



**Utilização de Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto para  
Discriminação das Rochas Fosfatadas da Região de Coromandel, Minas Gerais, Brasil**  
Use of Object-Based Supervised Classification for  
Discrimination of Phosphate Rocks in the Coromandel Region, Minas Gerais, Brazil

Lucas Santos Batista Teles; José Eloi Guimarães Campos;  
Tati de Almeida; Rejane Ennes Cicerelli & Elder Yokoyama

*Universidade de Brasília, Instituto de Geociências,  
Campus Darcy Ribeiro - Asa Norte, Caixa Postal 4465, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil.*  
E-mails: [lsbteles@gmail.com](mailto:lsbteles@gmail.com); [eloi@unb.br](mailto:eloi@unb.br); [tati\\_almeida@unb.br](mailto:tati_almeida@unb.br); [rejane\\_ig@unb.br](mailto:rejane_ig@unb.br); [elder.yokoyama@gmail.com](mailto:elder.yokoyama@gmail.com)  
Recebido em: 10/05/2019 Aprovado em: 21/08/2019  
DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2020\\_1\\_300\\_310](http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_300_310)

## Resumo

Devido ao desenvolvimento das grandes províncias agrícolas, a necessidade humana por insumos fosfatados vem apresentando um crescimento exponencial, que estimula a criação e o desenvolvimento de novas ferramentas que auxiliem na identificação e prospecção de alvos exploratórios. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo propor o desenvolvimento metodológico e a aplicação da técnica de Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto para identificação das rochas fosfatadas aflorantes nas proximidades do município de Coromandel (MG). Para tal finalidade, os dados de entrada utilizados na classificação foram o Modelo Digital de Elevação (ALOS/PALSAR - 12.5m) e mapas temáticos gamaespectrométricos quantitativos relativos às concentrações dos radioelementos Urânio e Tório em ppm, que resultou em um mapa binário com as classes Unidade Fosfatada e Unidade não Fosfatada. O resultado final obtido foi comparado com dados de campo e apresentou uma excelente qualidade (82%) segundo o coeficiente Kappa.

**Palavras-chave:** Classificação Supervisionada; Fosfato Sedimentar; Sensoriamento Remoto.

## Abstract

Due to the development of large agricultural provinces, the human need for phosphated inputs has been growing exponentially, stimulating the creation and development of new tools to help identify and prospect new exploration targets. The objective of this work is to propose a methodological development and application of the Object-Based Supervised Classification technique to identify the outcrops of phosphated rocks near to the municipality of Coromandel, Minas Gerais, Brazil. For this purpose, the input data used in the classification were the Digital Elevation Model (ALOS / PALSAR - 12.5m) and quantitative gamma spectrometric thematic maps related to the concentrations of the Uranium and Thorium radioelements in ppm, which resulted in a binary map capable of differentiating two main units in the study area: The Phosphated Unit and the Unphosphated Unit. The obtained result was compared with the filed data and showed an excellent quality (82%) by the coefficient Kappa means.

**Keywords:** Supervised Classification; Sedimentary Phosphate; Remote Sensing.

## 1 Introdução

O fosfato é muito utilizado no Brasil, devido à sua importância econômica na indústria de fertilizantes. No entanto, o país ainda apresenta forte dependência externa desse insumo, já que a extração de rochas fosfáticas não acompanha o crescimento da indústria, provocando uma supervalorização de custo para esse setor de relevante importância econômica (Fonseca & Silva, 2014). Atualmente, cerca de 80% da produção brasileira de fosfato é de origem ígnea, associada a complexos alcalino-carbonatíticos, geralmente situados ao longo do azimute 125° (Souza, 2001) e o potencial dos depósitos sedimentares, associados às bacias proterozoicas, carece de estudos mais específicos para avaliar a sua real potencialidade no cenário de produção nacional.

Dentre os depósitos fosfáticos sedimentares já reconhecidos, destacam-se os inseridos na Faixa de Dobramentos Brasília, hospedados em rochas das Formações Sete Lagoas (Dardenne *et al.*, 1986; Monteiro, 2009) e Serra da Saudade (Chaves *et al.*, 1981; Dardenne *et al.*, 1986; Lima *et al.*, 2007) do Grupo Bambuí e das Formações Retiro e Rocinha (Rocha Araújo *et al.*, 1992; Nogueira, 1993; Dardenne *et al.*, 1997; Oliveira, 2011; Sanches, 2012; Marques *et al.*, 2015; Sanches *et al.*, 2016) do Grupo Vazante. A ocorrência da Formação Retiro, base do Grupo Vazante, foi estudada inicialmente, e quase exclusivamente, por Dardenne (2000). Assim, tendo em vista o potencial metalogenético e a escassez de estudos geológicos, essa área foi selecionada para a realização do presente trabalho (Figura 1).

Com essa crescente necessidade de investigação e descoberta de novas áreas de exploração, na última década, a utilização de dados geofísicos de gamaespectrorradiometria apresentou resultados promissores na delimitação de alvos exploratórios (Kahn *et al.*, 1998; Sousa & Ferreira, 2005; Fianco *et al.*, 2014), sendo que uma característica marcante dos depósitos de fosfato é sua fácil associação com elementos traços como selênio, molibdênio, zinco, cobre, cromo, elementos terras raras, e em especial o urânio e o tório (Jarvis *et al.*, 1994). A correlação do urânio com os fosfatos se dá pela substituição do elemento P pelo U no sítio do ânion, principalmente nos depósitos de origem sedimentar. Os valores médios da concentração de U em fosforitos variam de 50 a 200 ppm sendo que nas fácies mais ricas em matéria orgânica, esses valores podem atingir até 3000

ppm (Baturin & Kochenov, 2001). Por outro lado, a presença de tório nessas rochas é mais discreta, porém valores de 0,5 a 8,6 ppm foram relatados por Monteiro (2009) em fosforitos e rochas fosfatadas sedimentares da base do Grupo Bambuí.

Mais recentemente, o uso de imagens óticas multiespectrais e termais de sensoriamento remoto e de avançadas técnicas de processamento de imagens vêm sendo aplicadas sistematicamente para prospecção regional de rochas fosfatadas (Vitorello *et al.*, 1993; Da Cruz *et al.*, 2011; Teixeira, 2012; Da Costa, 2017). No entanto, a presença de minerais de óxido e hidróxido de ferro, argilominerais autigênicos e a cobertura vegetal dificultam, em certo grau, a discriminação de rochas fosfatadas e a identificação de novos alvos utilizando essa tecnologia (Teixeira, 2012). Em adição a essas novas tecnologias, outro vetor de importante aplicação na exploração desses depósitos decorre da correlação entre as rochas fosfatadas e a geomorfologia, sendo que Youssef (1965) e Oliveira (1970) relacionam as ocorrências a formas de relevo bem definidas.

Dessa forma, as características físicas da maior parte dos depósitos fosfáticos sedimentares brasileiros estão diretamente relacionadas com os aspectos geomorfológicos locais. Geralmente as concentrações de rochas fosfatadas ocorrem na forma de morrotes com encostas suaves e topos arredondados que são o resultado da forte ação de processos intempéricos e erosivos (Oliveira, 1970).

Nesse sentido, o presente trabalho objetivou desenvolver uma metodologia utilizando-se dados de Modelo Digital de Elevação (MDE), gamaespectrorradiometria e processamento digital de imagens com base na análise de atributos espaciais/espectrais de forma e textura (Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto) visando a confecção de um mapa binário que discrimine as áreas com ocorrência de rochas fosfatadas no município de Coromandel (MG).

## 2 Localização e Geologia da Área

A área de estudo situa-se no oeste do estado de Minas Gerais, mais precisamente no município de Coromandel (MG), a cerca de 430 km de Brasília e está inserida no contexto geológico da porção meridional da Faixa de Dobramentos Brasília (Figura 1).

Dois conjuntos de rochas com ampla distribuição na Faixa Brasília estão presentes dentro dos limites da área, incluindo os Grupos Canastra e Vazante.

O Grupo Canastra, definido inicialmente como Formação Canastra (Barbosa, 1955) foi elevado a condição de grupo pelo mesmo autor no início da década de 70 (Barbosa, 1970). É constituído por um espesso pacote de rochas metassedimentares pelíticas a psamíticas com associações de níveis carbonáticos, depositadas em um megaciclo regressivo (Freitas Silva & Dardenne, 1994).

Segundo Dardenne (2000) a estratigrafia do Grupo Canastra inclui as formações Serra do Landim, Paracatu, Serra da Urucânia e Serra da Batalha;

sendo a Formação Paracatu subdivida nos membros Morro do Ouro e Serra da Anta. Na área de estudo, a ocorrência do Grupo Canastra está restrita à borda leste (Figura 1), sendo que apenas afloram sericita filitos do Membro Serra da Anta e quartzitos finos micáceos da Formação Serra da Batalha, que são responsáveis pela sustentação de formas de relevo mais proeminentes, onde predominam morfologias escarpadas (Figura 2A).

O Grupo Vazante, inicialmente denominado de Formação Vazante (Dardenne, 1978) foi elevado à condição de grupo por Dardenne *et al.* (1998). É uma sucessão pelito-carbonática depositada em uma plataforma marinha rasa durante um ciclo regressivo (Dardenne, 1981) no contexto geológico de uma

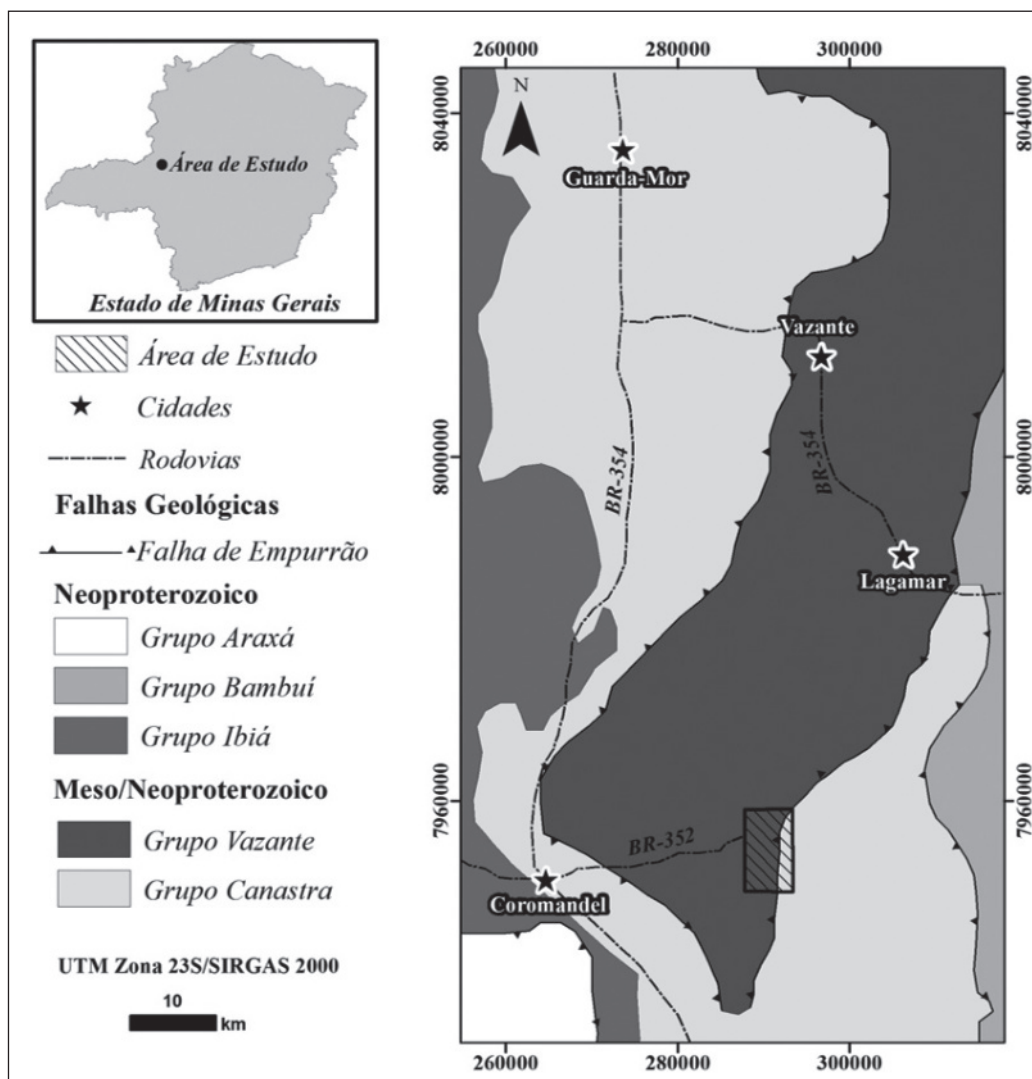


Figura 1 Mapa de localização e contexto geológico regional da área de estudo, elaborado na escala de 1:600.000. Importante notar que o acesso à área é realizado pelas BR-354 e BR-352, após a cidade de Coromandel.

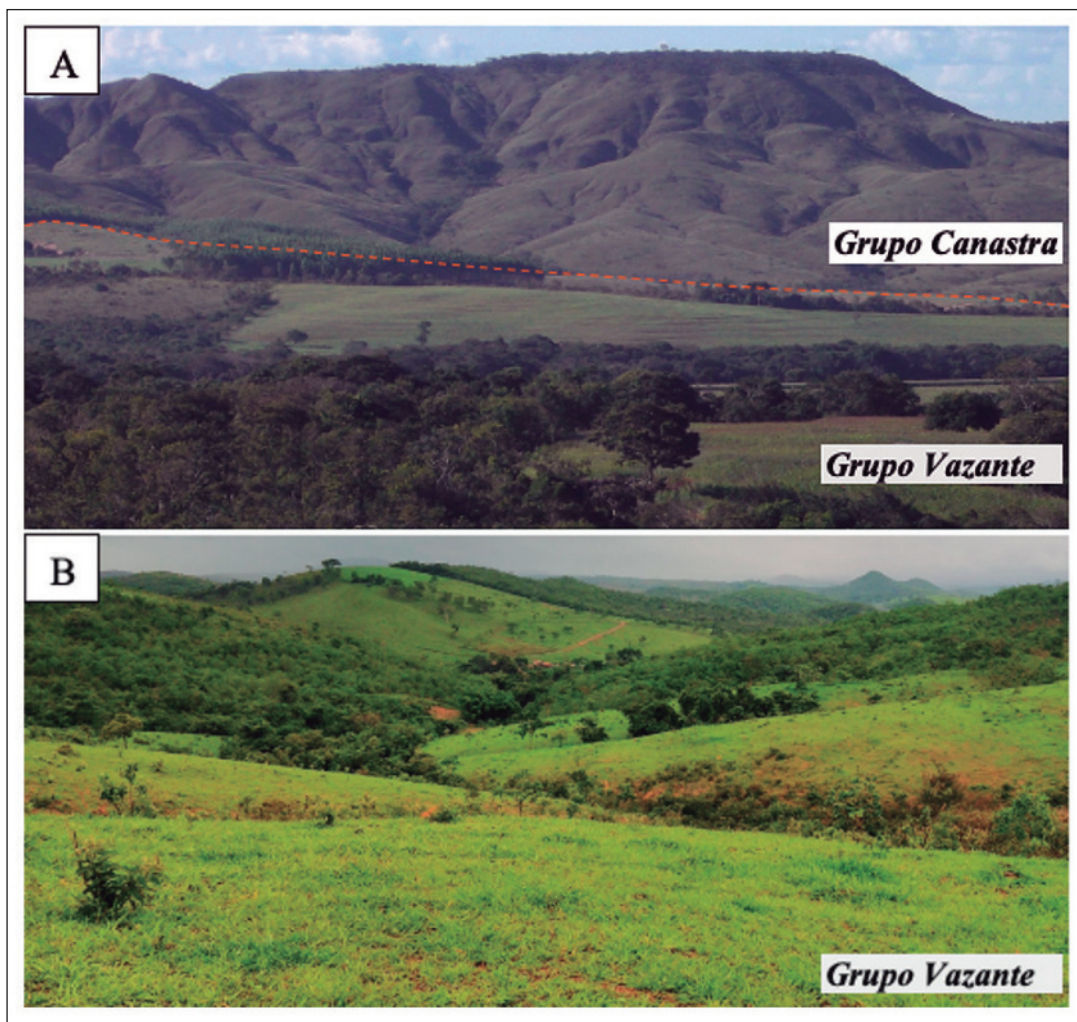


Figura 2 (A) Fotografia da porção E da área de estudo, mostrando a clara diferença geomorfológica entre os Grupos Vazante (Abaixo da linha pontilhada) e Canastra (Acima da linha pontilhada) (B) Fotografia da porção central da área de estudo, mostrando a dominância do relevo de morros e morrotes onde afloram as rochas da Formação Retiro.

bacia de margem passiva (Fuck *et al.*, 1994 e Pimentel *et al.*, 2001), que apresenta grande interesse econômico devido a sua variedade de depósitos minerais (zinco, chumbo, fosfato, argilas e rochas carbonáticas).

Segundo Dardenne (2000), o Grupo Vazante é subdividido em sete unidades formalizadas como formações (da base para o topo): Retiro, Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcário e Serra da Lapa. No entanto, apenas a Formação Retiro está presente na área de estudo.

A Formação Retiro é definida a partir de uma associação com ampla predominância de pelitos ora laminados, ora estratificados em camadas centimétricas, com intercalações de níveis métricos de quart-

zitos esbranquiçados e metadiamicritos polimíticos matriz-suportados que gradam a porções de metarenitos conglomeráticos também polimíticos (Figura 3A). Os seixos desses metadiamicritos/metarenitos conglomeráticos são de natureza variada incluindo siltitos, folhelhos, quartzitos facetados com estruturas do tipo “iron flat” e estrias de arrasto, granitos, tonalitos, dolomitos e calcários. Em contato direto, imediatamente acima desses diamictitos, encontram-se os metassiltitos fosfatados, fosforitos laminados (Figura 3B) e fosforitos brechados (Figura 3C) que compreendem as mineralizações de fosfato da região de Coromandel (MG) (Dardenne, 2000). A exata localização, em mapa, dessas amostras da figura 3 está representada na figura 5.

Em termos geomorfológicos, a porção da área na qual dominam as rochas da Formação Retiro

ocorrem formas de relevo caracterizadas por morros e morrotes de vertentes suavizadas (Figura 2B), sendo que não são raras regiões de platô.

### 3 Metodologia

#### 3.1 Dados de Sensoriamento Remoto

Para o entendimento da fisiografia e compartimentação geomorfológica da área de estudo foram obtidas imagens do sensor RapidEye (<http://geocatalogo.mma.gov.br/>) de 5 metros de resolução e Modelo Digital de Elevação obtido a partir do satélite PALSAR ALP268546810 (Alaska Satellite Facility). O subproduto do sensor PALSAR, *Hi-res Terrain Corrected*, possui resolução espacial de 12,5 metros e precisão vertical compatível com a escala 1:25.000 (Igarachi, 2001). As imagens ópticas permitiram a individualização das zonas homólogas da área utilizando a metodologia de análise de padrões de drenagem proposta por Soares & Pio Fiori (1976), enquanto o MDE discriminou as unidades geomorfológicas a partir da metodologia de Neto (2015).

#### 3.2 Dados de Gamaespectrometria

Em consequência da associação entre as rochas fosfatadas e os radioelementos, os levanta-

mentos de gamaespectrometria tornam-se uma das formas mais eficientes de se localizar a ocorrência de depósitos dessa natureza (Ashfahani, 2002). No caso do trabalho em específico, os dados utilizados foram provenientes do aerolevantamento realizado pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG/ Lasa Engenharia e Prospecção S.A), sendo que a região de pesquisa encontra-se inclusa no polígono da área 01 do Programa 2001. Este aerolevantamento foi realizado na direção N30W com espaçamento de 250 metros e com linhas de controle que tiveram direção N60E e espaçamento de 2500 metros.

Para a confecção dos mapas quantitativos relativos aos radioelementos, o banco de dados gamaespectrométricos foi transformado em um dado vetorial (estrutura de pontos) e exportado para o software ArcGis 10.3, onde foram gerados 3 mapas temáticos com resolução radiométrica de 32 bits, relativos às variações quantitativas de potássio (K) em porcentagem, e de tório (Th) e urânio (U) em ppm. Esses mapas temáticos foram confeccionados a partir da interpolação dos canais relativos às contagens dos 3 radioelementos do gamaespectrômetro, por meio do interpolador vizinho mais próximo, no qual o algoritmo utiliza-se do método *Triangular Irregular Network* (TIN) para a identificação de pontos ad-

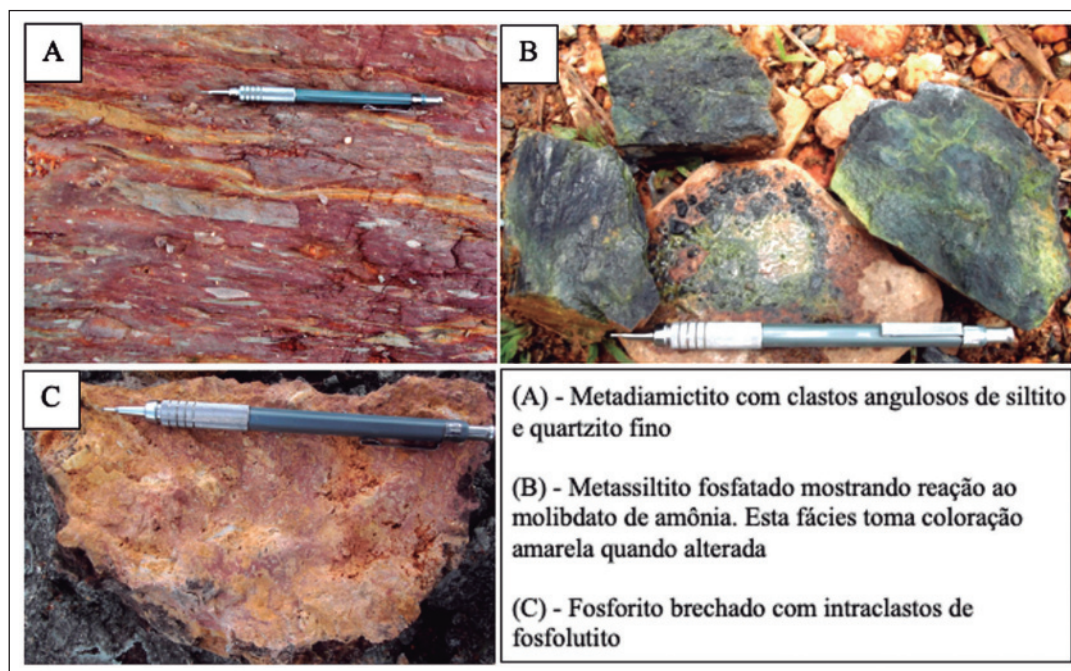


Figura 3 Fotografias de amostras macroscópicas das principais litologias da Formação Retiro. Em campo, nota-se a intrínseca relação entre os metassiltitos fosfatados e fosforitos (B e C) com os metadiamicritos (A), sendo que na maior parte da área, essas rochas da unidade fosfatada ocorrem em contato direto com os metadiamicritos.

jacentes e determina a influência ou o peso de cada ponto no modelo a partir de polígonos de Thiessen (Maune *et al.*, 2001) resultando em superfícies mais homogêneas, mesmo com distribuição errática de dados (Galvanin & Dal Poz, 2013).

### 3.3 Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto

Após a preparação dos dados de entrada, foi realizada a Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto. A classificação foi executada pela ferramenta *Example-Based Feature Extraction* do software *Envi 5.4*, no qual o Modelo Digital de Elevação (ALOS) assumiu a função de dado de entrada principal e as bandas relativas ao tório (Th) e urânio (U), de dados auxiliares, que aumentam a acurácia e precisão da classificação (Lawrence, 2001). Para a criação das amostras de treinamento, a imagem foi segmentada com o algoritmo *Edge* com nível de escala, que ressalta ao máximo as bordas das feições sem segmentá-las, igual à 10 e configuração de fusão, que agrega os elementos menores aos maiores, com o algoritmo *Full Lambda Schedule* (FLS) com o valor igual a 10 e tamanho Kernel, que seria a estimativa geográfica dos padrões, igual a 3.

Após a segmentação, na etapa de seleção dos atributos, os parâmetros utilizados foram os de *default* do software, sendo que dessa maneira, todos os aspectos texturais, espectrais e espaciais das regiões de treinamento foram considerados na classificação.

Por fim, foi selecionado o algoritmo de classificação *Support Vector Machine* (SVM) que apresentou maior robustez no processamento. Esse algoritmo é baseado na solução de um problema quadrático dependente dos vetores de treinamento escolhidos e dos parâmetros selecionados (Vapnik, 1995). Subsequente à etapa de parametrização foram selecionadas as amostras de treinamento em duas classes distintas: Unidade Fosfatada e a Unidade não Fosfatada. Para a Unidade Fosfatada foi selecionado um total de 267 amostras, escolhidas com base nas regiões que apresentavam as mais altas concentrações de U e Th e morfologias com formas mais arredondadas. Por outro lado, a Unidade não Fosfatada contou com a escolha de 372 amostras, que representavam os locais com as concentrações mais

baixas desses elementos. Em função das dimensões da área de estudo, o número de 639 amostras de treinamento é considerado adequado e suficiente.

### 3.4 Validação do Resultado

A validação do resultado obtido a partir da metodologia explicitada consistiu na comparação do produto da classificação supervisionada com a verdade terrestre por meio do Coeficiente Kappa (Lan-dis & Koch, 1977). A verdade terrestre foi definida a partir de 39 pontos de campo, distribuídos aleatoriamente e que não foram selecionados como amostras de treinamento do classificador. Dos 39 pontos de campo, foram descritos 16 afloramentos de fosforitos e metassiltitos fosfatados (F) e 23 afloramentos de metadiamicititos e metapelitos não fosfatados (NF). Esses 16 afloramentos descritos como rochas fosfatadas e indicados na figura 5 pelos pontos de cor verde, foram identificadas em campo a partir das suas características mineralógicas, estruturais e texturais além da sua reação ao de molibdato de amônio e análises de difração de Raios-X para a confirmação da existência de assembleia mineral fosfática.

Para a geração dos difratogramas de Raio-X tanto da fração argila como rocha total, aplicou-se a rotina de análises do Laboratório de Raios-X da Universidade de Brasília que conta com um difratômetro Rigaku - Ultima IV. Para a fração argila, as amostras selecionadas foram pulverizadas manualmente em panela de ágata e separados cerca de 7 gramas por amostra, que foram diluídas em 150 mL de água destilada e centrifugadas a 750 RPM por 7 minutos. Após essa primeira fase, o sobrenadante foi reservado em um tubo limpo e novamente centrifugado a 3000 RPM por 30 minutos, resultando na decantação de todo material argiloso, utilizado para a confecção das laminas de fração argila, glicolada e aquecida. No caso da análise de rocha total, a amostra pulverizada foi diretamente inserida no sulco da lâmina específica para tal procedimento.

## 4 Resultados e Discussões

A compartimentação topográfica construída pelo Modelo Digital de Elevação representa um importante dado de entrada no processo de Classifi-

cação Supervisionada, e a extração sistemática das feições utilizando o método de Soares & Pio Fiori (1976) nas imagens de alta resolução permitiu a individualização de 4 zonas homólogas orientadas preferencialmente na direção NNE (Figura 4), que mesmo baseadas principalmente na forma e padrão de drenagem, acabaram definindo com êxito os principais conjuntos de unidades de relevo da área de estudo.

Quando comparadas as Zonas Homólogas 1 e 2 (Z.H 1 e Z.H 2) é possível notar que as mesmas possuem Unidades de Relevo similares, predominantemente compostas por relevos de morros, morros com vertentes suavizadas e raros platôs (Figura 2B). No entanto, a Zona Homóloga 1 (Z.H 1) possui uma média densidade de drenagem com padrões retilíneos e média angularidade, enquanto a Zona Homóloga 2 (Z.H 2) é caracterizada pela baixa densidade de drenagem com padrões curvos e baixa angularidade.

De forma análoga, as Zonas Homólogas 3 e 4 (Z.H 3 e Z.H 4) também apresentam Unidades

de Relevo semelhantes, porém diferentes padrões de drenagem. Em ambas as zonas, nota-se que a geomorfologia é basicamente composta por áreas de platô sustentadas por relevos escarpados (Figura 2A). Entretanto, na Zona Homóloga 4 (Z.H 4), a rede de drenagem assume uma forma radial que contrasta com a forma retilínea e assimétrica da Zona Homóloga 3 (Z.H 3).

Tendo em vista as características das zonas homólogas, a Unidade Fosfatada da região de Coromandel ocorre intrinsecamente associada à Zona Homóloga 2 (Z.H 2), onde os aspectos de forma e densidade de drenagem, assim como a predominância de morros com vertentes suavizadas são geologicamente controladas pela presença de corpos de metadiamicritos e quartzitos finos circundados por metassiltitos fosfatados e fosforitos, sendo assim, todas as etapas de classificação supervisionada foram focadas nessa porção da área de estudo.

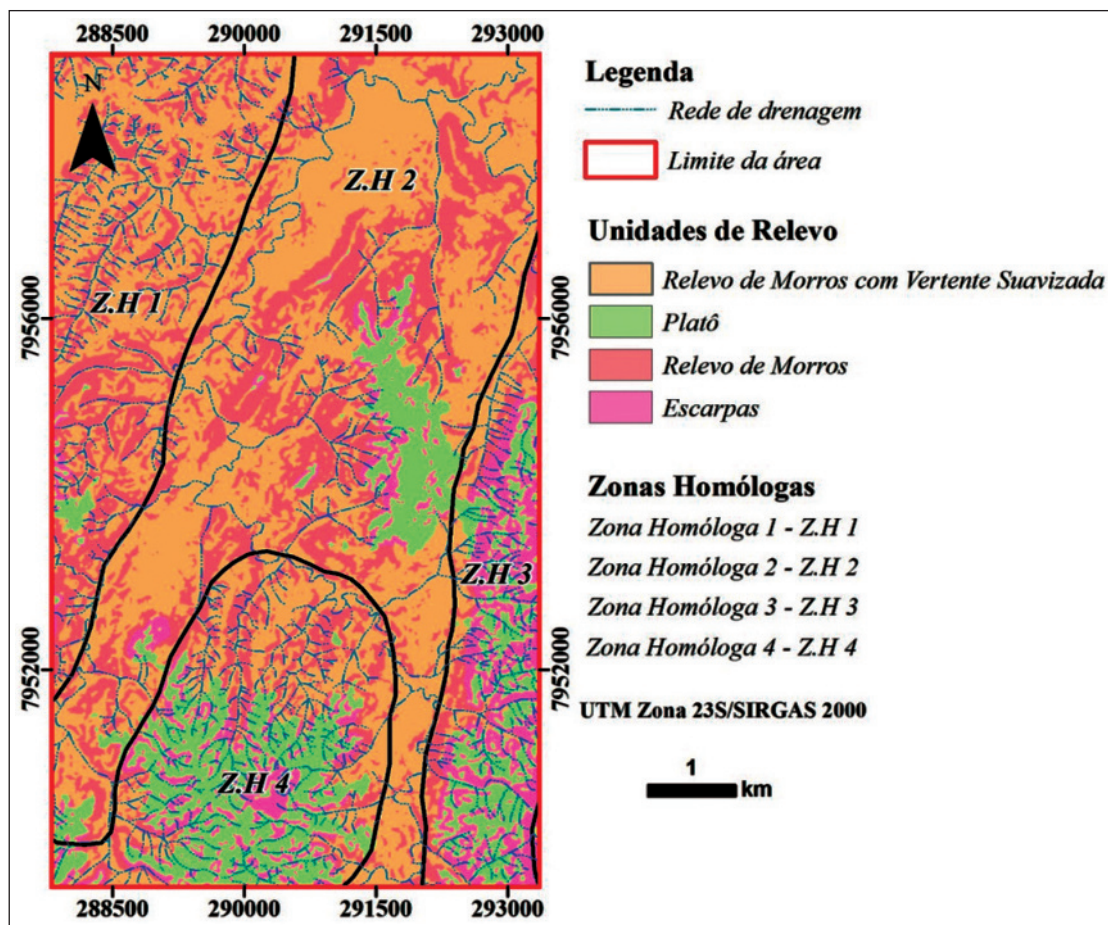


Figura 4 Mapa de compartimentação geomorfológica da área de estudo, elaborado na escala de 1:60.000, mostrando as Zonas Homólogas definidas a partir da análise de densidade de drenagem de Soares & Pio Fiori (1976).

Após a etapa de estudo fisiográfico e definição da principal região mineralizada, foram realizados os processamentos relativos à Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto. Observou-se que apesar da relação existente entre Unidade Fosfatada e a Zona Homóloga 2 (Z.H 2), foi necessária a inclusão de dados de gamaespectrometria para garantir a eficiência do classificador. Os dados auxiliares foram incorporados na tentativa de minimizar as inconsistências oriundas da escala das imagens do Modelo Digital de Elevação, que mesmo sendo imagens de alta resolução, as formas de relevo mais arredondadas, geradas a partir do intemperismo das rochas fosfatadas acabam sendo mascaradas e não identificadas pelo algoritmo classificador. Outro fator importante decorre de que mesmo as rochas fosfatadas estarem associadas aos relevos arredondados, algumas ocorrências também podem estar relacionadas a outros padrões geomorfológicos, o que também gera maior dificuldade para o classificador de definir zonas similares.

Sendo assim, a partir da utilização dos dados de gamaespectrometria, o algoritmo classificador passou a trabalhar com novos planos de informação (tório-Th e urânio-U). Devido ao grande recobrimento da área de estudo por rochas metapelíticas, que possuem alta resposta no canal do potássio (K), os locais onde ocorrem as rochas fosfatadas destacam-se pela resposta ao tório e urânio, devido a alta correlação entre esses tipos litológicos e esses radioelementos, como descrito por (Baturin & Kochenov, 2001).

O resultado obtido após os processamentos e etapas descritas na metodologia mostrou-se adequado aos objetivos do trabalho. As ocorrências de rocha fosfatada na região de Coromandel (MG) foram discriminadas pela Classificação Supervisionada e apresentaram boa correlação com os dados observados em campo. O produto final da classificação mostra que a ocorrência da Unidade Fosfatada se exhibe na forma de zonas descontínuas, de limites bem demarcados e direção NE-SW que perfazem aproximadamente 20% (11 km<sup>2</sup>) da área de estudo (Figura 5).

O excelente rendimento da classificação quando utilizada a associação entre os dados de to-

pografia e gamaespectrometria pode ser explicada pela capacidade do algoritmo do tipo SVM (Support Vector Machine) em discriminar adequadamente as unidades fosfatadas no processo de segmentação. Esse processo permitiu selecionar elementos amostrais representativos da classe de informação de interesse. A Figura 5 mostra o resultado por meio de um mapa binário com a identificação presença das rochas da Unidade Fosfatada e Unidade não Fosfatada. Os pontos identificados em mapa com a cor verde são aqueles nos quais as amostras de campo apresentaram resultados positivos tanto a reação ao molibdato de amônia, quanto a presença de minerais de fosfato nas análises de difratometria de Raio-X.

Para demonstrar a qualidade da classificação, foi gerada uma matriz de confusão e calculado o índice Kappa. Dos 39 pontos de campo observados, 32 se encaixaram nas suas respectivas classes de classificação, resultando em um coeficiente Kappa com valor igual a 0.82 e correlação perfeita com a verdade terrestre, segundo a tabela de Landis & Koch (1977). É importante notar que os pontos relativos à Unidade não Fosfatada que foram classificadas como fosfatada, e que compreendem a maior parte dos 7 pontos destoantes ocorrem justamente nas regiões de contato entre as duas classes, mostrando novamente a robustez da classificação obtida.

Os pontos da Unidade não Fosfatada que foram classificados como pertencentes à Unidade Fosfatada podem ainda estar atribuídos à questão da escala do estudo, que não permite verificar, por exemplo, a atuação de processos erosivos que podem ser responsáveis pelo transporte e acumulação de delgadas camadas de material fosfatado sobre rochas não fosfatadas. Assim como os pontos de rochas não fosfatadas, plotados sobre a poligonal de rochas fosfatadas, que são em parte relativos à metadiamicititos glaciais que podem conter razões elevadas de urânio e tório não necessariamente associados à presença de fosfato.

Quando comparados os tipos de classificadores disponíveis no software utilizado (PCA, KNN, SVM), observa-se que entre esses existem grandes diferenças em suas aplicações. O algoritmo Principal Components Analysis (PCA) que se baseia na



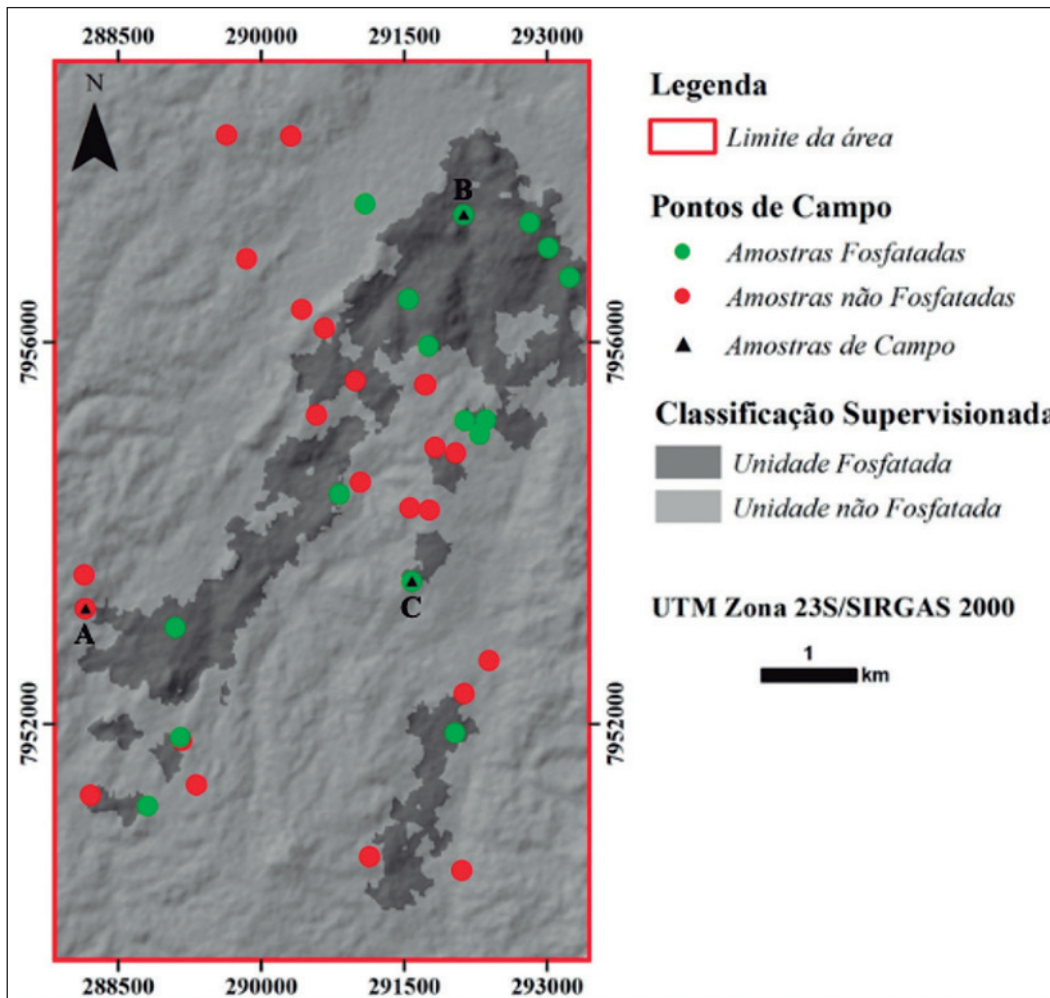


Figura 5 Mapa binário da Classificação Supervisionada, elaborado na escala 1:60.000, mostrando as áreas com a presença das Unidade Fosfatada e Unidade não Fosfatada. Os pontos verdes representam os locais em que as amostras apresentaram reação ao molibdato de amônia em campo e tiveram a presença de minerais de fosfato confirmada pelos difratogramas de Raio-X. Os pontos vermelhos representam os afloramentos de rochas não fosfatadas e os triângulos escuros mostram a exata localização das amostras (A, B e C) da figura 3.

comparação entre cada segmento da imagem com as amostras de treinamento escolhidas na direção de principal componente da imagem e os agrupa em classes com valores semelhantes, torna-se um classificador limitado para um local que apresenta ampla heterogeneidade de feições, como é o caso da área estudada. Por outro lado, o classificador K Nearest Neighbor (KNN), método que classifica cada segmento em relação à sua distância Euclidiana das amostras de treinamento, apresenta uma boa eficiência na separação entre elementos de classes similares, no entanto, mesmo sendo um classificador robusto, não foi aplicável a situação de Coromandel, tendo em vista a grande segmentação da área de estudo. Por outro lado, o classificador do tipo Support Vector Machine (SVM) foi bastante eficaz na delimitação de amostras de treinamento com características similares na etapa de segmentação da imagem e

mostrou-se robusto na discriminação de feições heterogêneas, o que foi o aspecto mais importante para o sucesso da classificação.

Essa mesma situação foi relatada por autores que se propuseram a realizar classificações supervisionadas para confecção de mapas de uso e ocupação de solos, como Sarmiento *et al.* (2014) e Garofalo *et al.* (2014). Sendo assim, dependendo da heterogeneidade e da quantidade de informações do contexto a ser classificado, o algoritmo de melhor rendimento e que resulta geralmente em produtos de maior confiabilidade é o Support Vector Machine (SVM).

## 5 Conclusões

Com base no resultado final obtido e análise da qualidade da classificação, é possível concluir

que a metodologia de Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto proposta obteve êxito e demonstrou-se uma robusta ferramenta na discriminação das rochas fosfatadas aflorantes na região de Coromandel (MG).

Devido a discreta, porém importante, relação das rochas fosfatadas com a geomorfologia da área de estudo, os dados de gamaespectrometria quantitativos relativos aos radioelementos U e Th foram determinantes para o sucesso do classificador, sendo que esses foram os principais fatores distintivos entre as Unidades Fosfatadas e não Fosfatadas.

A associação entre os dados de Modelo Digital de Elevação e de gamaespectrometria pode ser facilmente manipulada através das técnicas de processamento de imagens e se torna um importante dado na busca e exploração de novos depósitos.

O algoritmo classificador *Support Vector Machine* (SVM) foi o que apresentou melhor competência de trabalho, tendo em vista a heterogeneidade da área de estudo, assim como uma maior capacidade de processamento e melhor detalhamento dos limites dos corpos da Unidade Fosfatada.

As ocorrências de rochas fosfatadas da Formação Retiro perfazem uma área aproximada de 11 km<sup>2</sup>, na forma de corpos descontínuos que ocupam preferencialmente a porção central da área de estudo. A falta de ocorrências dessas rochas nas adjacências da porção central sugere que o depósito possui um modelo metalogenético bastante específico, na qual a acumulação fosfática ocorre intrinsecamente associada à núcleos de diamictitos e arenitos conglomeráticos.

Por fim, o presente trabalho abre uma porta de possibilidades da utilização dessa técnica para a busca de novas ocorrências, não só de fosfatos mas de todos os minerais que apresentem correlação entre depósitos com aspectos geomorfológicos e resposta gamaespectrométrica, como o exemplo de Coromandel. No entanto, a metodologia proposta, também se enquadra nas situações em que um depósito possui mais de um vetor exploratório que possam ser usados como planos de informações guias para o algoritmo classificador, dessa forma, modificando-se

alguns aspectos de parametrização da classificação, a técnica poderia ser aplicada em um número substancial de casos e ser uma útil ferramenta a geologia de exploração.

## 6 Referências

- Asfahani, J. 2002. Phosphate prospecting using natural gamma ray well logging in the Khneifiss Mine, Syria. *Exploration and Mining Geology*, 11(1): 61-68.
- Barbosa, O. (1955). Guia das excursões. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 9, Araxá, 1955. Resumos expandidos, São Paulo, S.B.G, p. 3-5.
- Barbosa, O.; Braun O.P.G.; Dylor R.C. & Cunha C.A.B.R. 1970. Geologia da região do Triângulo Mineiro. *Boletim DGM/DNPM*, 136(1): 139-140.
- Baturin, G. N. & Kochenov, A. V. 2001. Uranium in phosphorites. *Lithology and mineral resources*, 36(4): 303-321.
- Chaves A.G.; Heineck C.A. & Tavares W.P. 1971. Projeto Cedro do Abaeté. Belo Horizonte, Convênio DNPM/ CPRM, 96 p.
- Da Costa, M.A.C. 2017. Espectroscopia de reflectância de rochas da Suíte Alcalina Juquiá, sudeste do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18, Santos, 2017. Resumos expandidos, Santos, INPE, p. 5257-5265.
- Da Cruz, J.R.; de Souza Filho, C. R.; Abram, M.B. & Marcon, R. 2011. Caracterização espectral do depósito de fosfato de Araxá (MG). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, Curitiba, 2011. Resumos Expandidos, Campinas, UNICAMP, p. 3530-3537.
- Dardenne M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. Resumos expandidos, São Paulo, SBG, p. 597-610.
- Dardenne, M.A. 1981. Os Grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília. In: SIMPÓSIO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E FAIXAS MARGINAIS, 2, Salvador, 1981. Resumos expandidos, São Paulo, SBG, p. 140-157.
- Dardenne M.A.; Trompette R.; Magalhães L.F. & Soares L.A. 1986. Proterozoic and Cambrian phosphorites - regional review: Brazil. In: P.J. COOK & J.H. SHERGOLD (ed.). Phosphate deposits of the World. Cambridge University Press, Cambridge, p. 116-131.
- Dardenne, M.A.; Freitas-Silva, F.H.; Nogueira, G.S.M. & Souza, J.C.F. 1997. Depósitos de fosfato de Rochinha e Lagamar, Minas Gerais. In: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E.T. & COELHO, C.E.S. (ed.). Principais Depósitos Minerais do Brasil. DNPM/CPRM, p. 113-122.
- Dardenne, M. A.; Freitas-Silva, F. H.; Souza, J. D. & Campos, J. E. G. 1998. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 40, Rio De Janeiro, 1998. Resumos expandidos, Belo Horizonte, SBG, p. 26.
- Dardenne, M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; TOMAS FILHO, A. & CAMPOS, D.A (ed). Tectonic Evolution of South America. Proceedings of the XXXI International Geological Congress (Rio de Janeiro), p.231-263.
- Diner, D. J.; Beckert, J. C.; Reilly, T. H.; Bruegge, C. J.; Conel, J. E.; Kahn, R. A. & Gordon, H. R. 1998. Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) instrument description and experiment overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1072-1087.
- Fianco, C.B.; Vidotti, R.M. & Pires, A.C.B. 2014. Phosphorite prospecting using ground gamma spectrometry in northeast Goiás state, Brazil. *Revista Brasileira de*

Utilização de Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto para  
Discriminação das Rochas Fosfatadas da Região de Coromandel, Minas Gerais, Brasil

Lucas Santos Batista Teles; José Eloi Guimarães Campos; Tati de Almeida; Rejane Ennes Cicerelli & Elder Yokoyama

- Geofísica*, 32 (4): 721-733.
- Fonseca, D. S. & Silva, T. H. C. 2013. Sumário Mineral Brasileiro – Fosfato. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, p. 148.
- Freitas-Silva, F. H. & Dardenne, M. A. 1994. Proposta de subdivisão estratigráfica formal para o Grupo Canastra no oeste de Minas Gerais e leste de Goiás In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO OESTE, 4, Brasília, 1994. Resumos expandidos, Brasília, SBG, p. 164-165.
- Fuck, R. A.; Pimentel, M. M. & Silva, L. J. H. D. 1994. Compartimentação tectônica da porção oriental da Província Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, Camboriú, 1994. Resumos expandidos, Camboriú, SBG, p. 215-216.
- Galvanin, E. S. & Dal Poz, A. P. 2013. Sistema lidar e métodos de interpolação de dados. *Revista de Geografia*, 30(1): 91-102.
- Garofalo, D.F.T.; Messias, C.G.; Liesenberg, V.; Bolfe, É.L. & Ferreira, M.C. 2015. Análise comparativa de classificadores digitais em imagens do Landsat-8 aplicados ao mapeamento temático. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(7): 593-604.
- Igarashi, T. 2001. ALOS mission requirement and sensor specifications. *Advances in Space Research*, 28(1): 127-131.
- Jarvis, I.; Burnett, W.C.; Nathan, Y.; Almbaydin, F.S.M.; Attia, A.K.M.; Castro, L.N.; Flicoteaux, R.; Hilmy, M.E.; Husain, V.; Qutawnah, A.A.; Serjani, A. & Zanin, Y.N. 1994. Phosphorite geochemistry-state-of-the-art and environmental concerns. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 87: 643-700.
- Landis, J.R. & Koch, G.G. 1977. An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*, 5: 363-374.
- Lasa – Engenharia, E.P.S. 2001. Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais. Área 01. Unai – Vazante – Coromandel. Rio de Janeiro. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos, Volume I. 88 p.
- Lawrence, R. L., & Wright, A. (2001). Rule-based classification systems using classification and regression tree (CART) analysis. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 67(10): 1137-1142.
- Lima O.N.B.; Uhlein A. & Britto W. (2007). Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 37: 204-215.
- Marques, C.S.S.; Uhlein, A.; Oliveira, G.D.; Uhlein, G.J.; Sial, A.N. & Alvarenga, C.J.S. 2015. Geologia e quimioestratigrafia isotópica do Grupo Vazante em Lagamar (MG). *Revista Geonomos*, 23(1): 26-41.
- Maune, D.F.; Huff, L.C. & Guenther, G.C. 2001. Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. *The american society for photogrammetry and remote sensing*, Bethesda. p. 367-394.
- Monteiro, C.F. 2009. *Fosforitos do Grupo Bambuí na região de Campos Belos (GO)/Arraias (TO), na borda oeste do Cráton São Francisco*. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 150 p.
- Neto, G.B.S. 2015. *Método de classificação semiautomático das unidades básicas de relevo em regiões tropicais*. Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, 54 p.
- Nogueira, G.M.S. 1993. *Enquadramento litoestratigráfico, sedimentologia e evolução geoquímica do Depósito Fosfático de Lagamar, MG - Formação Vazante - Proterozoico Médio*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 134 p.
- Oliveira, F.A.D. 1970. Fosfato do Tennessee: Relatório de viagem aos Estados Unidos. CPRM. 18 p.
- Pimentel, M. M.; Dardenne, M.; Fuck, R.; Viana, M.; Junges, S.; Fischel, D. & Dantas, E. L. 2001. Nd isotopes and the provenance of detrital sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(6): 571-585.
- Rocha Araujo, P. R.; Flicoteaux, R.; Parron, C. & Trompette, R. 1992. Phosphorites of Rocinha Mine; Patos de Minas (Minas Gerais, Brazil); genesis and evolution of a middle Proterozoic deposit tectonized by the Brasileiro Orogeny. *Economic Geology*, 87(2): 332-351.
- Sanches, A.L. 2012. *Fosforitos Neoproterozoicos dos Grupos Vazante (MG) e Una (BA): Origem, Idades e Correlações*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia, Tese de Doutorado, 158 p.
- Sanches, A. L.; Misi, A. & Azmy, K. 2016. As sucessões carbonáticas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco e os depósitos de fosfato: correlações e fosfogênese. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4): 182-194.
- Sarmiento, C.M.; Ramirez, G.M.; Coltri, P. P.; Silva, L.F.L.; Nassur, O.A.C. & Soares, J.F. 2014. Comparação de classificadores supervisionados na discriminação de áreas cafeeiras em Campos Gerais-Minas Gerais. *Coffee Science*, 9(4): 546-557
- Soares, P. C. & Fiori, A. P. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica*, 16(32): 71-104.
- Sousa A.E. 2001. Balanço Mineral Brasileiro de Fosfato. Brasília, DNPM/MME, p1-3.
- Souza, J.L.D. & Ferreira, F.J.F. 2005. Anomalias aerogamaespectrométricas (K, eU e eTh) da quadrícula de Araras (SP) e suas relações com processos pedogenéticos e fertilizantes fosfatos. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(3): 251-274.
- Teixeira, R.D.A. 2012. *Avaliação espectral de depósitos de fosfatos utilizando imagens ASTER das regiões de Campos Belos e Catalão (GO)*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 23 p.
- Vapnik, V. 1995. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Nova York: Springer-Verlag, p. 188.
- Vitarello, I.; Galvão, L. S. & Paradella, W. R. 1993. Diferenciação Espectrorradiométrica de Lateritas Mineralizadas do Complexo de Maicuru (PA). In: 3RD INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, Rio de Janeiro, 1993. Resumos expandidos, São Paulo, INPE, p. 988-992.
- Youssef, M. A. 1965. Genesis of bedded phosphates. *Economic geology*, 60 (3): 590-600.