

ANÁLISE MULTITEMPORAL DE ÁREAS OCUPADAS POR ATIVIDADES DE MINERAÇÃO A PARTIR DE ÍNDICES ESPECTRAIS

Arthur Pereira dos Santos¹, Lucas Prado Osco², Wesley Barbosa Dourado³

Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE. Rodovia Raposo Tavares, km 572, Bairro do Limoeiro, 19067-175, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil. E-mails: arthurpdosantos@outlook.com¹; pradoosco@gmail.com²; wesley@unoeste.br³

RESUMO

O objetivo deste estudo foi caracterizar, ao longo do tempo, áreas ocupadas por atividades de mineração. Selecionamos imagens Landsat 8, OLI, e Landsat 5, TM, para compor o conjunto de dados. Calculamos o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dos anos de 1985, 1996, 2005 e 2017, e os comparamos em uma análise multitemporal. Para a imagem de 2017, aplicamos os índices *Clay Minerals Ratio* (CM), *Ferrous Minerals Ratio* (FM) e *Iron Oxide Ratio* (IO). Na área de estudo, encontramos uma queda nos valores médios de NDVI, de 0,43 (1985), para 0,04 (2017). Entre os índices espectrais aplicados para 2017, o CM apresentou menor erro médio quadrático (0,014), enquanto os demais, IO e FM, apresentaram valores semelhantes (0,023 e 0,026). Concluímos que o índice NDVI é adequado para monitorar o impacto provocado ao decorrer do tempo, e que os índices CM, IO e FM podem ser empregados na análise dessas áreas.

Palavras-chave — NDVI, CM, IO, FM.

ABSTRACT

The objective of this study was to characterize, over time, areas occupied by mining activities. We selected Landsat 8, OLI, and Landsat 5, TM images to compose the data set. We calculated the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from 1985, 1996, 2005 and 2017, and compared it in a multitemporal analysis. For the 2017 image, we apply the Clay Minerals Ratio (CM), Ferrous Minerals Ratio (FM) and Iron Oxide Ratio (IO) indices. In the studied area, we found a decrease in mean values of NDVI, from 0.43 (1985) to 0.04 (2017). Among the spectral indexes applied for 2017, the CM presented a smaller mean square error (0.014), while the others, IO and FM, presented similar values (0.023 and 0.026). We conclude that NDVI is adequate to monitor the impact caused over time, and that the CM, IO and FM indices can be used in the analysis of these areas.

Key words — NDVI, CM, IO, FM.

1. INTRODUÇÃO

A extração de recursos minerais leva a mudanças geológicas em razão da movimentação de solo, subsidência do substrato rochoso e da deformação de aquíferos [1]. Tais mudanças são refletidas na superfície, uma vez que causam a degradação da vegetação e expansão de corpos d'água devido às inundações de áreas previamente extraídas [2]. As imagens de satélites multiespectrais permitem detectar mudanças graduais e, ou, abruptas em paisagens [3], e o uso de índices espectrais pode

auxiliar na caracterização dessas mudanças de padrão, uma vez que realçam diferentes feições da superfície [4]. Por esta razão, o objetivo desta pesquisa foi caracterizar os valores de índices espectrais para uma área ocupada por atividades de mineração. Esse objetivo surgiu de dois questionamentos: 1) como poderíamos avaliar o impacto da expansão da área ocupada por esta atividade ao decorrer dos anos? e; 2) qual o comportamento de diferentes índices espectrais específicos para estas áreas?

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir o objetivo proposto e responder às perguntas realizadas, conduzimos um estudo de caso em uma área ocupada por uma mineradora, cujo coordenada central corresponde a 46°54'12,543"O e 17°12'24,555"S, localizada próxima ao perímetro urbano da cidade de Paracatu, Minas Gerais. A mineradora, em questão, foi inaugurada em 1985, e, desde então, permanece em operação, extraindo minérios da região.

Selecionamos quatro imagens da série de satélites Landsat ao decorrer dos últimos 30 anos para realizar uma análise multitemporal da área. As imagens correspondentes às datas de 19/12/1986, 07/07/1995 e 01/08/2005 pertencem ao satélite Landsat 5, Sensor TM, enquanto a imagem mais recente escolhida, obtida no dia 02/08/2017, pertence ao Landsat 8, Sensor OLI. Todas as imagens foram adquiridas a partir da plataforma ESPA-LSRD [5], que fornece os dados em refletância de superfície, atmosféricamente corrigidos e projetados para o hemisfério Sul, em UTM.

Calculamos o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para as quatro datas. O NDVI é calculado a partir da equação (1), utilizando as bandas da região do vermelho (red) e do infravermelho próximo (nir) [1]. O NDVI é amplamente utilizado na avaliação de parâmetros biofísicos, porém pode ser utilizado para observar outras situações em que a ausência de vegetação seja um parâmetro interessante [2].

$$\frac{(NIR \rho_{(830nm)} - RED \rho_{(660nm)})}{(NIR \rho_{(830nm)} + RED \rho_{(660nm)})} \quad (1)$$

Selecionamos três índices espectrais desenvolvidos para a identificação de minerais relacionados ao solo, como a presença de argilas ou ferro, comumente associados as áreas ocupadas por mineradoras [6]. Os índices foram aplicados somente na imagem de 2017, correspondente ao sensor OLI, Landsat 8. O Clay Minerals Ratio (CM), calculado conforme

a equação (2), foi desenvolvido com o intuito de identificar os minerais de argila, partindo do pressuposto de que a razão entre duas regiões do infravermelho médio (*SWIR1* e *SWIR2* no caso do sensor OLI) são sensíveis a discriminação destes minerais devido ao comportamento espectral nestas regiões [3;4]. O Ferrous Minerals Ratio (FM), conforme a equação (3) funciona de modo semelhante ao CM, porém utilizam-se as regiões do infravermelho médio (*SWIR1*) e infravermelho próximo (*nir*) para realçar a presença de minerais de ferro [3;4]. O índice Iron Oxide Ratio (IO), definido pela equação (4), destaca superfícies contendo óxido de ferro a partir da razão entre as bandas do vermelho (*red*) e do azul (*blue*) [3;4].

$$\frac{SWIR1 \rho_{(1165nm)}}{SWIR2 \rho_{(2215nm)}} \quad (2)$$

$$\frac{SWIR1 \rho_{(1165nm)}}{NIR \rho_{(830nm)}} \quad (3)$$

$$\frac{Red \rho_{(660nm)}}{Blue \rho_{(485nm)}} \quad (4)$$

Para analisar os dados, criamos uma máscara a partir da interpretação visual da imagem Landsat 8 registrada para o ano de 2017. Essa máscara corresponde ao limite da área ocupada pela mineradora. A partir desta máscara, recortamos os índices aplicados e calculamos os valores de mínimo, máximo, média, desvio padrão, erro médio quadrático (EMQ) e também aplicamos o teste de Shapiro-Wilk para determinar o valor-p referente a normalidade dos dados. Na comparação temporal com o índice NDVI, aplicamos a ANOVA, seguida do teste de Tukey à 5% para diferenciar os valores médios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise multitemporal com o NDVI (Figura 1) permitiu observar a redução da vegetação ao decorrer da expansão da área ocupada pela mineradora. Esta redução está atrelada a abertura de novas galerias e à inundação de espaços antigos. A degradação da vegetação é perceptível na comparação visual entre as datas (Figura 1) devido a impactos provocados na superfície pelo abaixamento das áreas mineradas [2].

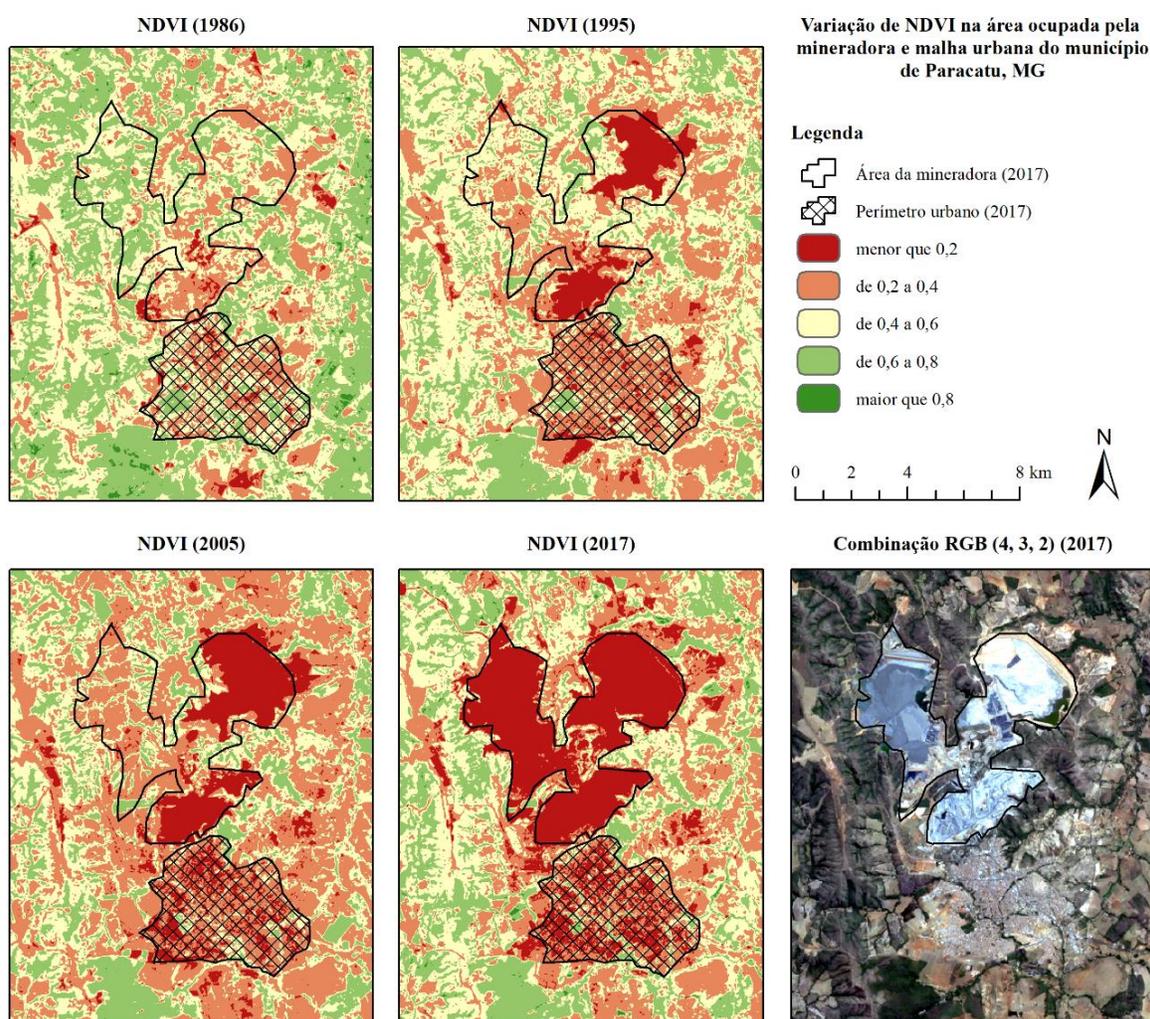


Figura 1. NDVI aplicado ao decorrer das épocas para a área ocupada pela mineradora.

A distribuição dos valores de NDVI ao decorrer dos anos para a área da mineradora (Figura 2) apresentou alterações significativas pelo teste de médias (Tabela 1). Para o NDVI de 1986 a média dos valores foi igual a 0,43, correspondendo ao maior valor obtido nesta análise. Isto indica que, no início da mineração, haviam áreas cobertas por vegetação. Nos anos seguintes, apesar de haver uma certa estabilização dos valores entre os anos de 1995 e 2005, o valor médio para o NDVI de 2017 foi o menor encontrado, demonstrando uma tendência em sua redução.

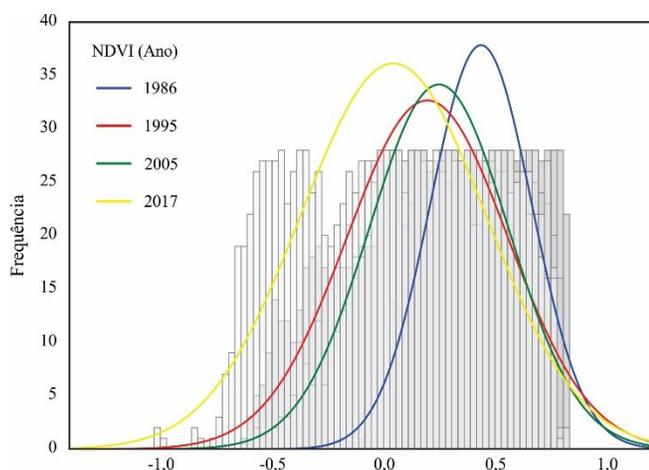


Figura 2. Histograma comparando a distribuição de valores de NDVI para as épocas testadas (1986, 1995, 2005 e 2017).

Tabela 1. Valores encontrados para o NDVI ao decorrer das épocas testadas para a área ocupada pela mineradora.

Ano	Mín.	Máx.	Média ± DvP.	EMQ	Valor-p
1986	-0,19	0,83	0,43 ± 0,008 ^a	0,008	0,0001
1995	-0,64	0,80	0,19 ± 0,011 ^b	0,011	0,0001
2005	-0,63	0,78	0,24 ± 0,010 ^b	0,010	0,0001
2017	-1,00	0,81	0,04 ± 0,011 ^c	0,011	0,0001

DvP = Desvio Padrão dos valores de pixel; EMQ = Erro Médio Quadrático; Valor-p = calculado em cima do teste de normalidade Shapiro-Wilk W; Todos os valores foram significativos à 5% pelo teste de Tukey representado por letras minúsculas.

O NDVI é um índice adequado para o monitoramento da expansão da mineradora, porém não aparenta ser adequado para a discriminação dessa área entre as demais (Figura 1). O índice, apesar de discriminar bem os parâmetros biofísicos, apresenta dificuldades em separar as áreas de mineração [1]. Outros índices, construídos para a discriminação de minerais em superfície, podem oferecer melhores informações sobre as áreas ocupadas por esta atividade [4].

Dentre os índices testados (CM, IO e FM) para a área ocupada pela mineradora (Figura 3), o CM apresentou menor variação e EMQ do que os demais (Figura 4 e Tabela 2). Isso indica que a área da mineradora pode ser identificada por sua elevada quantidade de minerais de argila na superfície [3]. Os demais índices (IO e FM) apresentaram resultados menos discrepantes (Tabela 2). Ainda assim, não se descarta uma possibilidade de utilizá-los como valores de referência para a caracterização da área em estudo.

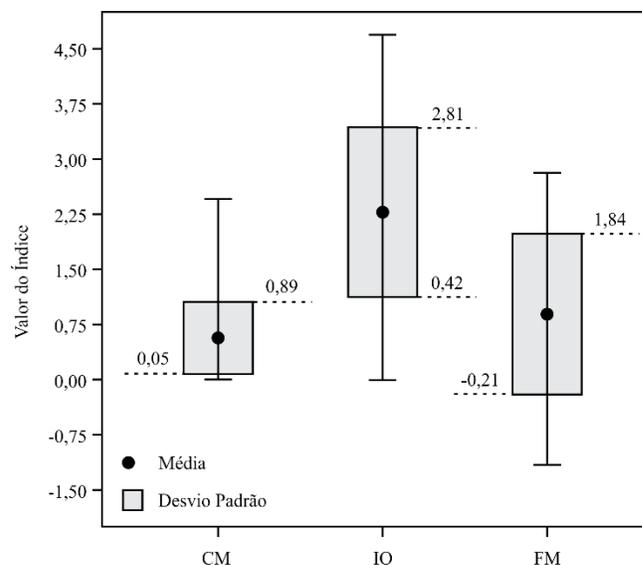


Figura 4. Distribuição dos valores dos índices CM, IO e FM para a área ocupada pela mineradora.

Tabela 2. Valores encontrados para os índices NDVI, CM, IO e FM para a área ocupada pela mineradora.

Índice	Min.	Máx.	Média ± DvP.	EMQ	Valor-p
NDVI	-1,00	0,81	0,04 ± 0,011 ^d	0,011	0,0001
CM	0,03	2,40	0,49 ± 0,444 ^c	0,014	0,0001
IO	0,06	4,63	2,31 ± 1,216 ^a	0,023	0,0001
FM	-1,00	2,69	0,83 ± 1,012 ^b	0,026	0,0001

DvP = Desvio Padrão dos valores de pixel; EMQ = Erro Médio Quadrático; Valor-p = calculado em cima do teste de normalidade Shapiro-Wilk W; Todos os valores foram significativos à 5% pelo teste de Tukey representado por letras minúsculas.

No índice CM, os valores de pixel situados entre 0,05 e 0,89 correspondem à área ocupada pela mineradora. Para o IO, estes valores estão situados entre 0,42 e 2,81. No índice FM, os valores de -0,21 e 1,84 são representativos da área de estudo. Ressaltamos que os valores definidos para esses três índices se encontram à um intervalo de confiança de 95%. Para tanto, há a possibilidade de se identificar outras áreas em condições semelhantes nesta cena utilizando estes valores. Porém, a discriminação de áreas de mineração, a partir do uso destes índices, pode ser comparada com outros métodos de classificação e operação de imagens, como, por exemplo, Random Forest, fusão de imagens e outros índices [2;4;6]. O índice IO, por sua vez, demonstrou resultados satisfatórios na identificação de áreas de mineração [3;4] e, no caso estudado, destacou a área ocupada pela mineradora entre os demais alvos de superfície (Figura 2). O índice FM não se mostrou muito satisfatório para a mesma finalidade.

O CM apresentou EMQ semelhante ao NDVI da mesma data, e deve ser considerado em uma análise multitemporal. Entretanto, existe uma limitação no uso deste índice devido a necessidade de uma banda do infravermelho médio (SWIR2). Isto reforça o uso do IO em uma análise ao decorrer do tempo, uma vez que este índice, além de discriminar bem áreas de mineração das áreas de uso e cobertura [4], apresentou EMQ baixo e representativo para a área em estudo (Tabela 2).

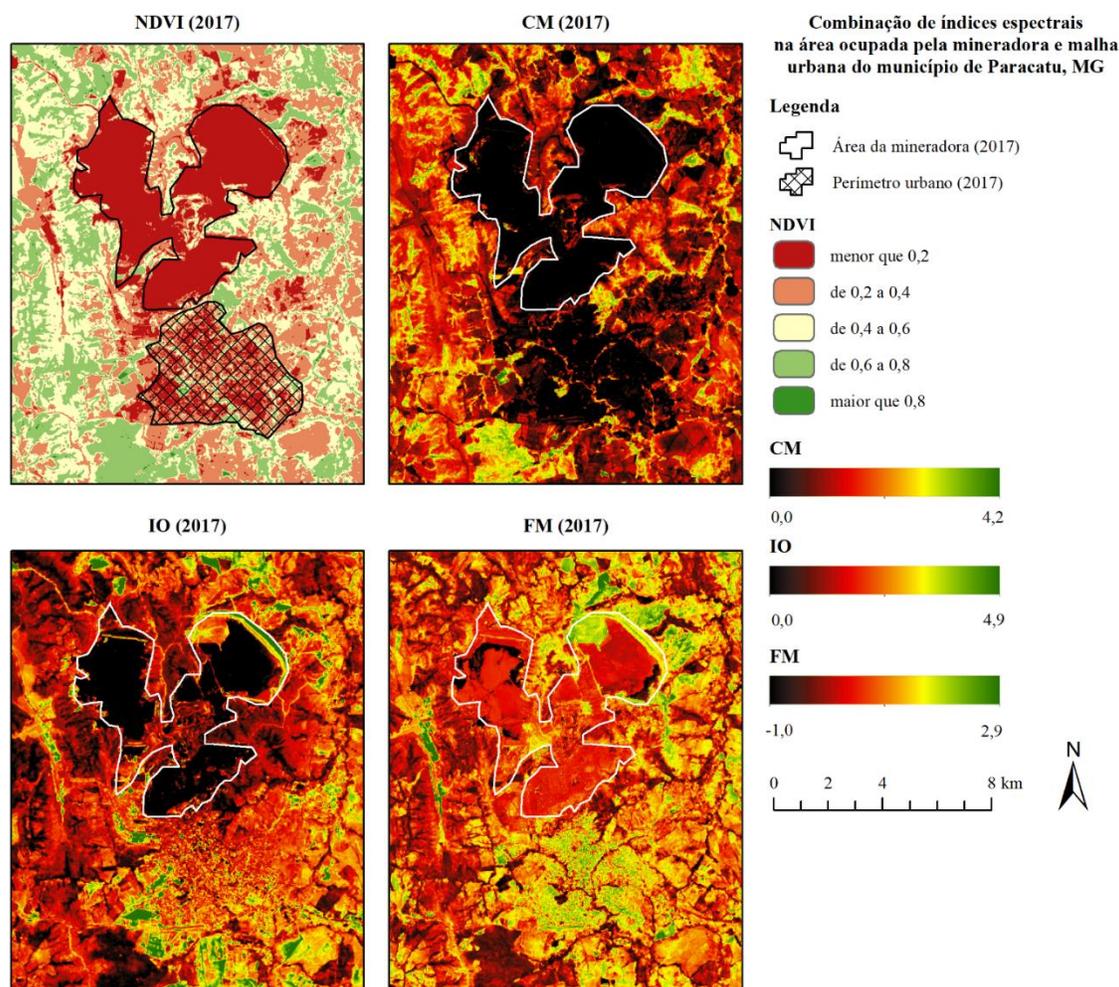


Figura 3. Índices espectrais NDVI, CM, IO e FM aplicados para a área ocupada pela mineradora e amplitudes máximas.

4. CONCLUSÕES

Concluimos que o NDVI é adequado para dimensionar o impacto ambiental ocasionado pela expansão da mineração ao decorrer das datas, uma vez que a degradação da vegetação provocada nestas áreas é responsável por reduzir os valores registrados pelo índice. Concluimos, também, que o índice CM apresenta uma menor discrepância de valores de pixels registrados na área ocupada pela mineradora. Entretanto, a distinção da mineradora para os demais alvos de superfície, a partir do CM, ainda é incerta. O índice IO parece promissor em realizar essa distinção, porém estudos futuros ainda são necessários. A despeito disso, nossa pesquisa demonstra o potencial dos índices espectrais em descrever os impactos provocados por esta atividade, e dá indícios de qual índice poderá ser empregado em análise multitemporal, juntamente com o NDVI, para melhor mensurar o impacto provocado.

5. REFERÊNCIAS

[1] Millán, V. E. G.; Teuwsen, S. & Münster, K. P. 2013. "Description of a Flooding Process in Mining Areas using

spectral Indices on multi-temporal Landsat Imagery", *Photogrammetrie-Fer. Geoinformation 5*: 427-0436 pp.

[2] Padmanaban, R.; Bhowmik, A. K. & Cabral, P. 2017. "A Remote Sensing Approach to Environmental Monitoring in a Reclaimed Mine Area", *SPRS I. J. Geo-Inf.*, 6(401): 1-14 pp.

[3] Hund, T. L. & Varvarina, E. A. 2013. "Method of monitoring minerals using remote sensing data based on spectral index", *Vestnik OrelGAU*, 6(45): 44-48 pp.

[4] Omar, H. A.; Quiroz, C.; Daza, H. M. R. & Ivanova, Y. 2017. "Detection of open-pit mining zones by implementing spectral indices and image fusion techniques", *DYNA*, 84(201): 42-49 pp.

[5] USGS. United States Geological Survey. "ESPA-LSRD". Disponível em: < <https://espa.cr.usgs.gov/> >.

[6] Yamaguchi, Y. & Naito, C. 2013. "Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands", *Int. J. of Rem. Sens.*, 24(22): 4311-4323 pp.