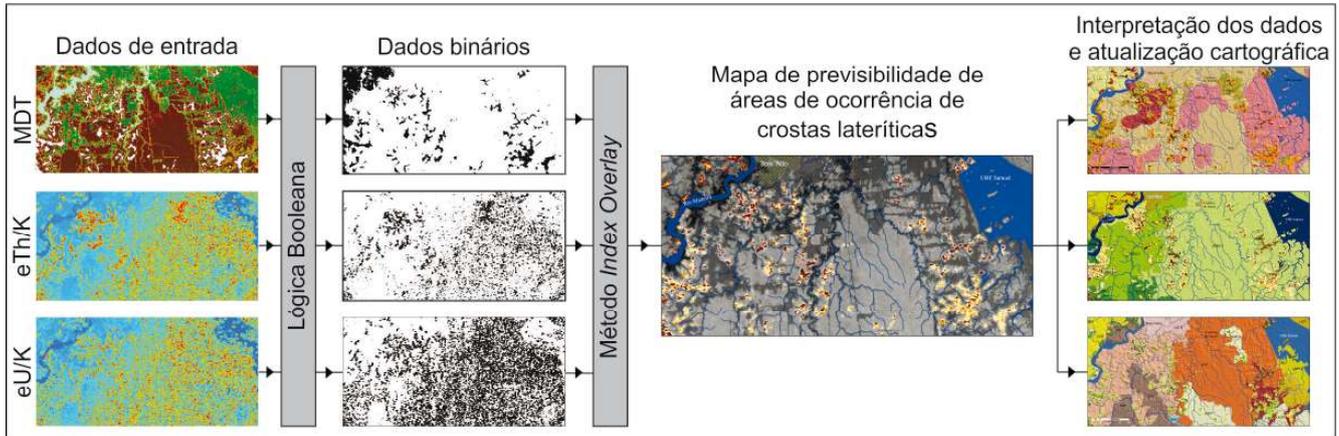


Figura 1 – Fluxograma destacando os principais procedimentos realizados nesta pesquisa.



Figura 2 – A) Aspecto do relevo em forma de platôs constituídos por crostas lateríticas. As setas em amarelo indicam platôs até 30 m de mais elevados que a planície de. B) Crosta laterítica com estrutura colunar. C) Horizonte dismantelado recoberto por solo rico em matéria orgânica.

4. Aspectos econômicos

Os primeiros usos das crostas lateríticas como materiais de construção incentivaram Buchanan a realizar descrições geológicas pela primeira vez, há 200 anos. Atualmente na engenharia civil as crostas têm sido utilizadas na construção de obras rodoviárias, barragens e até mesmo concreto (NOGUEIRA, 1985) devido à grande disponibilidade e baixo custo de extração (COSTA, 2007).

Segundo Nogueira (1985), essa aplicação depende das características da jazida, as melhores são aquelas que apresentam concreções com núcleos ferruginosos contínuos e resistentes. Apesar de serem aproveitadas como material para construção civil, as áreas com ocorrência de crostas lateríticas têm limitações para a agricultura devido à baixa fertilidade (NOGUEIRA, 1985; ALEVA, 1993; COSTA, 2007; CHANDRASEKARAN *et al.*, 2010). De acordo com Nogueira (1985), esse problema está diretamente relacionado ao clima, vegetação e às características dos perfis. Em condições de boa drenagem, silício, ferro e alumínio são concentrados formando as crostas lateríticas, enquanto Ca, Mg, Na e K são lixiviados, comprometendo a capacidade de troca catiônica, a retenção de água e, portanto, a fertilidade do solo (CHANDRASEKARAN *et al.*, 2010). A vegetação típica dos solos lateríticos é representada inicialmente por florestas, que proporcionam nutrientes e matéria orgânica ao solo, mas quando desmatada tende a formar extensas áreas degradadas (NOGUEIRA, 1985).

5. Resultados e Discussões

5.1 Aspectos altimétricos e gamaespectrométricos

Na margem direita do rio Madeira as análises de campo e de relevo preliminares indicaram diversas áreas preferencialmente situadas em dois intervalos altimétricos para a ocorrência de crostas lateríticas: entre 120 e 150 m e entre 180 e 204 m. Entretanto, na margem esquerda do rio Madeira as altitudes entre 80 e 110 m com relevo suavemente ondulado, não favoreceram a identificação de crostas lateríticas por meio da simples análise do relevo (HERRERA *et al.*, 2016a).

Herrera *et al.*, (2016b) fizeram a análise dos dados gamaespectrométricos e observaram dois padrões de respostas diferentes associados a crostas lateríticas. O primeiro com altos valores gamaespectrométricos e altitudes entre 120 e 150 m que sobressaem de uma

planície de altitudes menores que 120 m, associados principalmente a fontes graníticas da Formação Santo Antônio, próximo à região de Porto Velho. Essa análise corroborou, através da correlação das respostas gamaespectrométricas, a presença de crostas lateríticas na margem esquerda do rio Madeira. O segundo, associado a altitudes acima de 180 m e com resposta gamaespectrométrica dentro da média geral, apesar de apresentar valores localmente altos, na porção sudeste da área. Este segundo padrão de resposta aparece radiometricamente escurecido, sugerindo então a associação a rochas fonte do embasamento ou supracrustais, como constatado por Wilford *et al.* (1997).

5.2 Análise booleana

O modelo booleano (MIO) proporcionou a obtenção de 8 classes de favorabilidade para a ocorrência de crostas lateríticas e seus produtos de desmantelamento. Na margem direita do rio Madeira as áreas favoráveis representam 6,12 %. Estas áreas têm influência do relevo (peso 4) e das combinações das razões eU/K, eTh/K (pesos 5, 6 e 7) (Tabela 1). A aplicação da mesma equação na margem esquerda do rio Madeira gerou resultados inconclusivos, pois o relevo é *plano* a suavemente ondulado. Desse modo, optou-se por atribuir peso 4 à razão Th/K. Assim, neste domínio, as classes consideradas favoráveis têm influência principalmente da razão Th/K e de suas combinações com a razão eU/K e com o relevo (peso 5 referente à combinação de Th/K + U/K, peso 6 referente à combinação de Th/K+relevo e peso 7 referente à combinação de todas as variáveis) (Tabela 2). A reorganização dos pesos destacou 0,54% da área como favoráveis para a ocorrência de crostas lateríticas e seus produtos do desmantelamento em domínios com altitudes abaixo de 110 m (margem esquerda do rio Madeira). Desse modo, as regiões consideradas como favoráveis e extremamente favoráveis para a ocorrência de crostas lateríticas e seus produtos do desmantelamento, cobrem 278,4 km² e representam 6,6% da área de estudo (Tabela 1 e 2 e Figura 3).

Para a verificação da precisão do modelo em questão, foi calculado o coeficiente de Cohen kappa (k) usando a matriz de confusão gerada com os dados de campo comparados com o modelo previsional (Tabela 3). O valor de kappa foi de 0,63, tendo então uma concordância substancial entre o modelo previsional e os dados de campo.

Tabela 1: Classificação das classes obtidas no MIO (margem direita do rio Madeira)

Pesos	Classes MIO	Variável	Área km ²	Área Acum. km ²	Área %	Área % Acum.	Classes
0	0	Nenhuma	2.396,6	2.396,6	57,15	57,15	Desfavorável
1	0,14	eU/K	812,0	3.208,6	19,37	76,52	Desfavorável
2	0,29	eTh/K	18,2	3.226,8	0,43	76,95	Desfavorável
3	0,43	eU/K +eTh/K	483,4	3.710,2	11,53	88,48	Desfavorável
4	0,57	MDT	142,5	3.852,7	3,40	91,88	Favorável
5	0,71	MDT+eU/K	47,6	3.900,3	1,14	93,02	Favorável
6	0,86	MDT+eTh/K	7,4	3.907,8	0,18	93,19	Favorável
7	1,00	MDT+eU/K /K +eTh/K	58,5	3.966,3	1,40	94,59	Extremamente favorável

Tabela 2: Classificação das classes obtidas no MIO (margem esquerda do rio Madeira)

Pesos	Classes MIO	Variável	Área km ²	Área Acum. km ²	Área %	Área % Acum.	Classes
0	0	Nenhuma	45,4	45,4	1,08	1,08	Desfavorável
1	0,14	eU/K	1,0	46,3	0,02	1,10	Desfavorável
2	0,29	MDT	154,2	200,5	3,68	4,78	Desfavorável
3	0,43	MDT+eU/K	3,8	204,4	0,09	4,87	Desfavorável
4	0,57	eTh/K	1,2	205,5	0,03	4,90	Favorável
5	0,71	eTh/K +eU/K	5,6	211,2	0,13	5,04	Favorável
6	0,86	MDT+eTh/K	2,7	213,9	0,07	5,10	Favorável
7	1,00	MDT+eU/K +eTh/K	12,9	226,8	0,31	5,41	Extremamente favorável

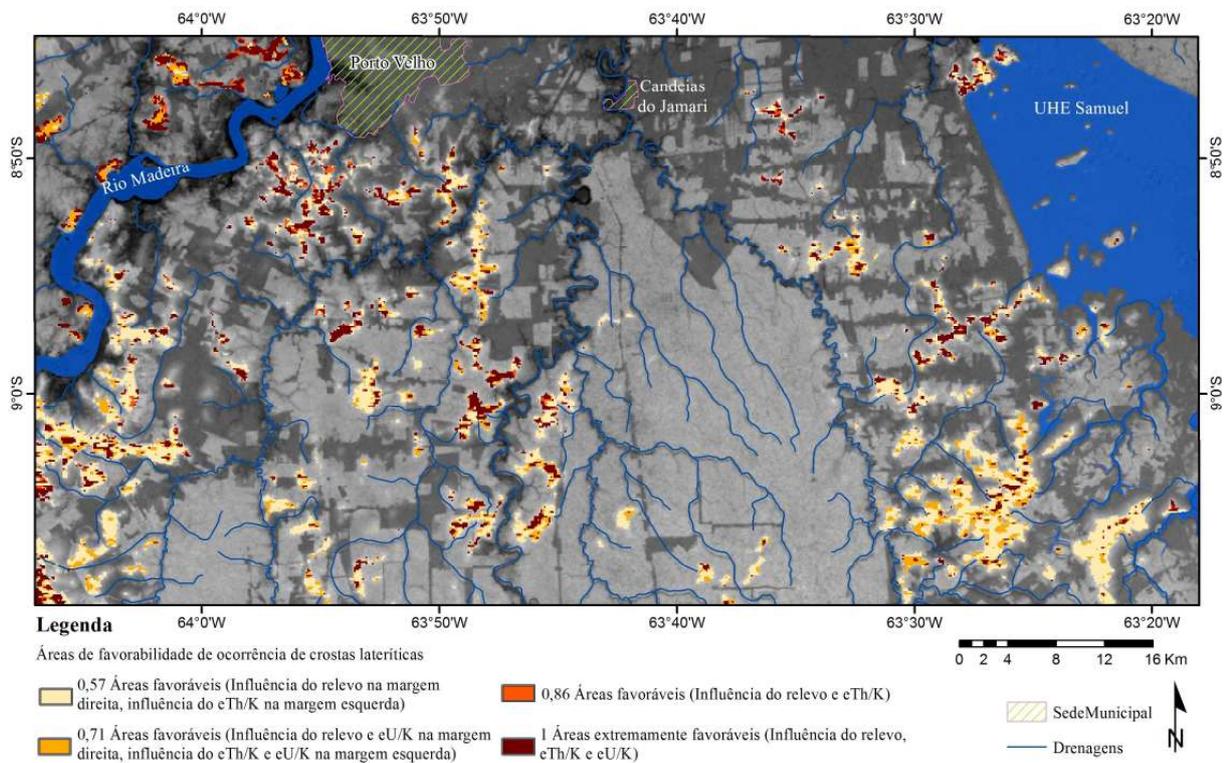


Figura 3 – Mapa de previsibilidade de ocorrência de crostas lateríticas e seus produtos do desmantelamento pelo método index overlay (MIO).

Tabela 3: Matriz de confusão para o cálculo de kappa.

	Produtos lateríticos	Produtos não lateríticos
Previsão no modelo como crostas lateríticas	31	3
Previsão no modelo como materiais não lateríticos	15	51

5.3 Considerações econômicas e análise cartográfica

Os resultados cartográficos apresentados são similares aos obtidos por Herrera *et al.*, (2016a), para a margem direita do Rio Madeira, entretanto, neste trabalho as áreas com probabilidade de ocorrência de crostas são hierarquizadas (menor e maior probabilidade de ocorrência). A análise gamaespectrométrica permitiu, portanto, a correlação das respostas radiométricas associadas a crostas lateríticas entre ambas as margens.

Herrera *et al.*, (2016a) faz uma sugestão de refinamento cartográfico nos mapas geomorfológicos e geológicos para a área de estudo, apenas para o lado direito do rio Madeira. Com os resultados obtidos neste trabalho sugerimos um refinamento nos referidos mapas para a margem esquerda do rio Madeira, baseado na delimitação das áreas lateríticas por meio da semelhança de padrões gamaespectrométricos observados.

As áreas delimitadas na Figura 3 devem ser consideradas como domínios prioritários no que diz respeito à disponibilidade de cascalho laterítico, pois além de terem localização próxima aos maiores centros consumidores (Porto Velho e Candeias do Jamari), têm fácil acesso e considerável volume disponível. Portanto, devem ser consideradas não apenas como potencial produtivo para a engenharia civil e prospecção mineral, mas também como áreas de baixa produtividade para a agricultura.

5.3.1 Refinamento pedológico

Horbe e Costa (1997, 1999, 2005) observaram uma relação direta entre as crostas lateríticas e o latossolo sobrejacente, usando argumentos texturais, de composição mineralógica e química. Os autores mostram que os latossolos são produtos de alteração derivados diretamente das crostas lateríticas. Neste trabalho, a sobreposição das áreas classificadas como favoráveis e extremamente favoráveis à ocorrência de crostas com o mapa de solos de Rondônia (2002), destaca a forte correlação entre a ocorrência de crostas

com Latossolos (Figura 4), e subordinadamente com o Cambissolo Distrófico (CD5).

Na margem direita do rio Madeira, houve uma sobreposição excelente com as áreas mapeadas como latossolos amarelos distróficos, bem drenados e francos; latossolos vermelho-amarelos distróficos, bem drenados e francos; e com latossolos vermelho-escuros eutróficos, bem drenados e argiloso a ligeiramente pedregosos no mapa de solos de Rondônia (2002). No entanto, para o lado esquerdo do rio Madeira, houve sobreposição parcial com o cambissolo distrófico. Assim, sugere-se a inclusão das áreas de crostas lateríticas identificadas na margem esquerda na unidade LAD17: Latossolos Amarelos Distróficos, 2-8% bem drenados e francos.

5.3.2 Refinamento geológico

Na superposição do mapa de previsibilidade com as crostas mapeadas como Nqdl-Coberturas Detrito-Lateríticas no mapa geológico de Quadros e Rizzotto (2007) (Figura 5), há boa sobreposição, fato que ratifica a eficiência do modelo. Há também sobreposição com as áreas cartografadas como coberturas sedimentares indiferenciadas. Nessas áreas não há evidências de processos sedimentares e sim de processos pedogenéticos (residuais) representados por extensa ocorrência de latossolos e de crostas lateríticas exatamente como previsto pelo modelo.

A Suíte Intrusiva Serra da Providência apresenta sobreposição parcial com o modelo, especialmente no sudeste e leste da área. Nesses domínios o relevo tem entre 120 e 204 m de altitude, e as crostas lateríticas sustentam a paisagem. Há, portanto, boa probabilidade de que a rocha fonte das crostas, nestas áreas, seja esta unidade geológica, entretanto, em alguns domínios com padrões gamaespectrométricos escurecidos, as rochas fontes podem estar associadas a outras unidades geológicas (máficas/ultramáficas e/ou supracrustais). Por outro lado, na margem esquerda do rio Madeira, as áreas coincidem parcialmente com a unidade Q1t – terraços fluviais, cujas altitudes variam entre 80 e 110 m.

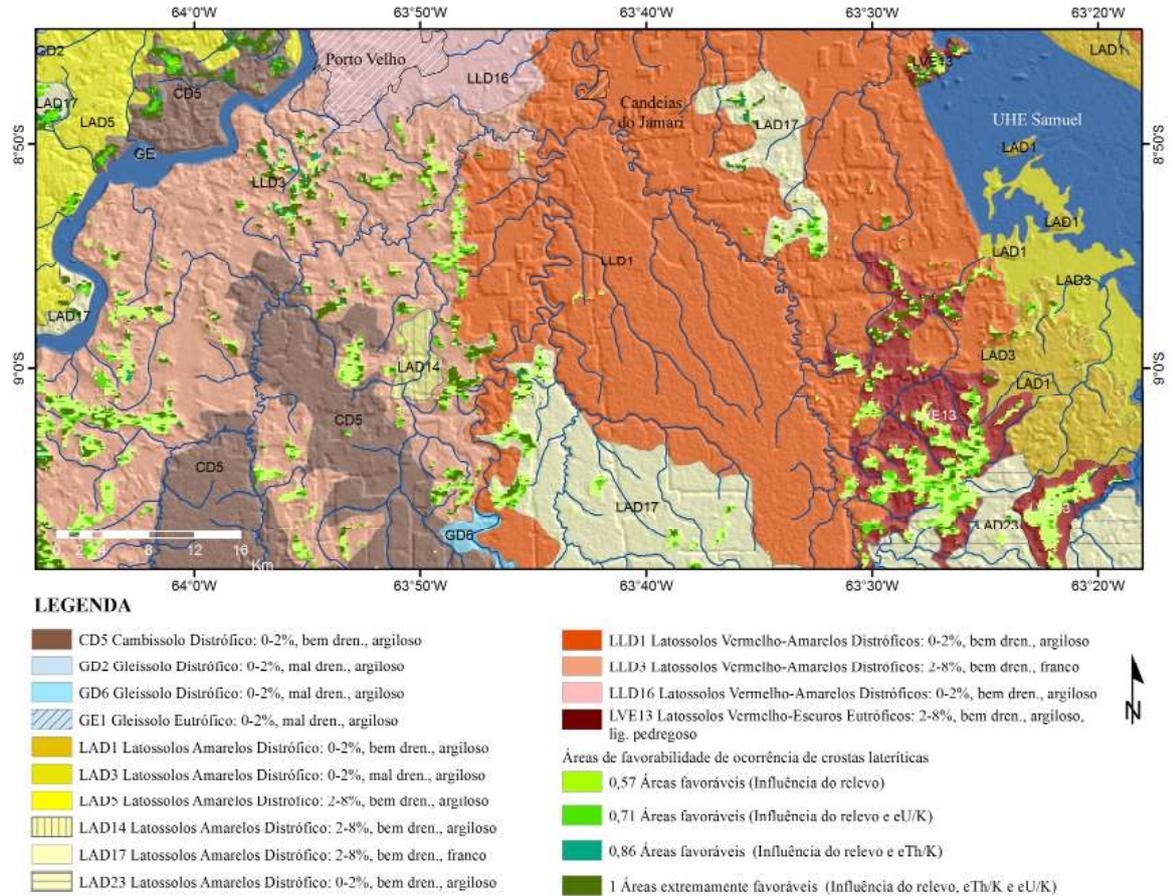


Figura 4 – Mapa de previsibilidade de ocorrência de crostas lateríticas (método Index Overlay) sobreposto ao mapa de solos de Rondônia (2002).

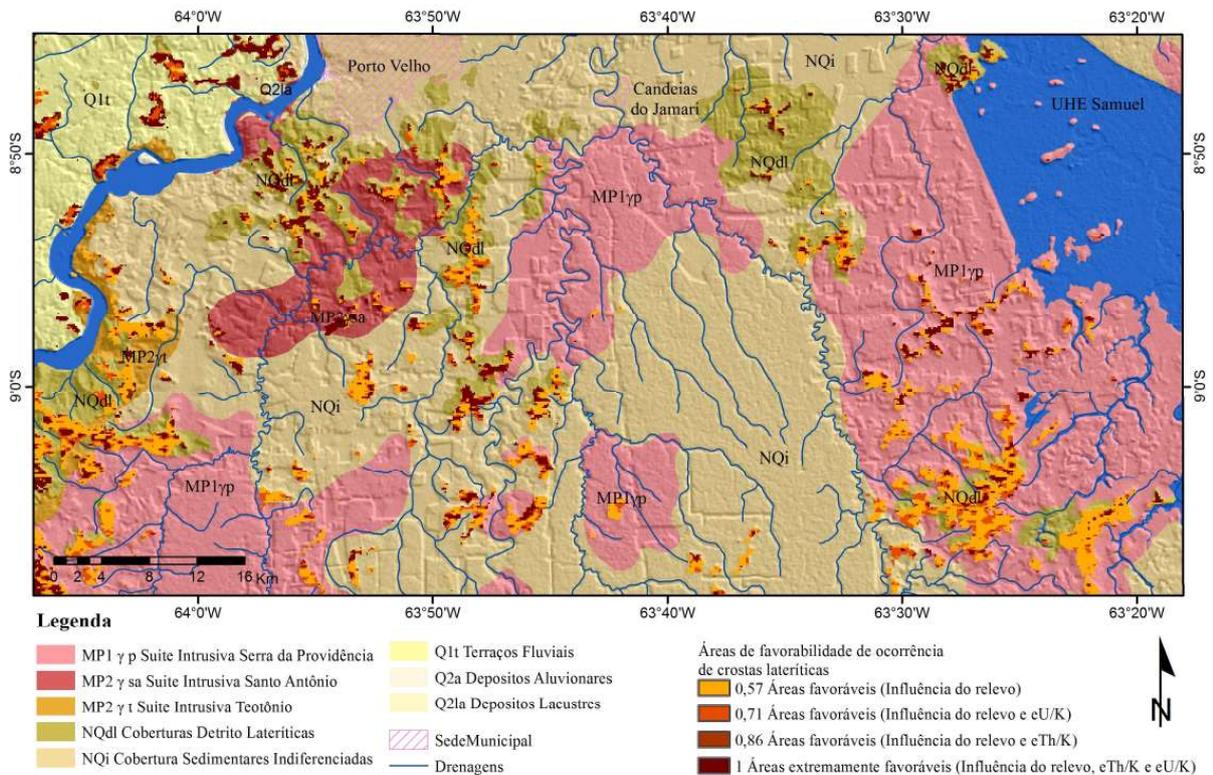


Figura 5 – Mapa de previsibilidade de ocorrência de crostas lateríticas (método Index Overlay) sobreposto ao mapa geológico de Quadros

Por fim, no mapa geológico houve uma excelente sobreposição com a unidade NQdl – coberturas detrito lateríticas, mapeadas por Quadros e Rizzotto (2007) para a margem direita, porém, na margem esquerda houve sobreposição parcial das áreas com a unidade mapeada como Q1t – terraços fluviais. Os dados observados em campo indicam a presença de crostas neste domínio, desse modo, sugere-se a inclusão destas áreas na unidade NQdl – coberturas detrito lateríticas.

5.3.3 Refinamento geomorfológico e outras considerações

Na sobreposição com o mapa geomorfológico publicado pelo IBGE (2013), as áreas classificadas como favoráveis e extremamente favoráveis coincidem cartograficamente com a unidade geomorfológica 262Dt33 que corresponde a dissecação homogênea com topos tabulares e densidade de drenagem média (Figura 6).

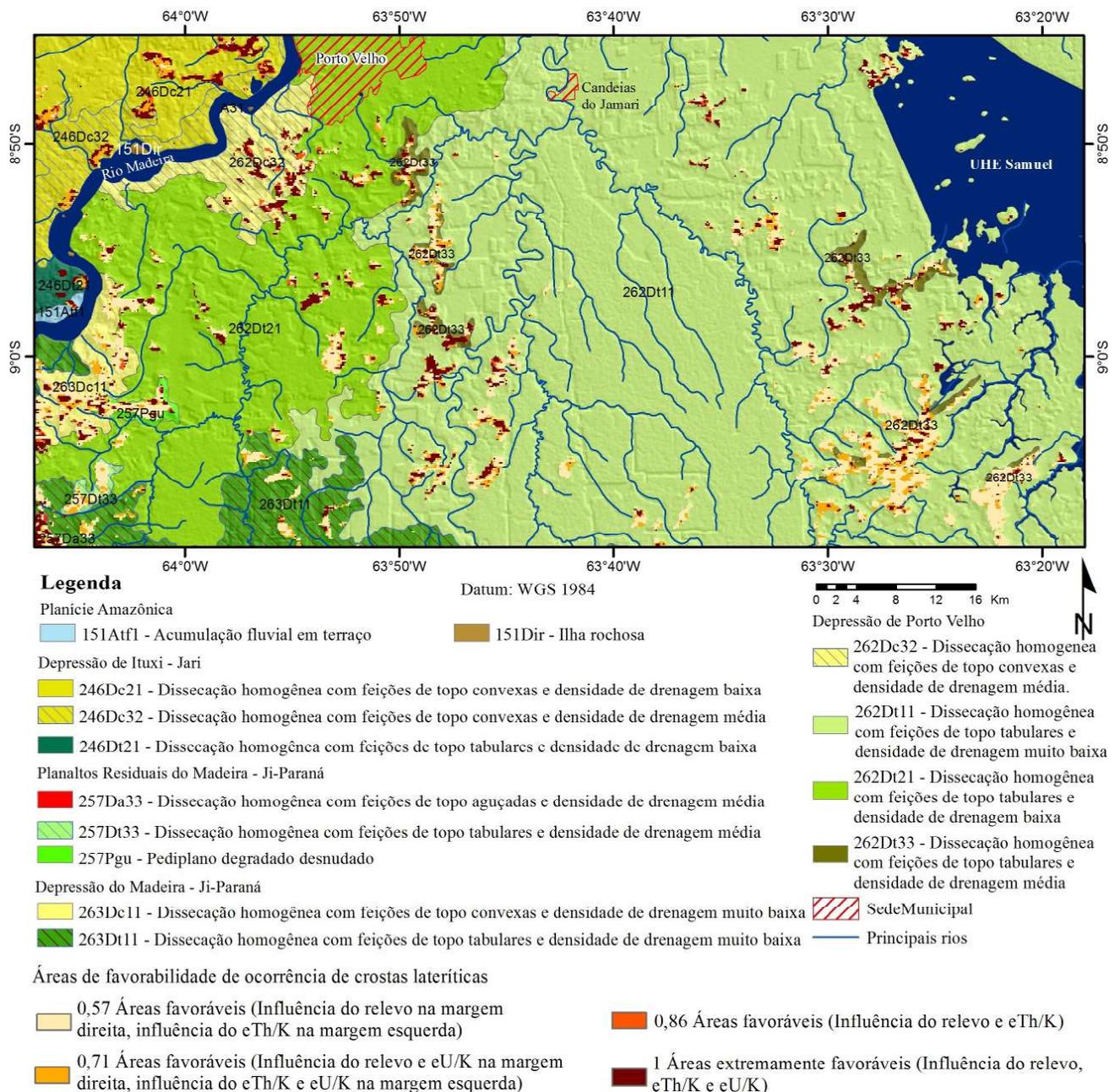


Figura 6 – Mapa de previsibilidade de ocorrência de crostas lateríticas (método Index Overlay) sobreposto ao mapa geomorfológico do IBGE (2013).

Guerra (1953) descreve as regiões morfológicas e sua correlação com as formas de relevo, e menciona as várias ocorrências de crostas lateríticas na região de Porto Velho e adjacências, contudo, não faz nenhuma associação das crostas com feições geomorfológicas. Por sua vez, os resultados de mapeamento geomorfológico apresentados por Melo *et al.* (1978) destacaram a existência Lateritas Hidromórficas na unidade morfológica chamada Planalto Rebaixado da Amazônia (Ocidental) onde encontra-se a área de estudo. Entretanto, os autores não fazem a associação das crostas lateríticas com platôs na margem direita do rio Madeira.

Por sua vez, Della Justina (1994) estudou a exploração de recursos minerais no município de Porto Velho, considerando os lateritos e aspectos econômicos e ambientais envolvidos. A autora registrou as principais frentes de lavra, e cartografou as principais ocorrências nas proximidades de Porto Velho, contudo, não faz referência à associação das crostas com a geomorfologia.

Nascimento *et al.* (2012) estudaram os materiais lateríticos que ocorrem na área de Porto Velho e adjacências no intuito de entender a sua natureza e sua relação com a evolução morfológica. Apesar de afirmar a ocorrência de crostas relacionada a platôs, a autora faz estudos em uma área restrita na cidade de Porto Velho.

Santos *et al.* (2012) fizeram o mapeamento geomorfológico da bacia do Igarapé Belmont nas proximidades de Porto Velho, na escala 1:25.000. Dos 10 tipos de relevo identificados, 3 têm relação com crostas lateríticas: i) Denudacional Estrutural Tabular com fraco entalhamento dos vales e pequena dimensão interfluvial, cuja superfície é sustentada por coberturas detrito-lateríticas; ii) Denudacional Estrutural Tabular com fraco entalhamento dos vales e média dimensão interfluvial, cuja superfície apresenta vertentes íngremes com formato côncavo e geralmente sustentadas por coberturas detrito-lateríticas imaturas; iii) Denudacional Tabular com muito fraco entalhamento dos vales e média dimensão interfluvial, cuja superfície é dissecada e plana, abrigando coberturas detrito-lateríticas em colinas de topo plano (platôs).

Os resultados obtidos neste trabalho expõem uma clara relação entre platôs e crostas lateríticas, além da relação com altos valores gamaespectrométricos (valores das razões Th/K e U/K acima da média mais uma vez o desvio padrão).

Os platôs citados por Nascimento (2012) representam parte daqueles registrados neste trabalho, porém a

autora não destaca a ocorrência de eventuais superfícies de aplanamento regionais. Apesar de Santos *et al.* (2012) realizarem mapeamento detalhado da área e identificar a presença de crostas lateríticas de forma restrita associadas a topos tabulares, os autores não identificaram o padrão regional de ocorrência das respectivas crostas, nem as eventuais superfícies de aplanamento associadas.

Desse modo, os resultados apresentados aqui ratificam a presença de crostas lateríticas em platôs, não apenas em regiões restritas próximas a Porto Velho, mas em extensão regional, tornando o método uma ferramenta robusta, inclusive abrindo perspectivas para a identificação de superfícies de aplanamento regional.

O mapa geomorfológico do Projeto Planaflores (RONDÔNIA, 2002), apresenta unidades geomorfológicas associadas a platôs, porém não inclui descrições de materiais residuais ferruginosos associados para a margem direita do rio Madeira (HERRERA *et al.*, 2016a). Para o lado esquerdo do rio Madeira, o referido mapa faz descrições de materiais ferruginosos, contudo, as crostas não foram totalmente cartografadas. Os resultados apresentados mostraram a presença de crostas lateríticas na margem esquerda do rio Madeira, dados que foram posteriormente constatados em campo. Sugere-se, portanto, a inclusão das áreas lateríticas identificadas neste trabalho na unidade D2210 complementando assim o refinamento feito por Herrera *et al.* (2016a).

No mapa geomorfológico do Estado de Rondônia publicado pelo IBGE (2013), na margem esquerda do rio Madeira, a unidade 246Dc21, onde há maior sobreposição de crostas lateríticas, está descrita como “Conjunto de formas de relevo de topos convexos, em geral esculpidas em rochas cristalinas e, eventualmente, também em sedimentos, às vezes denotando controle estrutural”. Esta área encontra-se localizada em um domínio residual (crostas lateríticas) e sedimentar (depósitos aluvionares, lacustres e terraços fluviais), sem evidências marcantes de topos tabulares como os observados na margem direita do rio Madeira. Portanto, sugere-se a criação da unidade 246Dc11 com a seguinte descrição: “Conjunto de formas de relevo de topos convexos, conformando feições de rampas suavemente inclinadas e lombas esculpidas em crostas lateríticas”.

6. Considerações Finais

A ocorrência de crostas lateríticas em pelo menos três níveis altimétricos (80 a 110 m, 120 a 150 m e

entre 180 a 204 m) deixa clara a necessidade estudos geocronológicos e de geologia estrutural com o objetivo de definir a existência de uma ou mais superfícies de aplanamento e detalhar a neotectônica da área. O fato é que os platôs ocupam aproximadamente 278,4 km², representam 6,6% da área de estudo, conformando uma importante feição geomorfológica ainda não totalmente cartografada e/ou significativamente subestimada.

Silveira *et al.* (2014) empregou técnicas de inferência espacial no mapeamento geomorfológico para a identificação de unidades de relevo. Os autores constatarem o potencial dos dados usados (SRTM) aliados a técnicas de geoprocessamento, para estabelecer critérios para a identificação e delimitação de feições geomorfológicas, normalmente feitas por julgamentos qualitativos. Segundo os autores, o uso de outras variáveis espaciais surge como desafio para estudos posteriores.

Iza *et al.* (2016) utilizaram dados de gamaespectrometria e altimetria para a identificação de crostas lateríticas no sul do Estado de Rondônia e delimitaram com êxito a presença de crostas lateríticas e latossolos em 2 domínios geomorfológicos principais. A área de estudo deste trabalho está localizada em um contexto geológico/geomorfológico/geofísico similar à área estudada por Iza *et al.* (2016), e a técnica apresentada gerou resultados igualmente satisfatórios na identificação de áreas favoráveis para a ocorrência de crostas lateríticas e seus produtos de desmantelamento. Portanto, os dados multifonte utilizados neste trabalho mostraram-se úteis e eficientes no apoio à cartografia geomorfológica e geológica, como constatado nos resultados supracitados.

Em termos gerais, a integração dos dados gamaespectrométricos e altimétricos permitiu a ampliação do conhecimento sobre das crostas lateríticas e mostrou-se extremamente útil na sua cartografia. A técnica booleana (método *index overlay*) mostrou-se eficiente na discriminação de crostas. A gamaespectrometria além de ratificar os atuais mapas existentes, contribui na ampliação da cartografia das crostas e, conseqüentemente, no refinamento dos mapas geomorfológico, pedológico e geológico da área, com destaque à margem esquerda do rio Madeira. Desse modo, a técnica booleana deve ser considerada uma ferramenta complementar em áreas sem restrições para o estudo no campo e uma ferramenta imprescindível em áreas onde há restrições ou dificuldade de acesso em campo e sua versatilidade permite a adaptação de acordo com as características do terreno. Por último, a técnica também é útil para o

planejamento urbano, na delimitação de áreas potenciais para a extração de cascalho laterítico usado para a construção civil e na definição de áreas desfavoráveis para a agricultura. Por outro lado, os dados aerogeofísicos podem ser utilizados com outros fins, tal como a geração do índice do intemperismo para uma avaliação geral do comportamento intempérico, além de apoio para o próprio mapa do regolito e no desenvolvimento de outros índices dedicados ao estudo do regolito.

Agradecimentos

Agradecemos ao DIGEOF da CPRM pela concessão dos dados. Agradecemos a CAPES pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor do trabalho. E.P. Filho e Horbe agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa.

Referências Bibliográficas

- ALEVA, G. J. J. **The CORLAT handbook**: Guidelines and background information for the description of laterite profiles for interdisciplinary use. Brussels: International Soil Reference and Information Centre, 1993.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E.; HERMANN, M. L. P.; MENDONÇA, M.; SANTOS, G. F.; CARVALHO, S. M. C.; COITINHO, J. B. L. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. Vol. II. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996.
- BONHAM-CARTER, G. F. Tools for map analysis: multiple maps. In: _____. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS** Oxford: Pergamon, 1994. Cap 9. p. 267-337.
- BOYLE, R.W. **Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- BÜDEL, J. **Climatic geomorphology**. Princeton: Princeton University Press, 1982.
- BURROUGH, P. A; MACMILLAN, R.A; DEURSEN, W.V. Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observation and topography. **Journal of Soil Science**, v. 43, p. 193-210, 1992. (DOI: 10.1111/j.1365-2389.1992.tb00129.x).
- CARRINO, T. A.; SILVA, A.M.; BOTELHO, N.F.; SILVA, A.A.C. Discriminação de áreas de espesso regolito do leste do Estado do Amazonas usando estatística multivariada, algoritmo

- hiperespectral e modelagem de dados espaciais. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 155-172, 2011. (DOI: 10.1590/S0102-261X2011000100011).
- CHANDRASEKARAN, B.; ANNADURAI, K.; SOMASUNDARAM, E. **A textbook of Agronomy**. New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers, 2010.
- COHEN, J. A coefficient of agreement of nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**. 20 (1), 37-46, 1960. (DOI: 10.1177/001316446002000104).
- COSTA, M. L. da. Introdução ao intemperismo laterítico e à laterização. In: LICHT, O. A. B.; MELLO, C. S. B. de; SILVA, C. R. da (Eds.). **Prospecção geoquímica: depósitos minerais metálicos, não metálicos, óleo e gás**. Rio de Janeiro: SBGq; CPRM, 2007.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Aerogeofísico Rondônia Central: relatório final de levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos**. Rio de Janeiro: Lasa Engenharia e Prospecções; Prospectores Aerolevantamentos e Sistemas, 27 v. 1, 2010.
- DARNLEY, A. G.; GRASTY, R. L. Mapping from the air by gamma-ray spectrometry. **Canadian Institute of Mining Metallurgy**, v. 11, p. 485-500, 1971.
- DAUTH, C. Airbornemagnetic, radiometric and satellite imagery for regolith mapping in the Yilgarn Craton of Western Australia. **Exploration Geophysics**, 28, 199-203, 1997. (DOI: 10.1071/EG997199).
- DELLA JUSTINA, E.E., **Retrato Social da Exploração de Recursos Minerais no Município de Porto Velho-Rondônia: O caso dos lateritos**. 1994. Monografia (Especialização em Geografia) – Amazônia, questão Regional e Ambiental, Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 1994.
- DENT, D. L.; MACMILLAN, R.A.; MAYR, T.L.; CHAPMAN, W.K.; BERCH, S.M. Use of airborne gamma radiometrics to infer soil properties for a forested area in British Columbia, Canada. **Journal of Ecosystems and Management**, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2013.
- DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. **Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 187-200, 1997.
- DOS SANTOS, A.C.L.; MENEZES, P.T.L.; DO NASCIMENTO, C.T.C. Gamaespectrometria aplicada em solo agrícola no noroeste do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geofísica**, Vol. 26(2), p.181-194, 2008. (DOI: 10.1590/S0102-261X2008000200006).
- DUVAL, J. S. Modern aerial gamma-ray spectrometry and regional potassium map of the conterminous United States. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 39, p. 249-253, 1990. (DOI: 10.1016/0375-6742(90)90076-M).
- GRAHAM, D. F; BONHAM-CARTER, G. F. Airborne radiometric data: a tool for reconnaissance geological mapping using a GIS. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 58, p. 1243-1249, 1993.
- GREGORY A. F.; HORWOOD J. L. **A laboratory study of gamma-ray spectra at the surface of rocks**. Ottawa: Department of Energy, Mines and Resources, (Mines Branch Research Report, 85). 1961.
- GUERRA, A.T. Observações geográficas sobre o Território do Guaporé. **Revista Brasileira de Geografia**, 2, 183-302, 1953.
- HERRERA, I.L.I.E; IZA, E.R.H.F; FILHO, E.P.S.; HORBE, A.M.C. Cartografia Geológica e Geomorfológica de Crostas Lateríticas na porção Norte do Estado de Rondônia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, no.1, p. 177-190, 2016a (DOI: 10.20502/rbg.v17i1.880).
- HERRERA, I.L.I.E.; SILVA FILHO, E.P.; IZA, E.R.H.F.; HORBE, A.M.C. Utilização de dados gamaespectrométricos no apoio à cartografia geomorfológica. In: SIMPOSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 11, 15-21 set. 2016, Maringá. **Anais...** Maringá: UGB, 2016b. <http://sinageo.org.br/2016/trabalhos/6/6-42-1551.html>
- HORBE A.M.C. COSTA M.L. Solos gerados a partir do intemperismo de crostas lateríticas silicoferruginosas. **Acta Amazônica**, 27(4):241-256. 1997.
- HORBE, A.M.C.; COSTA, M.L. Geochemical evolution of a lateritic Sn,Zr,Th,Nb,Y,REE- bearing ore body derived from a poganite: the case os Pitinga, Amazonas-Brasil. **Journal of Geochemical Exploration**. v. 66. p. 339-351, 1999. (DOI: /10.1016/S0375-6742(99)00002-3).
- HORBE, A.M.C.; COSTA, M.L. Lateritic crusts and related soils in eastern Brazilian Amazonia, **Geoderma**, v. 126. p. 225-239, 2005. (DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.09.011).
- IBGE. **Mapas interativos**, IBGE 2013. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_interativos/> Acessado em: 20 de junho de 2015.
- IZA, E.R.H.F; HORBE, A.M.C; SILVA, A.M. Boolean and fuzzy methods for identifying lateritic regoliths in the Brazilian Amazon using gamma-ray spectrometric and

- topographic data. **Geoderma**, 269, 27-38, 2016. (DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.01.037).
- LANDIS, J.R., KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics** 33 (1), 159–174, 1977. (DOI: 10.2307/2529310).
- MCKENZIE, N. J.; RYAN, P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v. 89, p. 67-94, 1999.
- MELO, D.P.; COSTA, R.C.R.; E NATALI FILHO, T. - Geomorfologia da folha SC.20-Porto Velho. In: BRASIL. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SC.20-Porto Velho. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral (Levantamento de Recursos Naturais, 16), 1978.
- MINTY, B. R. S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. **Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 39-50, 1997.
- NASCIMENTO, T.C.N., MANIESI, V., ADAMY, A., NOGUEIRA, A., A natureza e aplicação dos materiais lateríticos na área urbana e entorno de Porto Velho. **Revista geonorte**, Edição Especial, V.2, N.4, p.11 – 19, 2012.
- NOGUEIRA, J. 1985. **Lateritas**. **Boletim Técnico**. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 46 p.
- PENTEADO, M. M^a. **Fundamentos de geomorfologia**. 2^a ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1978.
- QUADROS, M.L. do E.S.; RIZZOTTO, G.J. (Orgs.). **Geologia e recursos minerais do Estado de Rondônia**: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado de Rondônia-escala 1:1.000.000. Porto Velho: CPRM. 116 p. Programa Geologia do Brasil-PGB. 2007.
- RONDONIA, Secretaria de Estado do Planejamento. **Plano agroflorestal e Pecuário de Rondônia** – PLANAFLORO (bando de dados geográfico). Porto Velho, 2002. Disponível em: <<http://www.sedam.ro.gov.br/index.php/component/content/article/109-cogeo/168-acervo-tecnico>>. Acessado em 20 de junho de 2015.
- RUY, A.C.; SILVA, A.M.; TOLEDO, C.L.B.; SOUZA FILHO, C.R. Uso de dados aerogeofísicos de alta densidade para mapeamento geológico em terrenos altamente intemperizados: O estudo de caso da região de Cláudio, porção sul do cráton São Francisco. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n.4, p 535-546, 2006. (DOI: 10.1590/S0102-261X2006000400007).
- SANTOS, S.L.N.; DELLA-JUSTINA, E.E.; FERREIRA, M.M. Mapeamento geomorfológico da bacia do Igarapé Belmont, Porto Velho – Rondônia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n.3, p.255-266, 2012.
- SILVEIRA, R.M.P.; DA SILVEIRA, C.T.; OKA-FIORI, C. Emprego de técnicas de inferência espacial para identificação de unidades de relevo apoiado em atributos topográficos e árvore de decisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.15, n.1, p.87-101, 2014.
- SOUZA JL. 1998. **Anomalias aerogamaespectrométricas (K, U e Th) da Quadrícula de Araras (SP) e suas relações com processos pedogenéticos e fertilizantes fosfatados**. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Geologia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1998.
- TUCKER, C. J.; HOLBEN, B.N.; GOFF, T.E. Intensive forest clearing in Rondonia, Brazil, as detected by satellite remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 15, p. 255-261, 1984. (DOI: 10.1016/0034-4257(84)90035-X).
- WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P.N.; CRAIG, M.A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. **Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 201-216, 1997.
- WILFORD, J. A weathering intensive index for the Australian continent using airborne gamma-ray spectrometry and digital terrain analysis. **Geoderma**, v. 183-184, p. 124-142, 2012. (DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.12.022).
- XIA D.; JIN M.; LIU X.; CHEN F.; MA J.; ZHAO H. WANG X.; WEI H. A preliminary study on the magnetic signatures of modern soil in Central Asia. **Frontiers of Earth Science in China**, v.1, n. 3; 275-283, 2007. (DOI: 10.1007/s11707-007-0034-1).
- ZHU A-XING.; YANG, L.; LI, B.; QIN, C-Z.; PEI, T.; LIU, B. Construction of membership functions for predictive soil mapping under fuzzy logic. **Geoderma**, v. 155, n. 3-4, p. 164-174, 2010. (DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.05.024.3).