



**Análise Comparativa de Imagens Sentinel-2A (MSI) e Landsat-8 (OLI)
Aplicadas ao Mapeamento Geológico, Região de Itaitaia, Santa Quitéria, CE**
Comparative Analysis of Sentinel-2A (MSI) and Landsat-8 (OLI)
Images Applied to Geological Mapping, Itaitaia Region, Santa Quitéria, CE

Mateus de Paula Miranda¹; Cynthia Romariz Duarte²;
Daniel Dantas Moreira Gomes³; Cassiano Dias de Souza¹ & Cláudio Ângelo da Silva Neto⁴

¹Universidade Federal do Ceará. Programa de Pós-graduação em Geologia.
Av. Humberto Monte, s/n, Campus do Pici, Bloco 912, 60.455-760, Fortaleza, CE

²Universidade Federal do Ceará. Departamento de Geologia. Laboratório de Geoprocessamento.
Av. Humberto Monte, s/n, Campus do Pici, Bloco 912, 60.455-760, Fortaleza, CE

³Universidade de Pernambuco. Campus de Garanhuns/PE.

Rua Cap. Pedro Rodrigues, 105, 55294-902, São José, Garanhuns/PE

⁴Universidade Federal do Ceará. Programa de Graduação em Geologia.
Av. Humberto Monte, s/n, Campus do Pici, Bloco 912, 60.455-760, Fortaleza, CE

E-mails: mateuspmiranda@gmail.com; cynthia.duarte@ufc.br; daniel.gomes@upe.br; cass.souza@gmail.com; claudiocasn@gmail.com

Recebido em 29/03/2019 Aprovado em 20/05/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_366_377

Resumo

Satélites equipados com sensores multiespectrais, tais como os da série Landsat (TM, ETM+, OLI), tem um importante papel em aplicações geológicas, em especial os sensores que possuem faixas espectrais no infravermelho de ondas curtas, pois é nessa região do espectro que grupos minerais, como o das argilas, apresentam picos de refletância. Os satélites da missão Sentinel-2, pertencentes ao programa Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA – European Spatial Agency) possuem como finalidade dar continuidade a missões como Landsat e SPOT. A província fosforo-urânifera da região de Itaitaia, objeto deste estudo, está localizada no município de Santa Quitéria (CE) e inserida no contexto geológico do Domínio Ceará Central (DCC) da Província Borborema (PB). O objetivo deste trabalho foi efetuar a comparação das imagens dos sensores MSI Sentinel-2 e do OLI Landsat-8, por meio de parâmetros estatísticos, como o coeficiente de Pearson, e analisar suas aplicações para o mapeamento geológico. Para tanto, foram selecionadas as bandas correlatas de ambos os sensores, pré-processadas para um conjunto de dados compatível para comparação. Posteriormente, foram gerados os coeficientes entre os pares de bandas correlatas, e também razões de bandas para análise dos dados. As imagens Sentinel-2, analisadas nesse trabalho, apresentaram forte correlação com as imagens do Landsat-8, com coeficientes de Pearson variando entre 0,857 e 0,930, e as razões de bandas apresentaram um coeficiente variando entre 0,772 e 0,910. As maiores correlações foram entre as bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR), sendo coeficientes de Pearson de 0,935 entre as bandas 6 (OLI) e 11 (MSI), 0,926 para as bandas 7 (OLI) e 12 (MSI) e a razão com maior coeficiente foi a 6/7 (OLI) e 11/12 (MSI). Essa forte correlação entre as bandas do SWIR demonstram o potencial das imagens Sentinel-2 para trabalhos em geologia, uma vez que muitos grupos minerais possuem picos de refletância nessa faixa espectral.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Mapeamento Geológico, Província Borborema

Abstract

Satellites equipped with multispectral sensors, such as the Landsat (TM, ETM+, OLI) series, play an important role in geological applications, especially sensors that have spectral bands in short-wave infrared, because it is in this region of the spectrum that mineral groups such as that of the clays, present peaks of reflectance. The satellite of the mission Sentinel-2, from Copernicus program of European Spatial Agency-ESA have the intended to provide continuity to missions like Landsat and SPOT. The phosphorus-uraniferous province of the Itaitaia, object of this study, is located in the municipality of Santa Quitéria (CE) and inserted in the geological context of the Domínio Ceará Central (DCC) of Província Borborema (PB). The aim of this paper is to accomplish the comparison of imagens from MSI Sentinel-2 and OLI Landsat-8 sensors, by means of statistical parameters, as the Pearson coefficient, and analyze your applications for geological mapping. For that, the correlated bands of both sensors were selected, preprocessed for a compatible set of data for comparison. Subsequently, the coefficients were generated between the pairs of correlated bands, as well as band ratios for data analysis. The Sentinel-2 images, analyzed in this work, presented a strong correlation with the images of Landsat-8, with Pearson coefficients varying between 0.857 and 0.935, and the band ratios presented a coefficient varying between 0.772 and 0.910. The highest correlations were between short-wave infrared (SWIR) bands, with Pearson coefficients of 0.935 between bands 6 (OLI) and 11 (MSI), 0.926 for bands 7 (OLI) and 12 (MSI) and ratio with the highest coefficient was 6/7 (OLI) and 11/12 (MSI). This strong correlation between SWIR bands demonstrates the potential of Sentinel-2 images for geology work, since many mineral groups have peaks of reflectance in this spectral range.

Keywords: Sensing Remote, Geological Mapping, Borborema Province



1 Introdução

O sensoriamento remoto geológico é uma técnica de análise de dados que busca monitorar e mensurar as características físicas e/ou químicas do ambiente geológico estático ou dinâmico (Liu, 2007). O desenvolvimento contínuo de geotecnologias tem estimulado o crescente uso dessas técnicas na elaboração de investigações geológicas. Neste contexto, o uso de imagens orbitais proporciona informações relevantes a respeito de uma área em estudo antes de um trabalho de campo, tornando-se uma ferramenta fundamental nas etapas que envolvem um mapeamento geológico.

Satélites equipados com sensores multiespectrais têm um importante papel em aplicações geológicas, em especial os que possuem imageamento no intervalo do infravermelho de ondas curtas, pois é nessa região do espectro eletromagnético que grupos como os argilo-minerais apresentam picos de refletância e/ou absorção (Rowan *et al.*, 1974; Goetz & Rowan, 1983). Alguns dos satélites com sensores multiespectrais mais usados em trabalhos geológicos são os da missão norte-americana Landsat e seus sensores TM, ETM+ e OLI (Crósta & Moore, 1989; Crósta, 1993; Osako, 1999; Medeiros *et al.*, 2011; Uchoa, 2016; Miranda, 2016). Durante anos, os satélites da série Landsat têm sido empregados em mapeamentos geológicos devido à boa qualidade de seus produtos e disponibilização gratuita pela USGS (*United States Geological Survey*).

Com a finalidade de dar continuidade às missões Landsat e SPOT, a ESA (*European Spatial Agency*) deu início à missão Sentinel-2, parte do programa Copernicus. Ela é composta por dois satélites gêmeos, Sentinel-2A e Sentinel-2B, que foram lançados em julho de 2015 e março de 2017, respectivamente. Ambos possuem órbita polar, heliossíncrona, com altitude de 786 km e fazem a cobertura sistêmica de áreas continentais e costeiras. O tempo de revisita de cada cena por cada satélite é de dez dias, e quando compostos pelo par o tempo de revista diminui para cinco dias no Equador. A bordo de ambos os satélites Sentinel-2 está o instrumento MSI (*Multi Spectral Instrument*). Trata-se de um sensor multiespectral que abrange 13 bandas espectrais (443

nm – 2190 nm) com uma faixa de imageamento de 290km. As quatro bandas do VNIR (visível e infravermelho próximo) possuem resolução espacial de 10 metros, as seis bandas do infravermelho de borda e de ondas curtas (SWIR) 20 metros e as três bandas de correção atmosférica 60 metros (ESA, 2018).

Com o primeiro satélite lançado em julho de 2015, a missão Sentinel-2 é relativamente nova quando comparada a missão Landsat que está em funcionamento desde julho de 1972. Desse modo, a série Landsat apresenta uma vasta bibliografia com trabalhos voltados a aplicação em mapeamento geológico. Neste contexto, alguns trabalhos foram desenvolvidos com imagens simuladas (D’Odonico, 2013; F.D. Van der Meer, 2014) e imagens originais (Van der Werff *et al.*, 2015; Mandanici & Bitelli, 2016; Van der Werff & Van der Meer, 2016; Al-Nahmi *et al.*, 2017; Ibrahim *et al.*, 2018; Ge *et al.*, 2018).

O objetivo deste trabalho foi o de avaliar o potencial do uso de imagens Sentinel-2 em aplicações geológicas, comparando-as com produtos do satélite Landsat-8 por meio de parâmetros estatísticos.

A área utilizada para tal análise é a região da mina de Itaitaia, localizada no município de Santa Quitéria, estado do Ceará, nordeste do Brasil (Figura 1). Distanto 200 km da capital Fortaleza, a jazida de Itaitaia possui reservas geológicas de 142,5 mil toneladas de urânio associado a fosfato, das quais a reserva lavrável tem cerca de 79,5 milhões de toneladas de minério com teores de 11% de P_2O_5 e 998 ppm de U_3O_8 , contendo neste minério 8,9 milhões de toneladas de P_2O_5 e 79,3 mil toneladas de U_3O_8 . Nesta área, as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) dispõem também de reservas de cerca de 300 milhões de m^3 de mármore, totalmente isento de urânio (INB, 2018).

2 Geologia Regional:

A jazida fósforo-uranífera de Itaitaia foi descoberta em 1976 pela NUCLEBRÁS (atual INB – Indústrias Nucleares do Brasil S.A.), durante o Projeto Canindé, graças à detecção de uma anomalia radiométrica localizada no município de Santa Quitéria. Está inserida geologicamente no Domínio Ceará

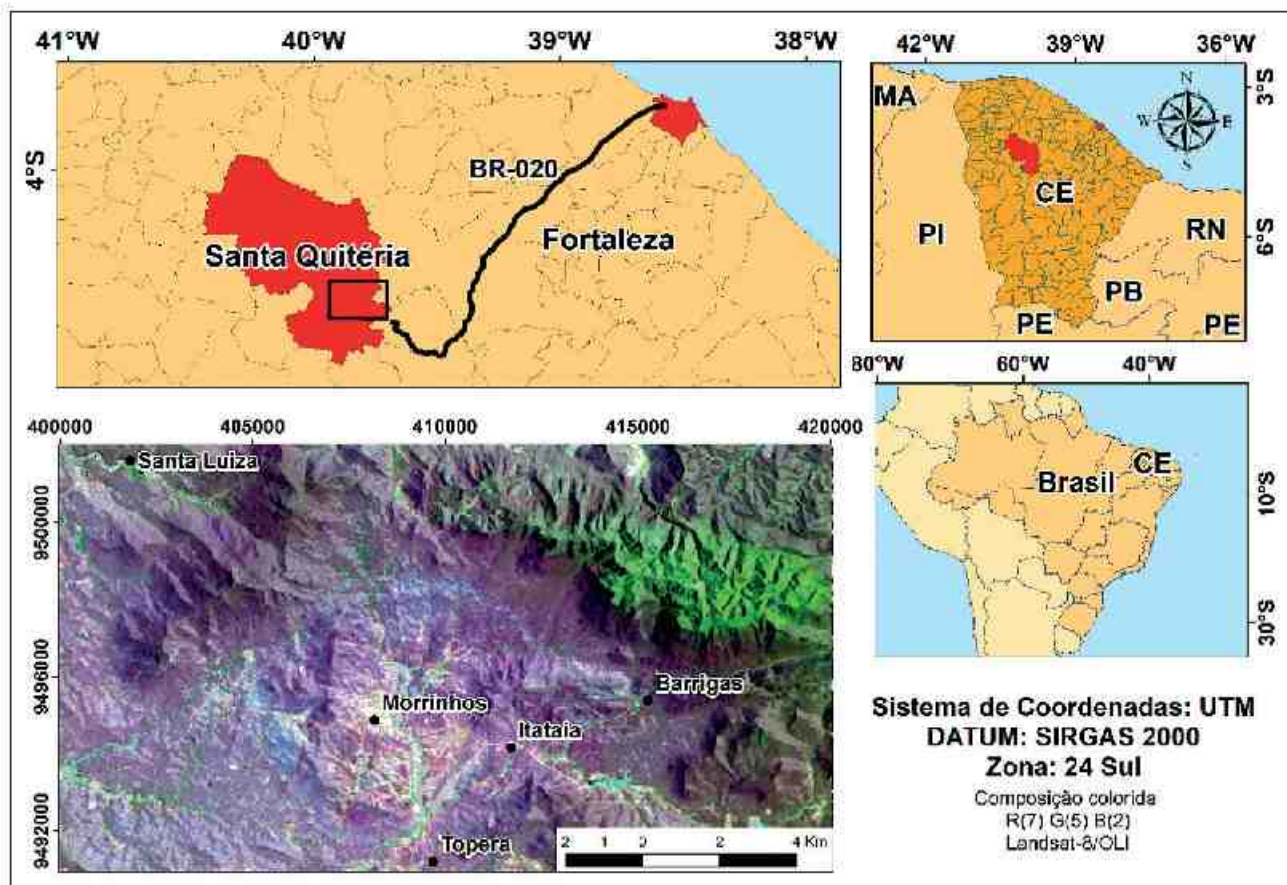


Figura 1 Localização da área de estudo.

Central (DCC) da Província Borborema (BP) (Almeida *et al.*, 1981).

Brito Neves *et al.* (2000) dividiram a Província Borborema em cinco domínios tectônicos principais denominados de Médio Coreau (localizado a norte do Lineamento Transbrasiliiano e a sul da margem retrabalhada do Cráton São Luís); Domínio Ceará Central (localizado entre os lineamentos Transbrasiliiano e Senador Pompeu); Rio Grande do Norte (localizado entre os Lineamentos Senador Pompeu e Patos); Zona Transversal (situado entre o Lineamento Patos e Pernambuco); e Tectônico Meridional (situado entre o Lineamento Pernambuco e a borda norte do Cráton São Francisco). O Domínio Estrutural Central foi subdividido em quatro subdomínios: o Ceará Central; o Seridó, ao norte; o Cachoeirinha-Salgueiro e Riacho do Pontal, ao sul.

O Domínio Ceará Central (DCC) é dividido em embasamento Arqueano, representado pelo

Complexo Cruzeta (Oliveira & Cavalcante, 1993); terrenos acrecionários Paleoproterozóicos, abrangendo o Complexo Canindé (Torres *et al.*, 2007); unidades São José da Macaoca e Algodões (Cavalcante *et al.*, 2003); uma sequência metassedimentar de margem passiva Neoproterozóica, representada pelo Complexo Ceará, incluindo as unidades Quixeramobim e Independência (Castro, 2005; Arthaud, 2007; Arthaud *et al.*, 2008, 2015); o arco magmático Neoproterozóico Tamboril-Santa Quitéria; granitos Neoproterozóicos Cambrianos; bacias molássicas Eopaleozóicas associadas à zona de cisalhamento Transbrasiliiana; e o magmatismo Cretáceo representado pelos diques do evento Rio Ceará Mirim.

A sequência metassedimentar de Itataia, de natureza transgressiva, está associada ao Ciclo Transamazônico, de idade Paleoproterozóica. Na sequência estratigráfica do Grupo Itataia ocorrem como embasamento os migmatitos da Formação Serra do

Céu, que estão sotopostos pelos quartzitos da Formação Laranjeiras, seguidos dos gnaisses e migmatitos da Formação Barrigas. No topo da sequência estão os mármorees da Formação Alcantil, que é a principal hospedeira da mineralização fósforo-urânifera, o colofanito (Mendonça *et al.*, 1980). Na Figura

2 é possível visualizar o mapa litológico da região de Itataia proposto por Mendonça *et al.* (1980) junto com a composição colorida R(2/6) G(4-2) B(5/7) do satélite Landsat-8/OLI, utilizada por Miranda (2016) para realçar os mármorees da Formação Alcantil, litologia hospedeira da mineralização fósforo-urânifera da Jazida de Itataia.

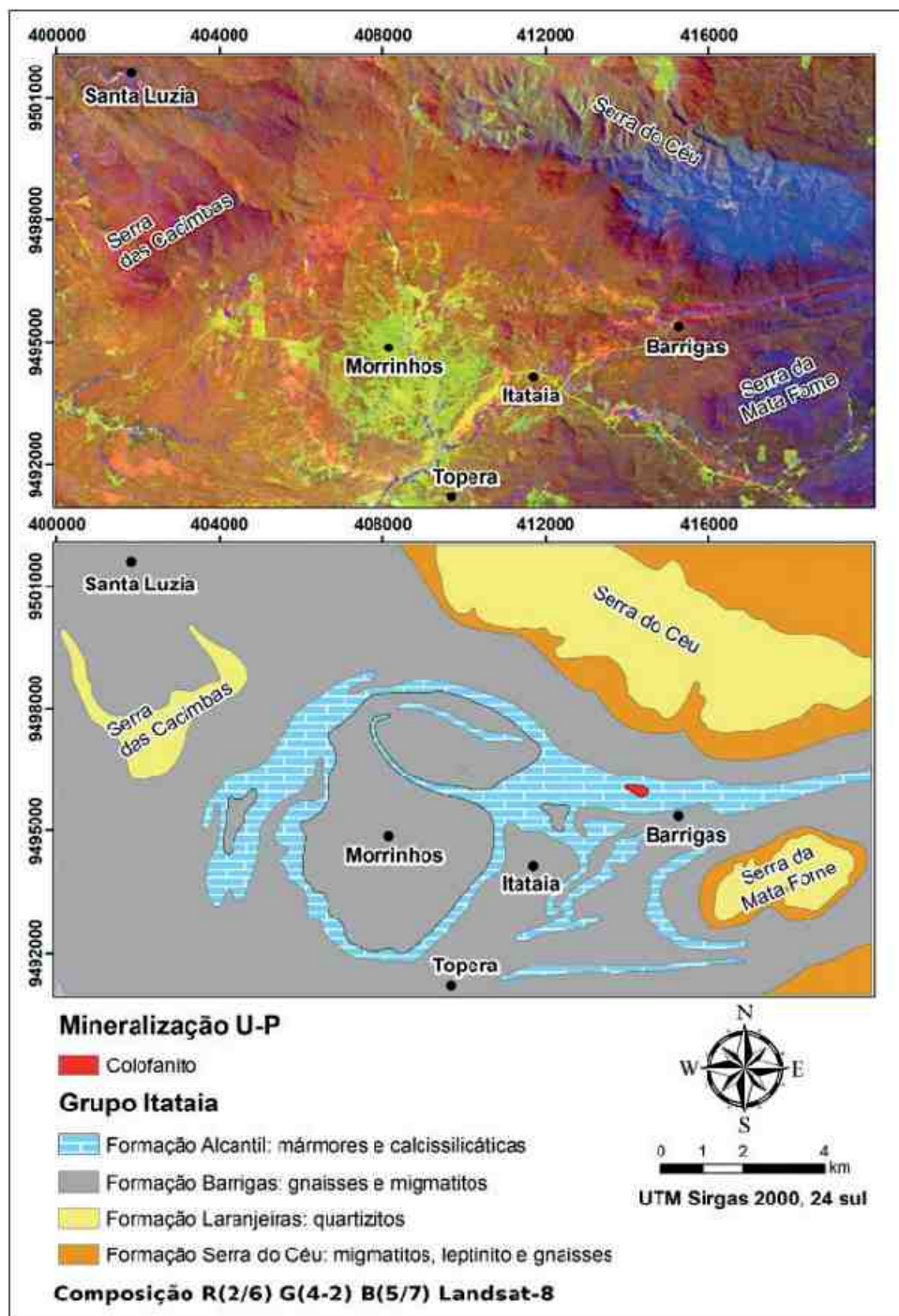


Figura 2 Composição colorida R(2/6) G(4-2) B(5/7) do satélite Landsat-8/OLI (Miranda, 2016) comparada ao Mapa Litológico da Região de Itataia, Modificado de Mendonça *et al.* (1980).

3 Materiais e Métodos

3.1 Materiais

As imagens dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2 foram adquiridas de forma gratuita através do sítio institucional da USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Os dados Sentinel-2 Level 1-C estão disponíveis para *download* gratuito também no próprio *site* da ESA (<https://scihub.copernicus.eu>). A possibilidade de obtenção das imagens Sentinel-2 pelo *site* do serviço geológico americano é devido a uma parceria entre a ESA e o USGS que permite a distribuição dos dados Level 1-C, que são pré-processados com correções radiométrica TOA (*Top of Atmosphere*) e geométrica. As imagens Sentinel são oriundas do satélite Sentinel-2A, e ambas as imagens, Sentinel e Landsat, foram adquiridas em setembro de 2017, dias 26 e 30, respectivamente, no período de estiagem visando uma menor cobertura de vegetação e menor presença de nuvens da área.

Os programas utilizados neste trabalho foram: ENVI 5.3 para pré-processamento das imagens, gerar estatísticas e gráficos de dispersão, e ArcGIS 10.3 para confecção dos mapas.

3.2 Métodos

Ao se trabalhar com imagens orbitais é necessário considerar suas resoluções. O termo reso-

lução em sensoriamento remoto se desdobra em três diferentes (e independentes) parâmetros: resolução espacial, resolução espectral e resolução radiométrica (Crósta, 1992). Também existe uma quarta resolução, a temporal, que é a frequência em que um sensor revisita uma área para obter imagens periódicas.

Devido à temática de comparação entre as imagens dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8 desse trabalho, foram necessários pré-processamentos a fim de reduzir os erros impostos pelas diferenças de características de ambos os sensores, além de variações de condições atmosféricas entre as cenas, conforme apresentado na Tabela 1.

Neste trabalho, foram utilizadas para comparação as seguintes bandas correlatas entre os dois sensores: 2, 3, 4, 8, 8A, 11e 12 (MSI); e 2, 3, 4, 5, 6 e 7(OLI).

A resolução espacial representa a menor feição passível de detecção pelo instrumento em questão (Novo, 2010). Neste quesito, o sensor MSI apresenta resoluções espaciais superiores em relação ao sensor OLI.

O Sentinel-2 possui 13 bandas, com resoluções que variam entre 10, 20 e 60 metros, onde das sete bandas selecionadas para comparação, as quatro do VNIR apresentam resolução de 10 metros e as três do SWIR de 20 metros. Todas as bandas sele-

Landsat 8 (OLI e TIRS)			Sentinel-2 (MSI)		
Banda	Comprimento de Onda Central (µm)	Resolução Espacial	Banda	Comprimento de Onda Central (µm)	Resolução Espacial
1 - Aerosol	0,443	30 m	1 - Aerosol	0,443	60 m
2 - Azul	0,483	30 m	2 - Azul	0,490	10 m
3 - Verde	0,561	30 m	3 - Verde	0,560	10 m
4 - Vermelho	0,654	30 m	4 - Vermelho	0,665	10 m
5 - NIR	0,864	30 m	5 - Red Edge 1	0,705	20 m
6 - SWIR 1	1,609	30 m	6 - Red Edge 2	0,740	20 m
7 - SWIR 2	2,201	30 m	7 - Red Edge 3	0,783	20 m
8 - Pancromática	0,589	15 m	8A - Red Edge 4	0,865	20 m
9 - Cirrus	1,364	30 m	8 - NIR	0,842	10 m
10 - TIR 1	10,895	100 m	9 - Vapor D'água	0,940	60 m
11 - TIR 2	12,005	100 m	10 - Cirrus	1,375	60 m
			11 - SWIR 1	1,610	20 m
			12 - SWIR 2	2,190	20 m

Tabela 1 Parâmetros dos sensores MSI/Sentinel-2A e OLI/Landsat-8

cionadas do Landsat-8 apresentam 30 metros. Desse modo todas as bandas foram reamostradas para 10 metros, pois para comparar as bandas correlatas de ambos os sensores é necessário que as matrizes de dados estejam com as mesmas dimensões.

As imagens possuem cenas diferentes, ou seja, superfícies imageadas com áreas diferentes. Para comparar ambos os sensores, foi usada uma área em comum as duas imagens. As áreas utilizadas neste trabalho foram baseadas no mapeamento de Mendonça *et al.* (1980). A partir das cenas foi recortada uma área abrangendo todas as litologias do Grupo Itaitia, e depois a área de cada uma de suas litologias foi extraída separadamente, a fim de avaliar a correlação dos dados na área como um todo e em cada contexto litológico (Figura 2).

Os dois sensores são similares quanto à resolução espectral. Ambos são multiespectrais e abrangem faixas do espectro eletromagnético visível ao infravermelho de ondas curtas. Entretanto, o Landsat-8 também possui duas bandas no infravermelho termal, que não foram avaliadas neste trabalho.

As imagens Landsat-8/OLI são adquiridas em 12 bits (4.096 níveis de cinza) e reamostradas para 16 bits (65.536 níveis de cinza). As imagens Sentinel-2A/MSI também são adquiridas com 12 bits, mas diferentemente das imagens OLI, não são reamostradas para 16 bits. Desse modo, o produto adquirido Sentinel-2A teria 4 bits a menos do que as imagens Landsat-8. Essa grande discrepância nos níveis de cinza entre as imagens não proporciona uma comparação direta honesta, por isso é necessário reamostrá-las para o mesmo número de bits. Assim, as imagens foram reamostradas para 8 bits para serem comparadas.

Outro fator que precisa ser levado em consideração é o espalhamento atmosférico. A atmosfera possui diversos gases em sua composição (CO_2 , O_3 , vapor de água, por exemplo). E esses gases causam distorções da radiação captada pelo sensor. Para amenizar esses efeitos as imagens usadas foram adquiridas em datas próximas, Sentinel-2 em 26 de setembro de 2017 e Landsat-8 em 30 de setembro de 2017. A diferença de apenas quatro dias entre as datas de aquisição das imagens diminuiu as diferenças, pois as condições atmosféricas tendem a ser semelhantes. Além disso, para ambas as imagens, foi aplicada a correção DOS (*Dark Object Subtraction*). Essa técnica se baseia na subtração de um valor de cinza que representaria o espalhamento atmosférico.

Lembrando que o importante não é o refinamento da técnica de correção e sim que ambas as imagens passem pelo mesmo processamento a fim de gerar conjuntos de dados compatíveis para comparação.

Foram aplicadas as razões de bandas 2/11, 8/12, 8A/12 e 11/12 para o sensor MSI e 2/6, 5/7 e 6/7 para o sensor OLI. Miranda (2016) empregou as razões 2/6 para destacar os mármores da Formação Alcantil e 5/7 para os quartzitos da Formação Laranjeiras, ambas empregando o sensor OLI na mesma área em estudo. As bandas do SWIR 6 e 7 (OLI) são comumente usadas para mapeamento de argilominerais (Rowan *et al.*, 1974, Goetz & Rowan, 1981), pois esses grupos minerais apresentam picos de refletância nessa faixa espectral. A razão das bandas 6/7 (OLI) é usada para realçar argilominerais, originalmente definida para o Landsat5 (sensor TM) (Sabins, 1999).

Após o pré-processamento, foi gerada a matriz de correlação entre os pares de bandas que apresentam correspondência espectral entre os dois sensores, comparando-as por meio do Coeficiente de Correlação de Pearson.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi utilizado para avaliar o grau de correspondência linear entre as bandas correspondentes de cada sensor, além das respectivas razões analisadas em cada, variando de -1 (correlação negativa perfeita) a +1 (correlação positiva perfeita), como mostra a Tabela 2.

Valor da Correlação (r)	Interpretação
0.9 a 1.0 (-0.9 a -1.0)	Correlação positiva (negativa) muito forte
0.7 a 0.9 (-0.7 a -0.9)	Correlação positiva (negativa) forte
0.5 a 0.7 (-0.5 a -0.7)	Correlação positiva (negativa) moderada
0.3 a 0.5 (-0.3 a -0.5)	Correlação positiva (negativa) fraca
0.0 a 0.3 (0.0 a -0.3)	Correlação positiva (negativa) desprezível

Tabela 2 Valor da Correção de Pearson (r). Adaptado de Mukaka (2012).

Como as imagens não são da mesma data, embora próximas, podem apresentar pequenas diferenças na radiação solar, espalhamento atmosférico e quantidade de nuvens, gerando pixels *outliers*. Para minimizar este efeito, foi aplicado um filtro linear 2% em cada uma das bandas analisadas, excluindo do histograma os dados correspondentes a 0-2% do limite inferior e 98-100% do limite superior em toda a cena (Mandanici & Bitelli, 2016).

A aplicação destes pré-processamentos foi essencial para comparar de forma mais fidedigna os conjuntos de dados, a fim de analisar o real potencial das imagens Sentinel-2, tendo em vista que as imagens Landsat-8 já são largamente aplicadas em mapeamentos geológicos.

O fluxograma da Figura 3 apresenta os métodos utilizados neste trabalho.

4 Resultados e Discussão

De forma geral, os coeficientes obtidos apresentaram correlação positiva forte a muito forte entre as amostras analisadas, variando entre 0.847 e 0.930 para a área do Grupo Itataia (Tabela 3) e entre 0.942 e 0.989 para as litologias separadas (Tabela 4).

Bandas		
OLI	MSI	Correlação
2	2	0.902248
3	3	0.889383
4	4	0.879098
5	8	0.857667
5	8A	0.886496
6	1	0.930868
7	12	0.925698
Razões		
OLI	MSI	Correlação
2/6	2/11	0.772934
5/7	8/12	0.887867
5/7	8a/12	0.910655
6/7	11/12	0.847425

Tabela 3 Estatísticas das bandas e razões geradas com as bandas dos sensores OLI e MSI para a área do Grupo Itataia

Bandas		Unidades Litoestratigráficas			
OLI	MSI	Correlação			
		Fm. Alcantil	Fm. Laranjeiras	Fm. Barrigas	Fm. Serra do Céu
2	2	0.981310	0.959393	0.968720	0.957848
3	3	0.973618	0.942857	0.958594	0.946800
4	4	0.971753	0.945583	0.953814	0.956246
5	8	0.966947	0.949485	0.950504	0.950239
5	8A	0.975175	0.956474	0.961994	0.957545
6	11	0.989183	0.963552	0.979980	0.971295
7	12	0.987002	0.965776	0.975736	0.967708
Razões		Unidades Litoestratigráficas			
OLI	MSI	Correlação			
		Fm. Alcantil	Fm. Laranjeiras	Fm. Barrigas	Fm. Serra do Céu
2/6	2/11	0.986226	0.926933	0.966015	0.918365
5/7	8/12	0.975172	0.880057	0.956651	0.917936
5/7	8A/12	0.982324	0.882924	0.968596	0.926085
6/7	11/12	0.996281	0.956141	0.991943	0.966210

Tabela 4 Estatísticas das bandas e razões geradas com as bandas dos sensores OLI e MSI para as litologias separadas

Na porção do visível, a variação da correlação entre as bandas é mínima, com as bandas do azul apresentando correlação mais forte (0.981). A menor correlação das bandas do vermelho (0.889) e do verde (0.879), ainda que seja forte, pode ser explicada pelo fato de que estas respectivas bandas apresentam menores faixas espectrais na Sentinel-2, sendo mais restritivas. A menor diferença espectral entre os sensores está na faixa do azul (Figura 4).

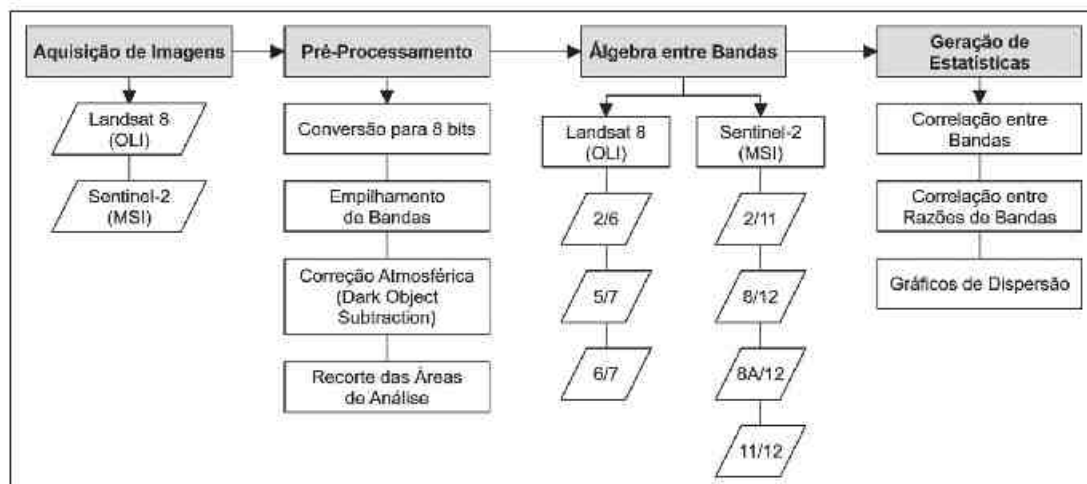


Figura 3 Fluxograma com os métodos utilizados

A banda do NIR apresenta a menor correlação entre as bandas, ainda que seja forte. Foram analisadas tanto a banda 8 como 8A do sensor MSI em relação à banda 5 do OLI. A banda 8A apresenta melhor correlação com a 5 da Landsat-8, confirmando os resultados obtidos por Mandanici & Bitelli (2016), pois está contida no seu intervalo espectral. Já a banda 8 MSI apresenta um intervalo espectral maior que a banda 5 OLI, apresentando melhor correlação com a NIR dos sensores antigos dos satélites Landsat (TM e ETM+) (Mandanici & Bitelli, 2016).

Estatisticamente, a banda 8A MSI seria mais apropriada a ser utilizada de forma correlata a processamentos digitais de imagens que envolvam a banda 5 OLI. Porém, ela tem como desvantagem uma menor resolução espacial, com pixel com 20m. A banda 8 MSI apresenta pixel com 10m. Assim, para estudos mais regionais, a banda 8A poderia ser adotada. Já a banda 8 poderia ser aplicada para estudos em escala de maior detalhe, a depender dos objetivos do trabalho realizado. Conforme Shimabukuro & Ponzoni (2017), quanto menor a resolução espacial de um sensor, menores também as chances de encontrar pixels puros. Desta forma, imagens Sentinel-2 têm uma tendência a minimizar a mistura espectral, definindo melhor os alvos desejados.

As bandas do SWIR apresentam as correlações mais fortes entre os sensores, com 0.989 no

SWIR 1 e 0.987 no SWIR 2. Isso se deve ao fato de que estas bandas MSI apresentam a menor variação de faixa espectral, em relação as bandas OLI, entre todas as bandas analisadas. Este fato confirma ainda mais a possibilidade de aplicação da Sentinel-2 para estudos geológicos, uma vez que este intervalo espectral é caracterizado por feições de absorção da radiação eletromagnética de muitos grupos minerais, e ainda com a vantagem de ter bandas com 20 metros de resolução espacial em relação aos 30 metros da Landsat-8, possibilitando a aplicação em trabalhos de mapeamento geológicos com escalas de maior detalhe, conforme citado anteriormente.

Todas as bandas de ambos os sensores (MSI e OLI) foram reamostradas para pixels com 10 metros afim de montar matrizes de tamanhos iguais para a comparação. As imagens do satélite Landsat-8 possuem um pixel de 30 metros, onde mesmo fragmentando o pixel para 10 metros, todos os que eram de 30 metros foram quebrados em 9 pixels de 10 metros com o mesmo valor de DN do pixel original. Por isso, quando são geradas composições coloridas RGBs ou mesmo imagens em *grayscale* (tons de cinza), não é possível visualizar na imagem essa diferença. Diferente da Sentinel-2 que tem o pixel de 10 metros e cada pixel com um DN diferente. O mesmo ocorre nas bandas SWIR da Sentinel de 20

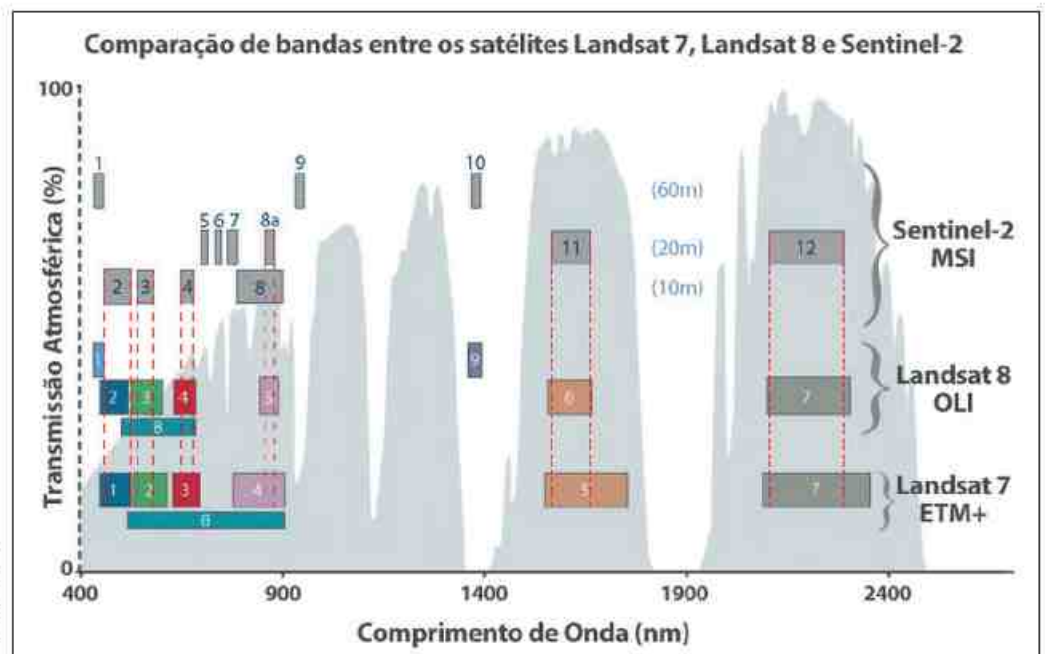


Figura 4 Comparação de bandas entre os sensores ETM+, OLI e MSI, modificado de USGS/NASA (2018)

metros que são reamostradas para 10 metros. Por isso ocorre uma leve dispersão quando as estatísticas são analisadas. Não é o dado espectral e sim a resolução espacial o fator limitante da análise.

A razões apresentaram coeficientes ligeiramente mais baixos do que as bandas, entre 0.772 e 0.996, mesmo essa correlação sendo considerada forte. Meneses & Almeida (2012) falam que a razão de bandas é a operação aritmética usada para extrair informações de imagens de sensores multispectrais. Ela se baseia em parâmetros dos aspectos físicos do sensor e no comportamento da reflectância dos alvos para discriminar sutis variações, como um tipo de litologia, solo ou vegetação. Por esses fatores os coeficientes obtidos nas razões foram relativamente baixos em relação com os obtidos entre as bandas, tendo em vista que a razão de bandas realça ou “amplifica” justamente as diferenças das bandas, também levando em consideração os tamanhos dos pixels como já citado anteriormente. Por exemplo, na comparação da razão de bandas entre Azul e SWIR1,

respectivamente 2/6 (OLI) e 2/11(MSI), tem-se tamanhos de pixels diferentes (30 metros nas bandas do OLI; e 10 e 20 metros das bandas do MSI) que foram reamostradas para 10 metros. Desta forma, uma menor diferença de resolução espacial original entre as bandas de uma operação de divisão implica, em geral, em uma maior correlação entre as razões de diferentes sensores.

A Figura 5 apresenta os gráficos de dispersão da comparação entre bandas e razões dos sensores MSI e OLI. A observação dos gráficos de dispersão deixa claro o quão correspondente são as bandas de ambos os sensores. O leve espalhamento dos dados pode ser atribuído a diferenças de condições atmosféricas, pois as imagens foram coletadas com um intervalo de 4 dias, e às próprias especificidades dos sensores. Nos gráficos de dispersão das razões nota-se um maior espalhamento dos dados devido ao realce das diferenças de resolução espacial das bandas, além das especificidades dos sensores como já mencionado anteriormente.

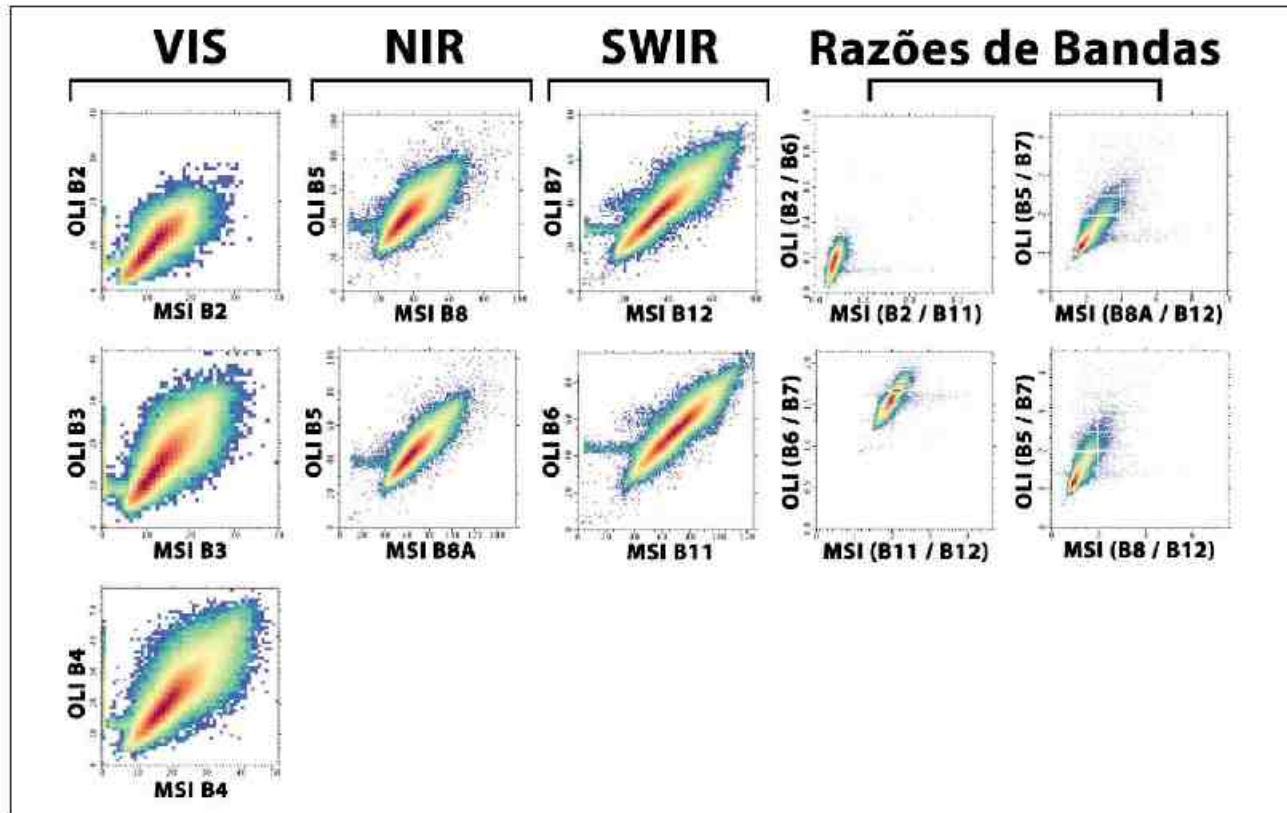


Figura 5 Gráficos de dispersão comparando as bandas dos sensores MSI e OLI e suas razões

A Figura 6 apresenta as razões 2/6 do sensor OLI e 2/11 do sensor MSI, usadas na comparação estatística da Tabela 4, em pseudocor. Essas razões foram escolhidas pois destacaram os mármores Formação Alcantil do Grupo Itaitaia. As razões da Figura 6 (A, B) estão sobrepostas pelo contorno dos mármores mapeados por Mendonça *et al.* (1980). Nota-se, na Figura 6 (B), que a razão 2/11 MSI apresentou uma melhor delimitação dos contatos dos mármores em relação a razão 2/6 OLI. Isso se deve pela melhor resolução espacial das bandas do sensor MSI em que

é possível apresentar os corpos rochosos em maior detalhe ajudando na delimitação de seus contatos.

O ganho para região de Itaitaia ao utilizar as imagens Sentinel-2A para destacar os mármores da Formação Alcantil, em maior detalhe, se deve pelo fato dessa formação ser a hospedeira da mineralização fósforo-urifera (colofanito). Assim, ao obter-se um melhor detalhamento na delimitação dos limites dos mármores com as demais litologias da região por meio de imagens, facilita o mapeamento geológico em campo, voltado à prospecção mineral do colofanito.

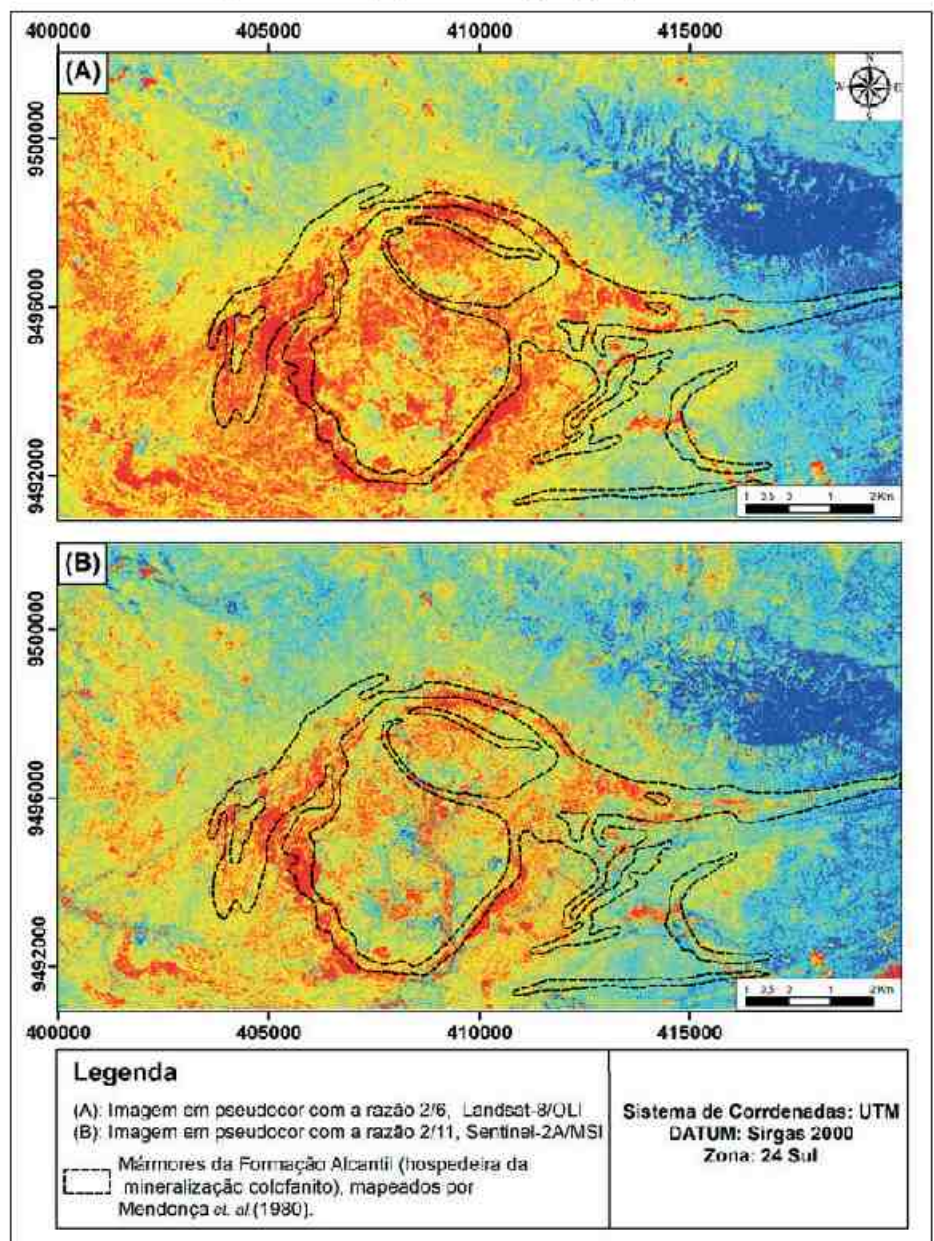


Figura 6 Razão 2/6 do sensor OLI (A) e razão 2/11 do sensor MSI (B), destacando os mármores da Formação Alcantil sobrepostas pelo contorno dos mármores mapeados por Mendonça *et al.* (1980).

5 Conclusão

As imagens Sentinel-2 analisadas nesse trabalho apresentaram forte correlação com as imagens do Landsat-8, com coeficientes de Pearson variando entre 0.857 e 0.930. As razões de bandas apresentaram um coeficiente menor, variando entre 0.772 e 0.910, devendo-se ao fato de que a razão de bandas é uma técnica que realça as diferenças das bandas utilizadas. Os coeficientes mais altos se deram justamente nas bandas e razões entre bandas utilizando o SWIR, as bandas 6 (OLI) e 11 (MSI) com uma correlação de 0.989, e as bandas 7(OLI) e 12(MSI) com 0.987, e a razão com maior coeficiente foi a 6/7 (OLI) e 11/12(MSI) com 0.996. Essa forte correlação com as bandas do SWIR de ambos os sensores, isso pode ser explicado pelo fato da largura de faixa espectral dessas bandas dos sensores MSI e OLI possuir maior similaridade em relação as demais bandas dos sensores.

Com esses resultados do coeficiente de Pearson apresentar maiores valores entre as bandas do infravermelho de ondas curtas, fica claro que as imagens Sentinel-2A, assim como as imagens Landsat, apresentam empregabilidade para fins de mapeamento geológico, com uma vantagem, sua maior resolução espacial, o que permite o uso em trabalhos de campo em áreas que necessitem uma escala de maior detalhe.

Em suma, pôde-se atestar a viabilidade da aplicação das bandas do sensor MSI em abordagens geológicas, pois suas bandas e razões entre bandas apresentação altas correlações com as suas correspondentes do satélite Landsat-8, cujos produtos já possuem farta literatura neste contexto. O diferencial da melhor resolução espacial das imagens Sentinel-2 proporciona o emprego dessas imagens em trabalhos de mapeamento em escala de maior detalhe auxiliando a delimitação do contato entre litologias.

6 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

7 Referências

- Almeida, FFM, Hasui, Y., de Brito Neves, B.B., & Fuck, R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2): 1-29.
- Al-Nahmi, F., Saddiqi, O., Hilali, A., Rhimane, H., Baïdder, L., & Khanbari, K. 2017. Application of remote sensing in geological mapping, case study Al Maghrabah area-Hajjah region, Yemen. *Isprs Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4: 63-71.
- Arthaud, M.H. 2007. *Evolução Neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Tese de doutorado, p 132.
- Arthaud, M.H., Caby, R., Fuck, R.A., Dantas, E.L., & Parente, C.V. 2008. Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. *Geological Society, London, Special Publications*, 294(1): 49-67.
- Arthaud, M.H., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Santos, T.J.S., Caby, R., & Armstrong, R. 2015. The Neoproterozoic Ceará Group, Ceará Central domain, NE Brazil: Depositional age and provenance of detrital material. New insights from U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 58(1): 223-237.
- Brito Neves, B.B., Santos, E.D., & Van Schmus, W.R. 2000. Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil. *Tectonic Evolution of South America*, 1: 151-182.
- Castro, N.A. 2005. *Evolução Geológica Proterozóica da Região entre Madalena e Tapera, Domínio Tectônico Ceará Central (Província Borborema)*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de doutorado, 221p.
- Cavalcante, J.C., Vasconcelos, A.M., Medeiros, M.F., Paiva, I.P., Gomes, F.E.M., Cavalcante, S.N., Cavalcante, J.E., Melo, A.C.R., Duarte Neto, V.C., & Benevides, H.C., 2003. Mapa Geológico do Estado do Ceará - CPRM-SGB Serviço Geológico do Brasil, Fortaleza 1 mapa. 80 cm x 120cm Escala 1:500.000.
- Crósta, A.P., & Moore, J.M. 1989. Geological mapping using Landsat Thematic Mapper Imagery in Almeria Province, Se Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 10(3): 505-514.
- Crósta, A.P. 1992. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Campinas, IG-UNICAMP. 170p.
- Crósta, A.P. 1993. Caracterização espectral de minerais de Interesse-prospecção mineral e sua utilização em processamento digital de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, Curitiba, 1993. Artigo completo, Curitiba, INPE, p. 202-209.
- D'Odorico, P., Gonsamo, A., Damm, A., & Schaepman, M.E. 2013. Experimental evaluation of Sentinel-2 spectral response functions for NDVI time-series continuity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51: 1336-1348.
- ESA. 2018. European Spatial Agency. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>> Acesso em: 22 mar. 2018.

- Ge, W., Cheng, Q., Tang, Y., Jing, L., & Gao, C. 2018. Lithological classification using sentinel-2A data in the Shibanzijing ophiolite complex in inner Mongolia, China. *Remote Sensing*, 10 (4): 638-660
- Goetz, A. F.H., Rock, B.N., & Rowan, L.C. 1983 Remote Sensing for Exploration: An Overview. *Economic Geology*, 78(4), 573 – 590.
- Ibrahim, E., Barnabé, P., Ramanaidou, E., & Pirard, E. 2018. Mapping mineral chemistry of a lateritic outcrop in New Caledonia through generalized regression using Sentinel-2 and field reflectance spectra. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73: 653-665.
- INB. 2018. Indústrias Nucleares do Brasil. Disponível em: http://www.inb.gov.br/inb/webforms/interna.aspx?secao_id=52. Acesso em: 15 mar 2018.
- Liu, W.T.H. 2007. *Aplicações de sensoriamento remoto*. Campo Grande, MS: Uniderp. 881 p
- Mandanici, E., & Bitelli, G. 2016. Preliminary comparison of sentinel-2 and landsat 8 imagery for a combined use. *Remote Sensing*, 8(12): 1014 -1025
- Medeiros, V.C.D., Medeiros, W.E.D., & Sá, E.F.J.D. 2011. Utilização de imagens aerogamaespectrométricas, Landsat 7 ETM+ e aeromagnéticas no estudo do arcabouço crustal da porção central do domínio da zona transversal, província Borborema, NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29(1): 83-97.
- Mendonça, J.C.G.S., Braga, A.P.G., & Campos, M. 1980. Considerações sobre a mineralização fósforo-uranífera da jazida de Itaitaia-CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Camboriú, 1980. Artigo completo, Camboriú, SBG, p. 2472-2486.
- Meneses, P.R., & Almeida, T.D. (2012). *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Brasília: UnB, p. 266.
- Miranda, M.P., Pontes, M.P., de Moraes, P.Â.S., Uchoa, E.B., Duarte, C.R., & Souto, M.V.S. 201). Emprego de Técnicas de Processamento Digital em Imagens Landsat 8 Para Mapeamento Geológico. *Revista de Geologia*, 29(1): 71 - 80
- Miranda, M.P. 2016. *Emprego de Sensoriamento Remoto e Gamaespectrometria na Avaliação da Mineralização Fósforo-Uranífera de Itaitaia-CE*. Universidade Federal do Ceará, Trabalho de Conclusão de Curso, 64 p.
- Mukaka, M.M. 2012. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*, 24(3): 69-71.
- Novo, E.M.L.M. 2010. *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações* 4 ed São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 387 p.
- Oliveira, J.F., & Cavalcante, J.C., 1993. Mombaça, Folha SB. 24-V-D-V, Estado do Ceará, Texto Explicativo DNPM, Brasília-DF, 200p.
- Osako, L.S. 1999. *Estudo do potencial mineral do depósito uranífero de Lagoa Real, BA, com base em dados geológicos, aerogeofísicos e sensoriamento remoto*. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 93p.
- Rowan, L.C., Wetlaufer, P.H., Goetz, A.F.H., & Stewart, J.H. (1976). *Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in south-central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS images*. U.S. Geological Survey Professional Paper 883, 35p.
- Sabins, F.F. 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14(3-4): 157-183.
- Shimabukuro, Y.E., Ponzoni, F.J. *Mistura espectral*. 2017. *Mistura espectral: modelo linear e aplicações*. São Paulo, Oficina de Textos, 128p
- Torres, P.F.M., Cavalcante, J.C., Forgiarini, L.L., Palheta, E.S.M., & Vasconcelos, A.M., 2007. Mapa geológico da Folha Quixadá- SB 24.V.B. 1 mapa: 80 cm x 120 cm. Escala 1:250.000
- Uchoa, E.B. 2016. *Integração de dados multifonte com base em lógica fuzzy na modelagem prospectiva do depósito de ferro de Quiterianópolis/CE*. Curso de Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Dissertação de Mestrado, 118p
- USGS/NASA. 2018 United States Geological Survey/National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/sentinel-2a-launches-our-complements-our-complements/> acesso em: 20 mar 2018 e 19 out 2018
- Van der Meer, F.D., Van der Werff, H.M.A., & Van Ruitenbeek, F.J.A. 2014. Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote sensing of environment*, 148: 124-133.
- Van der Werff, H., & Van der Meer, F. 2015. Sentinel-2 for mapping iron absorption feature parameters. *Remote sensing*, 7(10): 12635-12653
- Van der Werff, H., & Van Der Meer, F. 2016. Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI provide data continuity for geological remote sensing. *Remote sensing*, 8(11): 883-889.