

PROSPECÇÃO DE AMETISTAS: UTILIZAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DE ÁREAS POTENCIAIS DE MINERAÇÃO NO SUDOESTE DO RIO GRANDE DO SUL

Breno Mello Pereira

Técnico em Geoprocessamento - IFRS
Graduando em Engenharia Geológica - UFPel
E-mail: brenomello178@gmail.com

Miguel da Guia Albuquerque

Graduação em Geografia Bacharelado – UECE; Mestre em Oceanografia Física, Química e Geológica – FURG; Doutor em Geociências – UFRGS
Professor do IFRS – Campus Rio Grande
E-mail: migueldaguia@gmail.com

Jean Marcel de Almeida Espinoza

Graduação em Física e Física Médica – FURG; Mestre e Doutor em Sensoriamento Remoto – UFRGS
Professor do IFSC – Campus Caçador
E-mail: espinoza.almeida@gmail.com

RESUMO

Esse estudo teve como objetivo a utilização do sensoriamento remoto baseado na coleta de imagens do sensor orbital ASTER/Terra, na prospecção de potenciais áreas de mineração de ametistas no sudoeste do Rio Grande do Sul. A localidade de estudo foi escolhida tendo em vista as descobertas feitas pelo Serviço Geológico do Brasil em 2021, o qual tratava da busca de novas áreas propícias à formação de ametistas ao longo da extensão da região de *Los Catalanes*, no Uruguai, a qual é adjacente à fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul com os municípios de Quaraí e Santana do Livramento. A metodologia fundamentou-se na aplicação do método de classificação *Spectral Angle Mapper* (SAM) em imagens do sensor ASTER, o qual verifica a semelhança entre as assinaturas espectrais de alvos de referência e dos *pixels* de uma imagem. O método SAM foi selecionado dentre as opções disponíveis, a exemplo da transformação MNF, *Linear Spectral Unmixing*, *Spectral Information Divergence*, dentre outros métodos, por se tratar de um algoritmo de solução robusta e fácil aplicação, com resultados reconhecidos na literatura. Os valores do SAM são expressos em ângulos, a fim de que quanto menor for o ângulo para o pixel classificado, maior será sua similaridade espectral com a amostra de referência e, por conseguinte maior a possibilidade de o *pixel* conter aquele mineral em foco. Como resultado foi observado que 13,275 hectares de área apresentaram probabilidade de ocorrência de ametista entre 66,66% e 72,52%. Em relação ao padrão espacial para identificação das maiores probabilidades de ocorrência de ametistas, estas ocorrem pela sobreposição do basalto, malaquita e quartzo, materiais os quais sua presença é associada diretamente à ametista, e que se encontram em percentuais acima de concentrações médias já encontradas em outras jazidas. A metodologia empregada neste estudo se mostrou como uma excelente alternativa no apoio à prospecção geofísica de ametistas. Por fim, a partir dos produtos gerados ao final deste estudo espera-se produzir subsídios a outros projetos acerca da prospecção de ametistas no Rio Grande do Sul.

PALAVRAS-CHAVE: Prospecção geológica; imagens ASTER; técnica SAM.

AMETHYST PROSPECTION: USE OF REMOTE SENSING IN THE STUDY OF POTENTIAL MINING AREAS IN THE SOUTHWEST OF RIO GRANDE DO SUL

ABSTRACT

This study aims to use remote sensing based on the collection of ASTER orbital sensor images, in the prospection of potential amethyst mining areas in the southwest Rio Grande do Sul. The study location was chosen in view of the discoveries made by the Brazilian Geological Survey in 2021, which dealt with the search for new areas conducive to the formation of amethysts along the extension of Los Catalanes region, in Uruguay, which is adjacent to the border of southwest Rio Grande do Sul with the municipalities of Quaraí and Santana do Livramento. The methodology is based on the Spectral Angle Mapper (SAM) classification in ASTER sensor images, which verifies the similarity between the spectral signatures of reference targets and the pixels of an image. The SAM method was selected among the available options, such as MNF transformation, Linear Spectral Unmixing, Spectral Information Divergence, among other methods, because it is an algorithm with a robust solution and easy application, with results recognized in the literature. The SAM values are expressed in angles, so that the smaller the angle for the classified pixel, the greater its spectral similarity with the reference sample and, therefore, the greater possibility that the pixel contains that mineral in focus. As a result, it was observed that 13,275 hectares of area had a probability of amethyst occurrence between 66.66% and 72.52%. Regarding the spatial pattern for identifying the highest probability of amethysts occurrence, these occur due to overlapping of basalt, malachite and quartz, materials whose presence is directly associated with amethyst, and which are found in percentages above the average concentrations already founder in other deposits. The methodology used in this study proved to be an excellent alternative to support the geophysical prospecting of amethysts. Finally, from the products generated at the end of this study, it is expected to produce subsidies for other projects about the prospection of amethysts at Rio Grande do Sul.

76

KEYWORDS: Geological prospecting; ASTER images; SAM technique.

INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul é considerado um dos mais importantes produtores de ametistas do Brasil, sendo que a maior parte das ocorrências está concentrada na região do Médio Alto Uruguai (ALBERTI *et al.*, 2003). No restante do estado as jazidas são pouco conhecidas sob o ponto de vista geológico, tendo como consequência o baixo grau de aproveitamento econômico. Em agosto de 2021, o Serviço Geológico do Brasil - SGB, por meio de pesquisas de campo e da aplicação de métodos de prospecção geofísica, divulgou a pesquisa “Projeto Ametista”. O informativo tratava dos jazimentos do distrito gemológico de *Los Catalanes*, no Uruguai, os quais se estendem para as áreas de municípios que fazem fronteira com a região oeste do estado do Rio Grande do Sul.

Os municípios da fronteira gaúcha não exploram o potencial econômico da região, enquanto que, do outro lado da fronteira, os vizinhos uruguaios já exploram as jazidas há mais de 50 anos. Dados do Serviço Geológico do Brasil apontam uma produção de 1.689 toneladas de ametista por

ano no lado uruguaio da fronteira (BERGMANN *et al.*, 2020). Tendo em vista que a geologia desconhece limites territoriais políticos, estima-se que o potencial prospectivo seja semelhante ao do lado gaúcho (BERGMANN *et al.*, 2020).

Segundo Zeinelabdein *et al.* (2020), as atividades de prospecção mineral têm aumentado nas últimas décadas. Cada vez mais o setor tem demandado por ferramentas e técnicas que auxiliam na rápida identificação de uma jazida, de forma rápida e com custos reduzidos. Nesse sentido, o sensoriamento remoto tem sido visto como uma ferramenta capaz de auxiliar essas demandas provenientes da mineração.

Nos últimos anos, imagens obtidas por sensores remotos tem se constituído em uma ferramenta poderosa, sendo usadas para exploração mineral em duas aplicações: (1) mapear a geologia e as falhas e fraturas que localizam os depósitos de minério; (2) reconhecer rochas alteradas hidrotermicamente por suas assinaturas espectrais (SABINS, 1999). No que se refere ao sensoriamento remoto, parte da consolidação desta abordagem, como ferramenta de prospecção mineral, se deu com o advento do sensor orbital ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo da plataforma orbital Terra.

O sensor ASTER representou um avanço, em termos de resolução espectral, quando comparado ao instrumento *Thematic Mapper* (e.g., sensor multiespectral da plataforma LANDSAT-5). Esse avanço se firmou pelo sensor ASTER ser um sistema desenvolvido especificamente para a pesquisa geológica, possuindo bandas espectrais no infravermelho médio e termal devidamente posicionadas nas faixas espectrais de resposta dos principais alvos minerais da Terra.

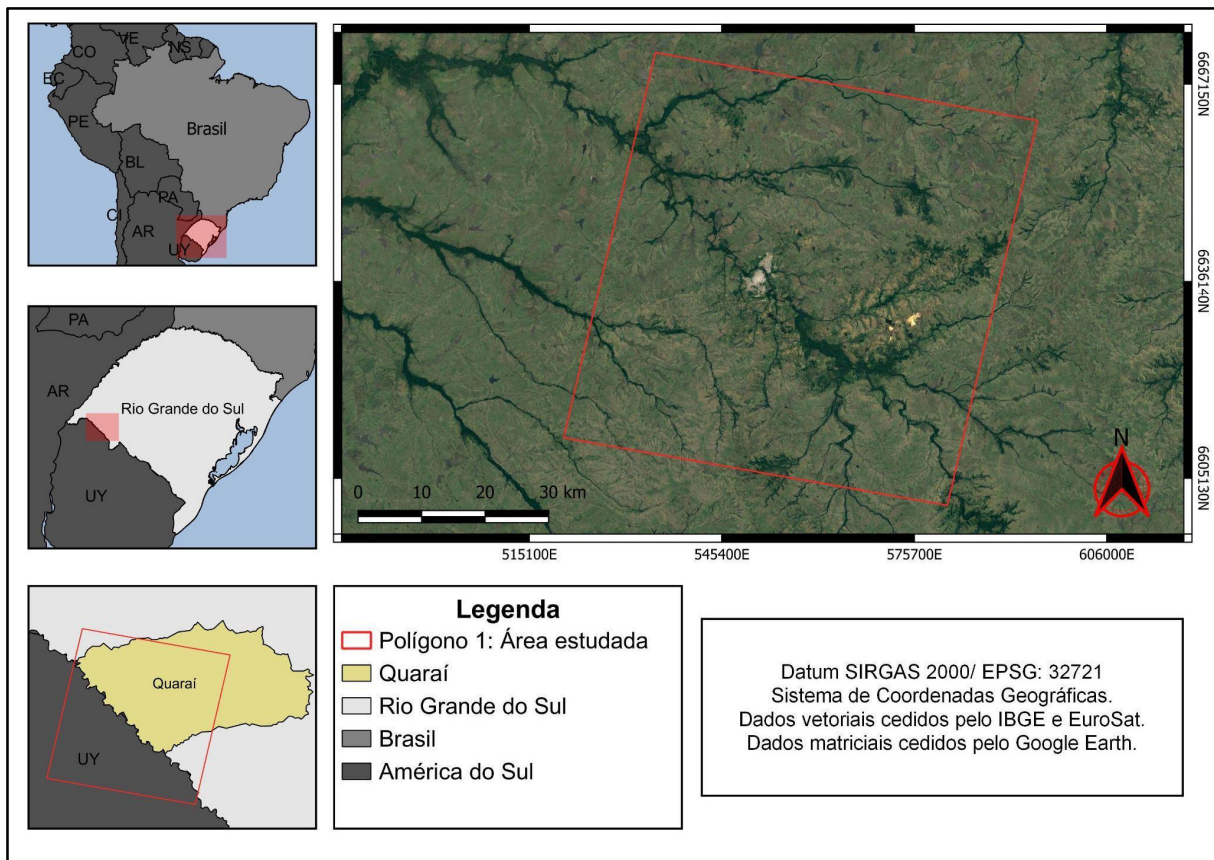
Em termos de aplicações práticas, Crósta *et al.* (2002) empregaram imagens ASTER na classificação da probabilidade da presença de alterações hidrotermais, associada a depósitos de ouro. Espinoza *et al.* (2015) destacam que outros estudos têm trabalhado em função da aquisição da resposta espectral do conjunto rocha-solo-água, no contexto de alterações que caracterizem áreas aptas à exploração mineral.

O declínio do número de depósitos minerais recém-descobertos e o aumento da demanda por diferentes minerais nos últimos anos levaram os geólogos de exploração a buscar métodos mais eficientes e inovadores para o processamento de diferentes tipos de dados em cada etapa da exploração mineral (SHIRMARD *et al.*, 2022). Nesse contexto, o objetivo deste estudo é a utilização do sensoriamento remoto no auxílio a identificação de áreas com elevado potencial de prospecção de ametistas no sudoeste do Rio Grande do Sul.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) inclui-se no contexto geológico da Bacia Paraná, sendo localizada em uma porção da Formação Serra Geral e de idade Cretácea (BERGMANN *et al.*, 2020). A localidade é caracterizada por derrames basálticos e andesíticos de afinidade toleítica, incluindo o distrito mineiro de Quaraí e o distrito gemológico de *Los Catalanes*. Esta província vulcânica é amplamente reconhecida como uma das maiores manifestações de vulcanismo de caráter continental do mundo, sendo associada diretamente à produção de ametistas (BERGMANN *et al.*, 2020).

Figura 1 - Mapa da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Bacia Paraná é uma extensa unidade geotectônica distribuída entre os continentes Sul-Americano e Africano, formada por um espesso pacote de rochas vulcânicas e sedimentares, depositadas sobre o Escudo Brasileiro do Paleozóico ao Cretáceo (ZALÁN *et al.*, 1991). Sua formação deu-se na forma de depressões alongadas de direção NE-SW, segundo a trama do substrato

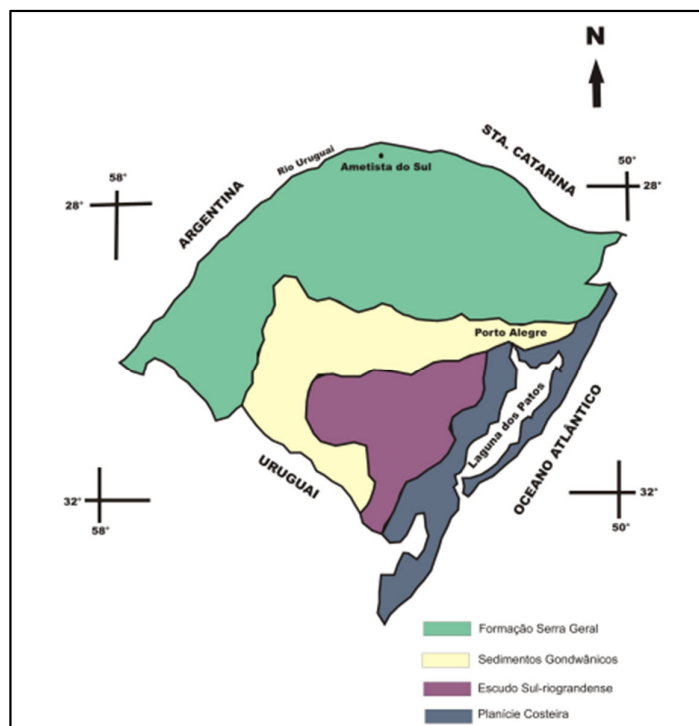
pré-cambriano (MILANI, 1997).

De forma geral, de acordo com Milani (1997) a Bacia do Paraná foi desenvolvida no interior do Gondwana, sendo composta por seis unidades, denominadas por “Superseqüências”: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). As três primeiras têm decorrências sedimentares que definem ciclos transgressivo-regressivos ligados às variações do nível relativo do mar no Paleozóico, enquanto as outras quatro correspondem a pacotes continentais com rochas vulcânicas geradas após o fechamento do Gondwana para as incursões marinhas.

As rochas que formam a Bacia do Paraná apresentam uma composição mineralógica pouco variada, sendo compostas principalmente por Plagioclásios, Clinopiroxênios, Ti-magnetitas e Olivinas, envoltas em uma composição ácida (ESPINOZA *et al.*, 2015). Segundo Gomes (1996), A mineralogia dos derrames basálticos do Tipo I apresentam uma textura micro-porfirítica com a presença de microfenocristais de Plagioclásios e augita, apresentando alivina completamente alterada nas proximidades dos geodos (i.e., cavidade oca no interior do corpo de uma rocha, geralmente preenchido por cristais).

No caso da evolução geológica da Bacia do Paraná (Figura 2), esta foi complexa e controlada por fatores tectônicos e climáticos. Enquanto na Era Paleozóica houve a deposição de três seqüências sedimentares de caráter transgressivo-regressivo, a primeira controlada por variações do nível do mar, a segunda pela glaciação e a terceira por movimentações tectônicas, no Mesozóico ele foi ditado por duas seqüências sedimentares continentais, uma de ambiente desértico e outra de ambiente fluvial/eólica intercaladas por espesso pacote de rochas basálticas (AMORIM, 2007). A origem desses derrames basálticos está diretamente relacionada à Formação Serra Geral e aos processos tectônicos responsáveis pela ruptura do Gondwana, o que gerou intenso vulcanismo fissural (MILANI *et al.*, 1997).

Figura 2 - Mapa do Rio Grande do Sul com suas principais unidades geológicas.



Fonte: AMORIM (2007).

Em termos gerais, a estratigrafia química das rochas vulcânicas basálticas no Rio Grande do Sul apresenta predominância de rochas com baixo Ti (GOMES, 1996). Para a região de Santana do Livramento e Quaraí, Gomes (*Op cit.*) destaca a presença de magmas característicos com teores intermediários de Ti, classificados como do tipo Pitinga e Paranapanema, com estratigrafia fortemente correlacionada a processos físicos de evolução.

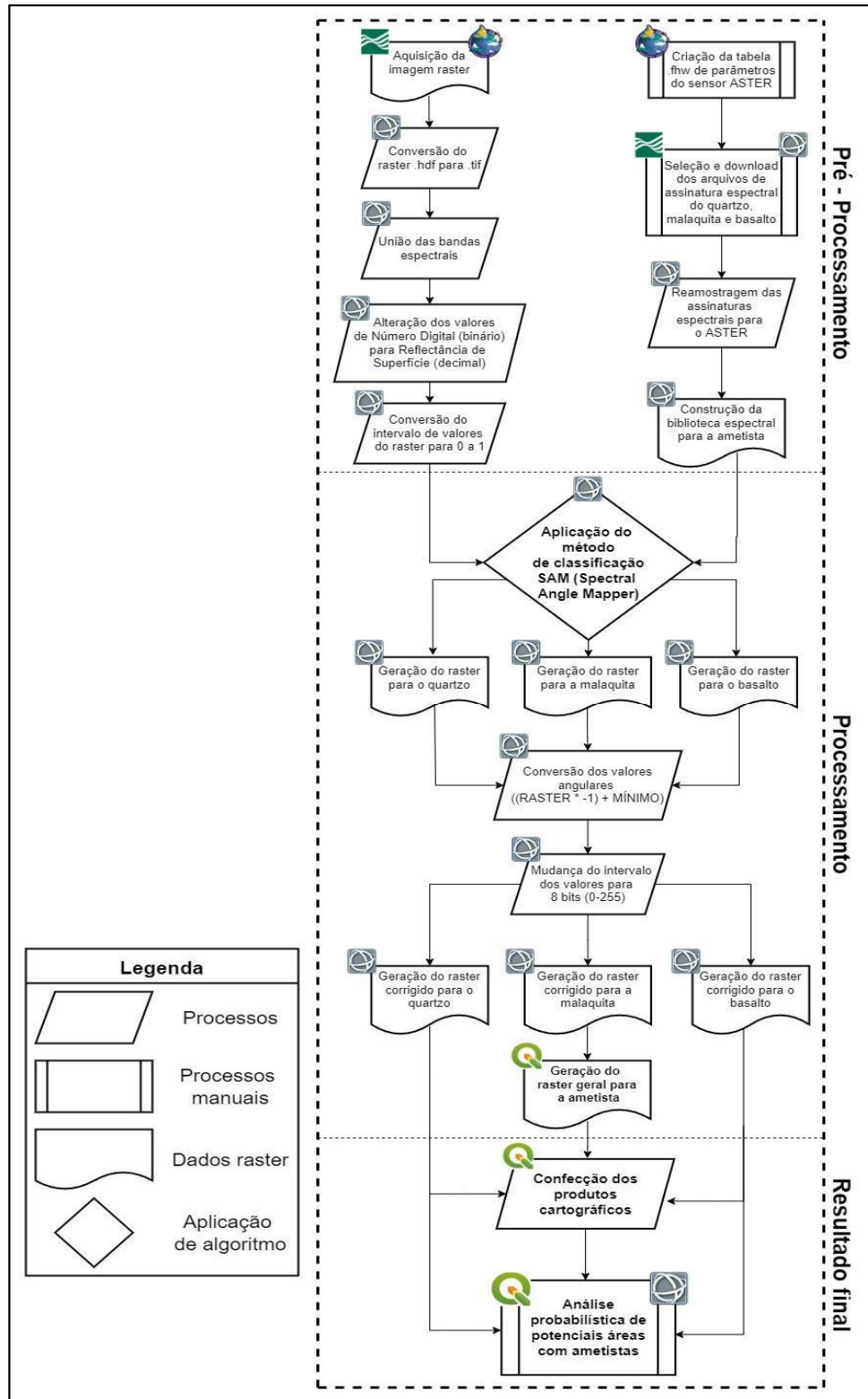
MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste estudo fundamentou-se na abordagem da identificação automática das áreas de maior probabilidade de ocorrência de mineralização de Ametistas. Isso foi feito pela aplicação da classificação *Spectral Angle Mapper* (SAM) para os minerais e rochas associados a presença de Ametistas: quartzo, malaquita e basalto. Esse método se baseia na comparação entre o padrão de interação da radiação eletromagnética de um dado alvo de interesse com as leituras da interação da radiação eletromagnética presentes em cada unidade de uma imagem coletada por um sensor. Com isso, se verifica a semelhança entre as assinaturas espectrais de alvos de referência, e as assinaturas espectrais dos pixels de uma imagem, definindo a presença (por probabilidade) de um

dado alvo (KRUSE, 1993).

Em relação ao tratamento das imagens coletadas pelos sensores a bordo de satélites aqui utilizados, foram executados o pré-processamento e o processamento dos dados com o *software* ENVI 5.0, que é um *software* com foco em ferramentas para processamento e análise de imagens multiespectrais e hiperespectrais coletadas por sensores satelitais. A seguir é apresentado um fluxograma metodológico (Figura 3), descrevendo todos os procedimentos realizados para o desenvolvimento deste estudo.

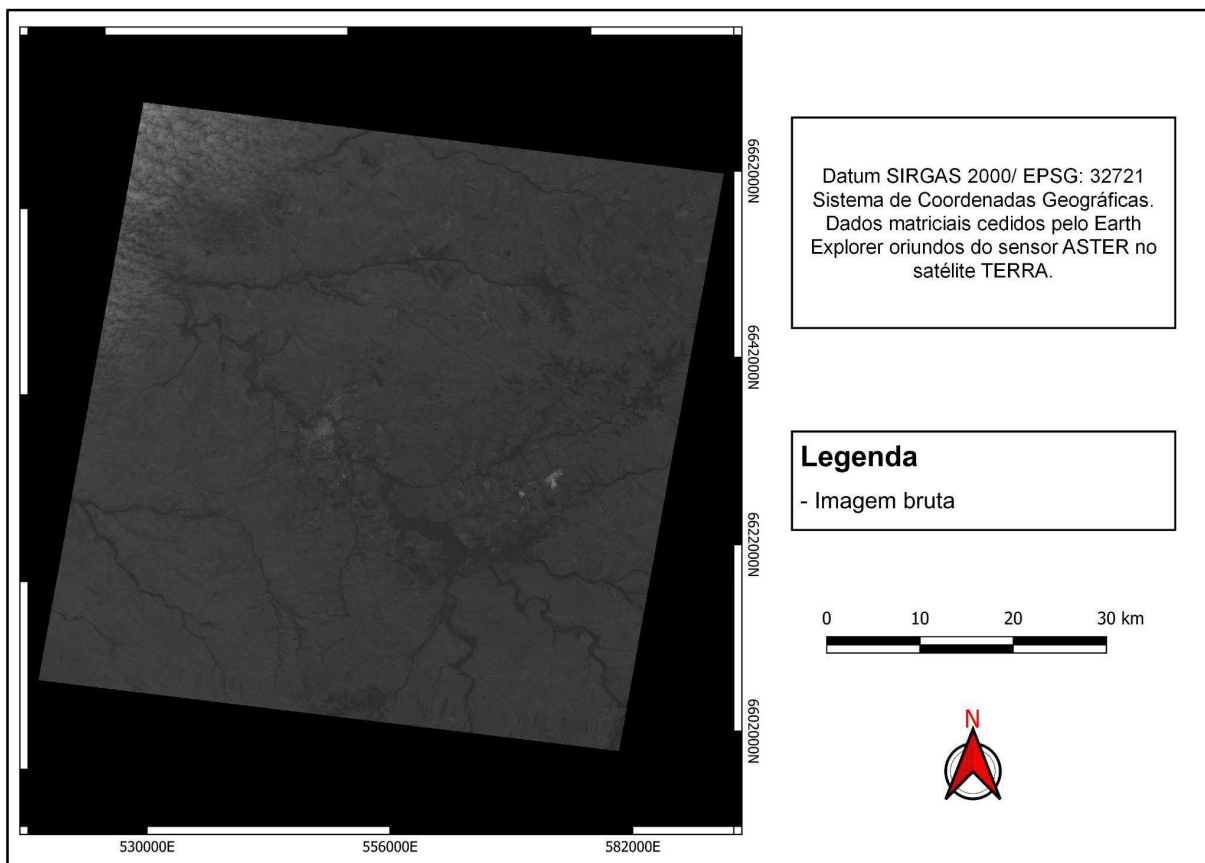
Figura 3 - Fluxograma metodológico.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A aquisição da imagem proveniente do sensor ASTER (Figura 4), presente no satélite TERRA (EOS-AM1), se deu pelo repositório eletrônico mantido pelo USGS (i.e.: <https://www.usgs.gov/labs/spectroscopy-lab/science/spectral-library>) da *United States Geological Survey*, que é uma instituição científica multidisciplinar com foco em estudos de topografia, geologia e recursos naturais, subordinada ao governo dos Estados Unidos. Quando são obtidas no nível de processamento L1T, as imagens vêm codificadas em valores de Número Digital (DN). No caso do satélite Terra, o sensor ASTER captura imagens de resolução radiométrica de 8 bits, o que significa que esse DN tem valores de 0 a 255.

Figura 4 - Imagem bruta proveniente do sensor ASTER sem pré-processamentos aplicados.



Fonte: Elaborado pelos autores.

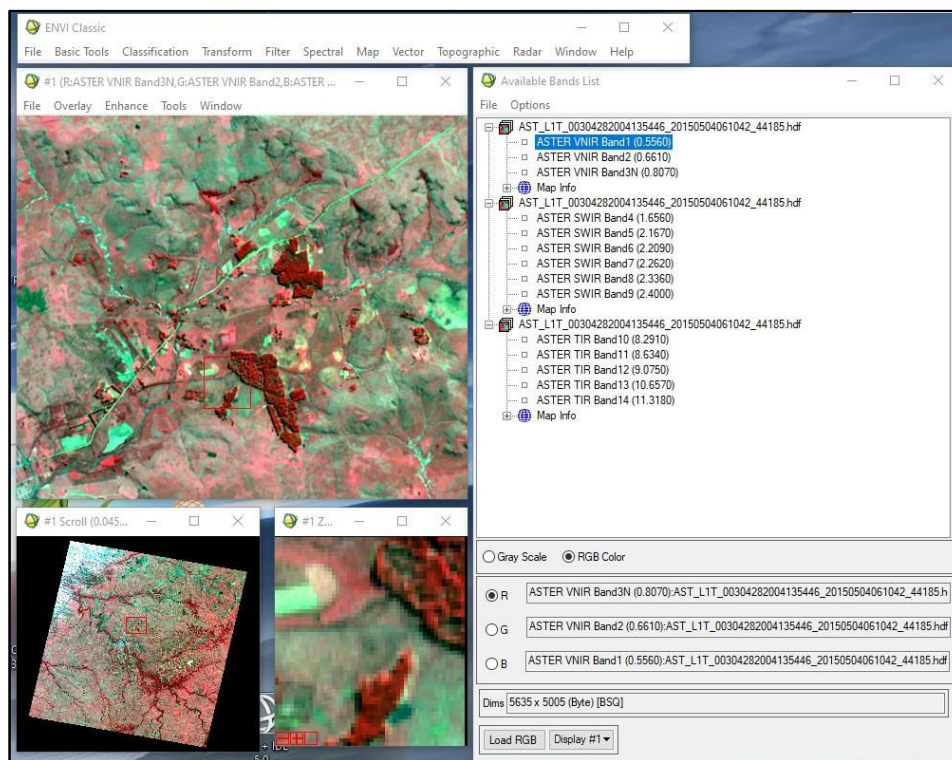
A imagem foi pré-processada com uso das ferramentas do *software* ENVI 5.0, na qual de posse dos dados do momento da coleta da cena a mesma foi convertida para reflectância de superfície, mas representada em um intervalo de 0 a 10.000 como *default* da ferramenta utilizada. Em detalhe,

para essa realização de correção atmosférica, foi aplicado o modelo de transferência radioativa (MODTRAN) a partir da ferramenta FLAASH, presente no *software* ENVI.

Para o uso dessa ferramenta, primeiramente, foi necessário que a imagem estivesse com a codificação dos contadores digitais no formato binário – BIL. Então, realizou-se essa conversão. Esse procedimento se deu através da opção *Convert File Input File*. Em seguida, selecionou-se o método de correção atmosférica adequado aos dados ASTER – a ferramenta FLAASH, baseada no modelo de transferência radiativa – MODTRAN.

Iniciou-se o procedimento, com as informações de metadados da imagem, pois nele estão as informações necessárias para resposta dos parâmetros do método ligados à coleta da cena. Além dessas informações, informações, foram usados parâmetros atmosféricos do local e data da aquisição, obtidos da estação meteorológica (estação INMET A-804 – Santana do Livramento). Em seguida, foi realizada a união de suas bandas espectrais (Figura 5) em um único arquivo. Então esse *raster* foi convertido do formato de dados *.hdf* para o formato *.tif*, mais comumente utilizado em *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas para manipulação de dados espaciais contínuos do tipo *raster*.

Figura 5 - União das bandas espectrais.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com isso, a cena original foi convertida de: (1) contadores digitais para radiância espectral, (2) de radiância espectral para reflectância espectral em topo de atmosfera e, por fim, (3) para reflectância de superfície, com multiplicador *default* de 10.000 adotado pela ferramenta.

Após a união das bandas espectrais, por meio da ferramenta “*data stretching*”, para fins de uso das cenas no algoritmo SAM, essa imagem em reflectância de superfície foi reescalada para o intervalo decimal entre 0 e 1 no intervalo específico do VNIR e SWIR. Esse procedimento possibilitou a se fazer uma correspondência dos valores da assinatura de cada mineral adicionado.

Na sequência foi feita uma tabela de extensão *fnw* (Tabela 1), com as informações do sensor ASTER, de comprimento de onda mínimo, comprimento de onda máximo, largura de banda e comprimento de onda central. Estes dados serviram de parâmetro para execução das etapas consecutivas de caracterização da resposta espectral dos minerais e rochas de interesse, adequando-as à resolução espectral do sensor ASTER. Com isso, vale ressaltar que para as etapas posteriores foram utilizadas apenas as bandas das regiões do espectro refletido.

Tabela 1 - Tabela *fnw*.

Número da banda	Comprimento de onda mínimo (µm)	Comprimento de onda máximo (µm)	Largura de banda (µm)	Comprimento de onda central (µm)
1	0.520	0.600	0.080	0.560
2	0.630	0.690	0.060	0.660
3	0.760	0.860	0.100	0.810
4	1.600	1.700	0.100	1.650
5	2.145	2.185	0.040	2.165
6	2.185	2.225	0.040	2.205
7	2.235	2.285	0.050	2.260
8	2.295	2.365	0.070	2.330
9	2.360	2.430	0.070	2.395
10	8.125	8.475	0.350	8.300
11	8.475	8.825	0.350	8.650
12	8.925	9.275	0.350	9.100
13	10.250	10.950	0.700	10.600
14	10.950	11.650	0.700	11.300

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

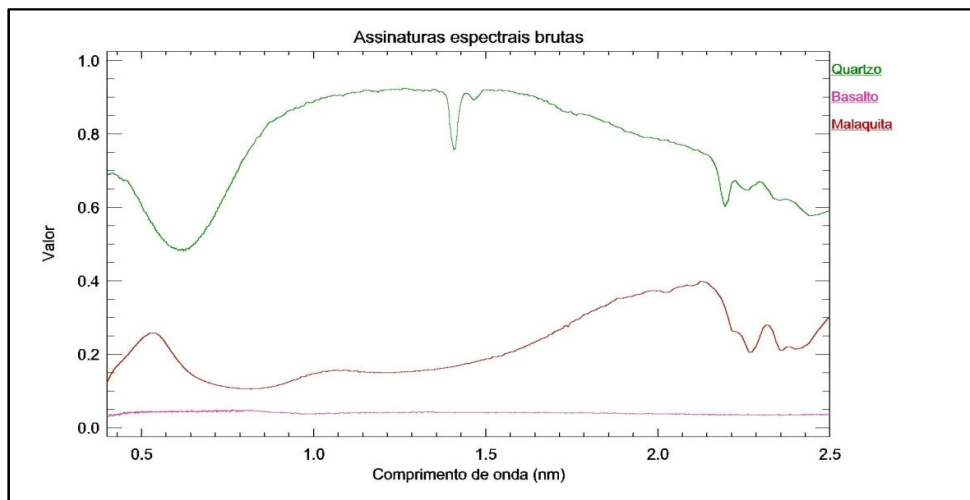
As rochas e minerais compõem uma grande variedade de distintos padrões de interação com a radiação eletromagnética, formando comportamentos espectrais específicos e distintos para cada mínima variação química da composição mineral em questão (ESPINOZA *et al.*, 2015). Essa

distinção espectral permite em sensoriamento remoto a sua identificação detalhada, baseando-se no padrão da interação radiação-matéria. Em geologia, considerando a grande variedade de classes minerais que formam a crosta terrestres, é fundamental que se tenha uma caracterização detalhada do comportamento espectral de um dado alvo geológico de interesse, permitindo, assim, sua identificação a partir da busca desse padrão em observações realizadas em campo, seja localmente ou a partir de dados de sensoriamento remoto.

Essa necessidade de se caracterizar a resposta espectral de rochas e minerais se dá, segundo Crósta (1993), para viabilizar as aplicações de sensoriamento remoto na geologia. Pesquisadores do USGS *Spectroscopy Laboratory* mediram a refletância espectral de milhares alvos minerais em laboratório, e os compilaram na USGS *Spectral Library*. Esta biblioteca contém as assinaturas espectrais e características de 160 minerais diferentes, no intervalo espectral de 0,4 até 2,5 μm . A biblioteca espectral da USGS foi feita para facilitar a espectroscopia laboratorial e de campo a fim de facilitar as práticas de sensoriamento remoto em geologia na interpretação, identificação e mapeamento de minerais, vegetação e materiais artificiais.

Para a aplicação da técnica SAM, foi necessário a criação de uma biblioteca espectral (Figura 6) específica para o enfoque desta pesquisa. Para esse estudo foram trabalhadas as assinaturas espectrais da USGS *Spectral Library*, importadas para o *software* ENVI 5.0, do quartzo, malaquita e do basalto, materiais cuja presença é associada diretamente à ametista.

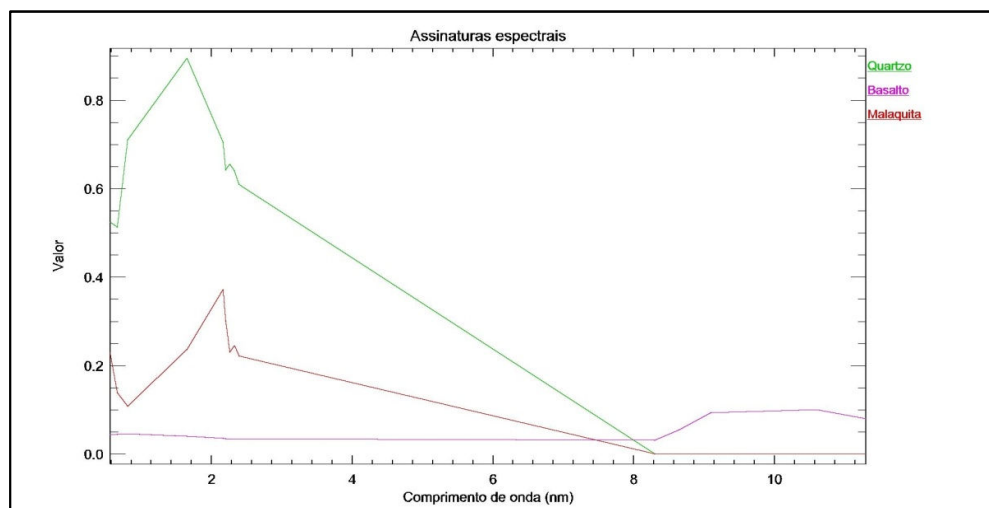
Figura 6 - Biblioteca espectral.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação aos comprimentos de onda, enquanto o sensor ASTER mede em intervalos (bandas espectrais), os valores das assinaturas espectrais das tabelas dos minerais são medidas de meio em meio nanômetro. Para resolver este problema, foi feita a reamostragem (Figura 7) desses valores para o mesmo intervalo de comprimento de onda, como forma de compatibilizar esses dados para a aplicação dos processamentos das etapas posteriores.

Figura 7 - Biblioteca espectral reamostrada para o sensor ASTER.

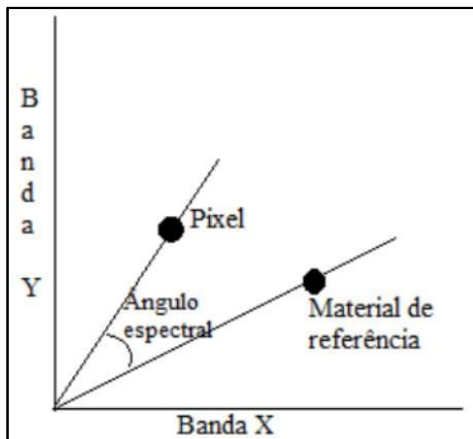


Fonte: Elaborado pelos autores.

Nesta etapa, tendo a biblioteca espectral para a ametista, a tabela *fhw* do sensor ASTER e a imagem pré-processada, foi aplicada o método de classificação *Spectral Angle Mapper* (SAM). A classificação supervisionada foi a utilizada na análise quantitativa dos dados de sensoriamento remoto. O princípio de classificação supervisionada é baseado no uso de algoritmos, em que o analista importa as amostras, para determinar os *pixels* que representam valores de reflexão característicos para uma determinada classe.

O SAM é um método de classificação supervisionada que utiliza o ângulo entre as amostras de treinamento no espaço de n-dimensões para determinar os *pixels* para uma determinada classe de interesse (no caso desta pesquisa as ametistas), determinando a similaridade entre dois espectros (SULSOFT, 2006). Os valores do SAM (Figura 8) são expressos em ângulos, a fim de que quanto menor for o ângulo para o *pixel* classificado, maior será sua similaridade espectral com a amostra de referência e, por conseguinte, maior a possibilidade de o *pixel* conter aquele mineral em foco (SULSOFT, 2006).

Figura 8 - Método de classificação Spectral Angle Mapper.



Fonte: SULSOFT (2006).

Os ângulos são tratados como vetores no espaço n-dimensional, o que resulta em uma grande vantagem a este método, o de não ser sensível aos efeitos de iluminação e albedo. Este método considera apenas a direção dos vetores, e não o seu módulo, o que significa que todas as iluminações possíveis são tratadas da mesma maneira, em que a reflectância de um material é definida pelo seu vetor próprio. A Figura 9 destaca a equação matemática utilizada no método SAM.

Figura 9 - Equação matemática do *Spectral Angle Mapper*.

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^b R E_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^b (E_i)^2 \sum_{i=1}^b (R_i)^2}}$$

Fonte: KRUSE *et al.* (1993).

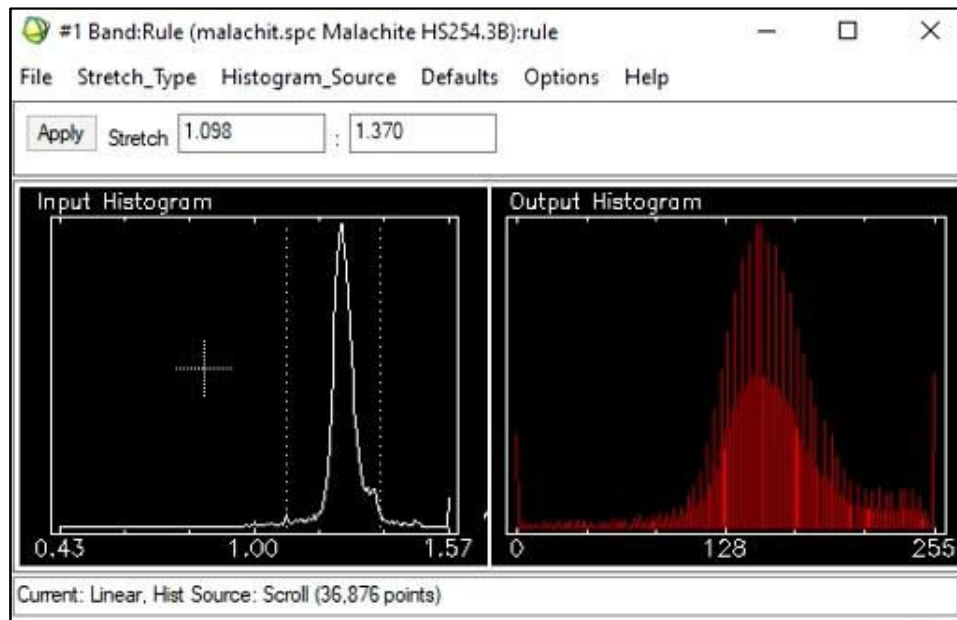
Em que:

- R= Espectro de referência;
- E= Espectro teste;
- α = Função do arco-cosseno; quanto menor for α , maior será a similaridade entre as curvas;

Para valores de angulação menores é onde se tem a maior probabilidade de ocorrência de um mineral. Para a confecção dos produtos cartográficos, os três rasters gerados a partir das curvas do quartzo, malaquita e o basalto foram multiplicados por -1 e somados com seu valor mínimo, a fim do

intervalo dos valores ficar de 0 a um valor positivo, em que maiores valores representam maiores probabilidades da ocorrência daquele mineral. Para facilitar na visualização dos produtos cartográficos, o histograma foi modificado (Figura 10) para valores entre 0 e 255, a fim de ser compatível com imagens 8 *bits*.

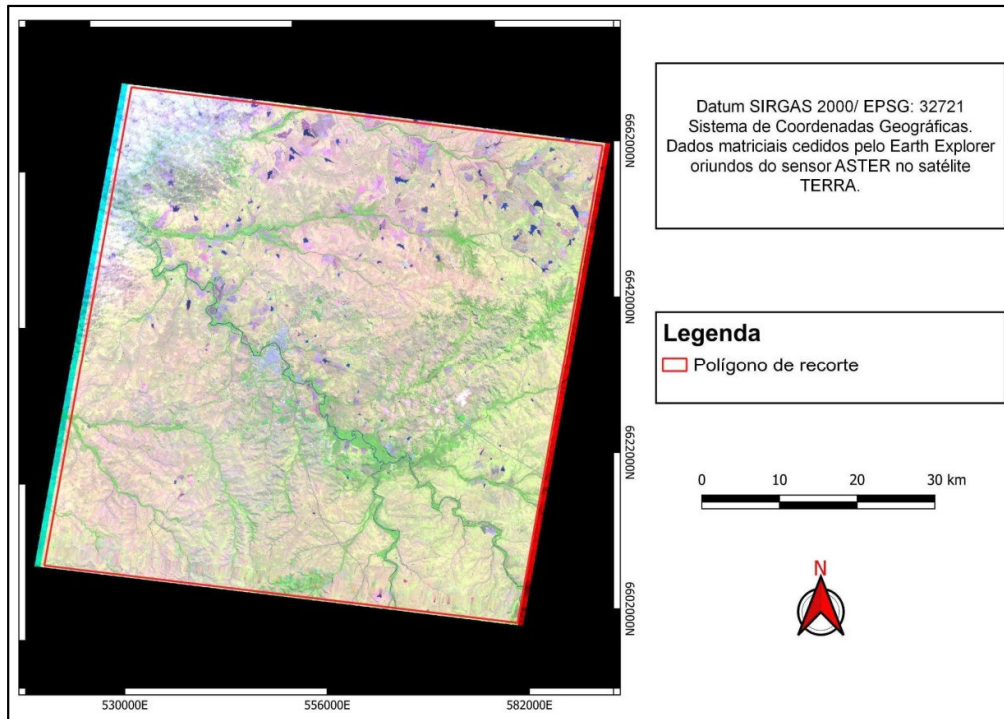
Figura 10 - Mudança do histograma para valores 8 *bits*.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A fim de excluir possíveis *pixels* com valores anômalos, devido ao efeito de distorção das bordas da imagem de sensores satelitais, foi criado um polígono de recorte (Figura 11) no *software* QGIS 3.16.16 que eliminou os cantos do *raster*, o que torna a classificação mais fiel ao real intervalo dos valores obtidos pelo SAM evitando *pixels* sem dados (i.e., *no data value*).

Figura 11 - Polígono de recorte utilizado.

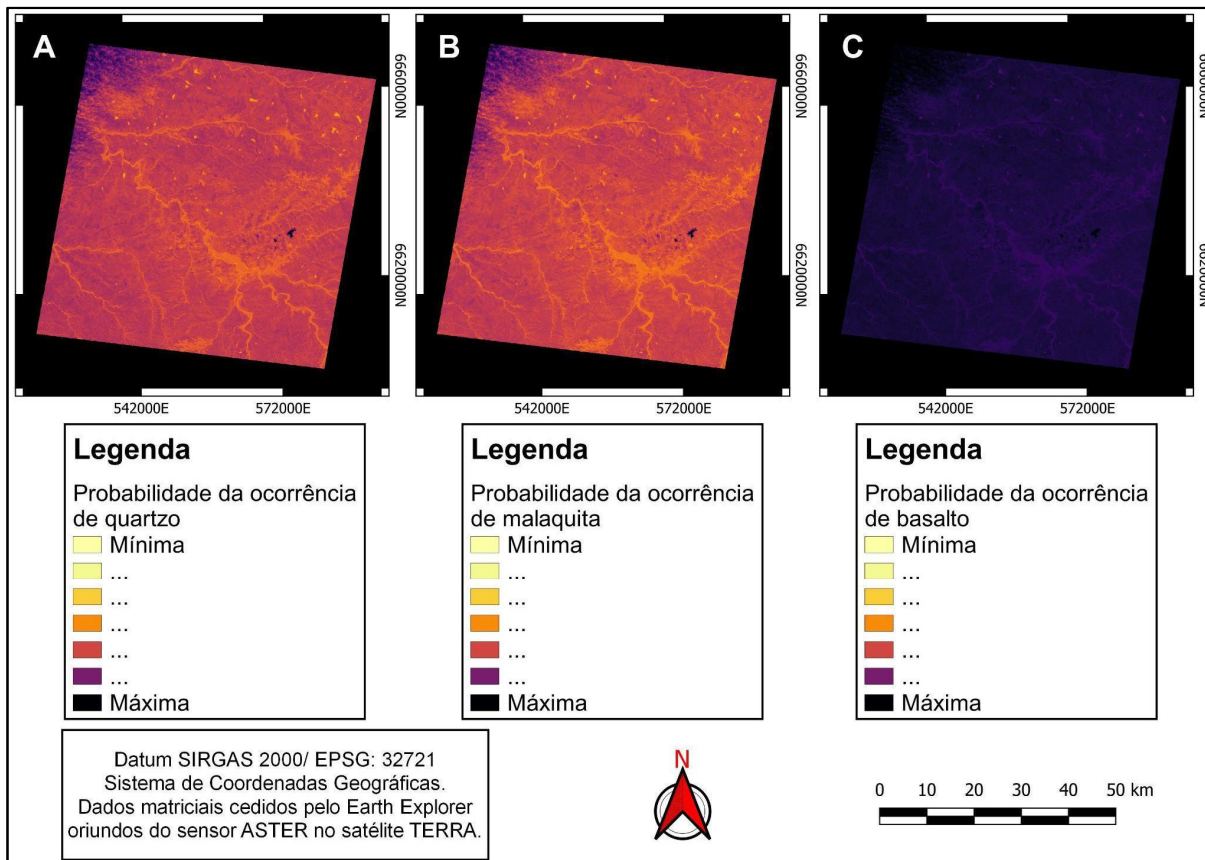


Fonte: Elaborado pelos autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado da aplicação do método SAM, foi produzido um mapa probabilístico individual da ocorrência do quartzo, da malaquita e do basalto (Figura 12), respectivamente. Nota-se que a incidência de basalto é elevada em toda a área estudada, de modo que isso se dá pela própria formação geológica do Rio Grande do Sul na localidade, a qual é caracterizada pela Formação Serra Geral de derrames basálticos do Período Cretáceo, enquanto os resultados para o quartzo e a malaquita se assemelham, justificando a semelhança de suas assinaturas espectrais nos intervalos de comprimento de onda estudados.

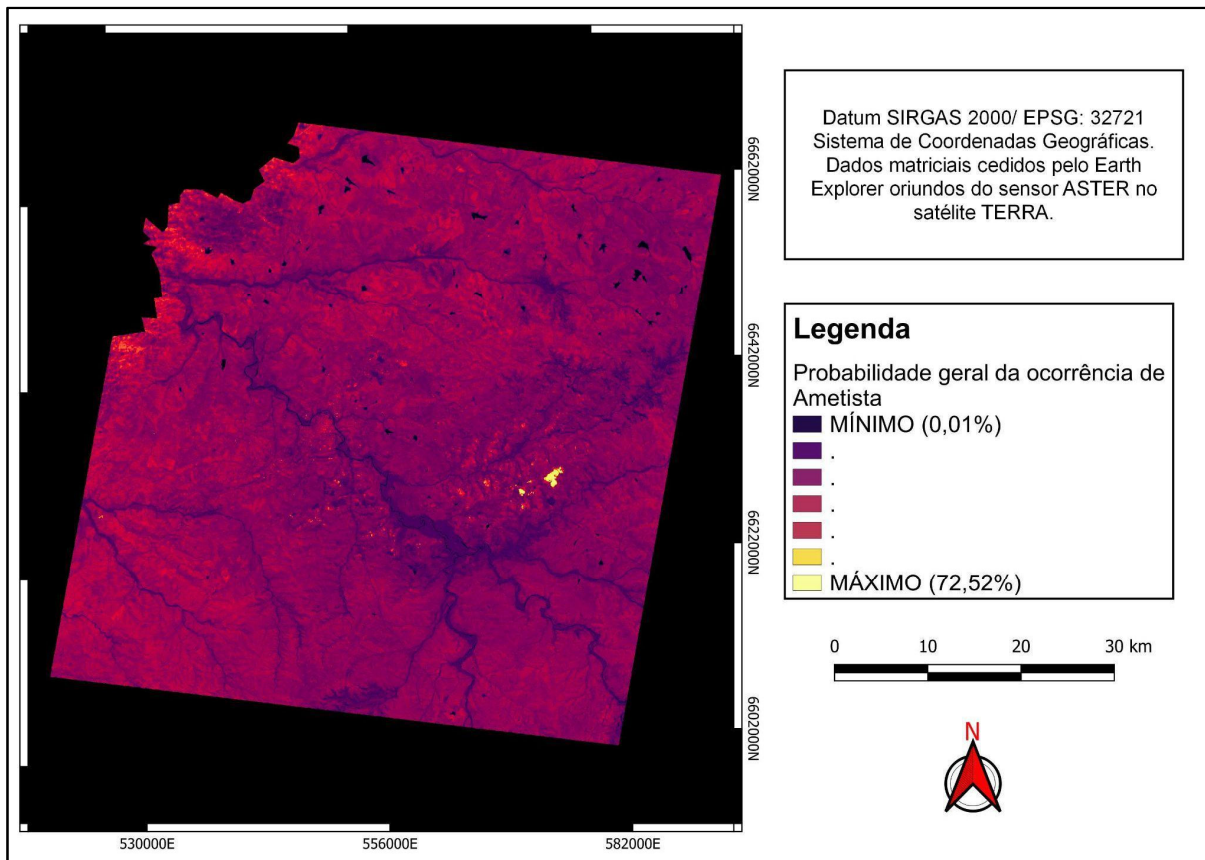
Figura 12 - Mapa probabilístico da ocorrência do quartzo, malaquita e do basalto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir dos três planos de informação representativos para as incidências desses minerais, os quais são fortemente associados à presença da ametista, foi feita uma média harmônica entre eles para a geração de um mapa final para a probabilidade de ocorrência de ametista (Figura 13), de modo a atenuar os efeitos da ocorrência das nuvens na porção NW do *raster*, foi feito uma máscara de extensão para essa região. Vale ressaltar que, para o mapa probabilístico geral da ocorrência de ametista, a fim de destacar o contraste das áreas com maior ocorrência, foi invertido a paleta de cores, de forma que as cores mais claras representam as maiores probabilidades da presença deste mineral.

Figura 13 - Mapa probabilístico geral da ocorrência de ametista.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os valores finais brutos obtidos do método SAM variaram de 0 a 255 (i.e., um *raster* de 8 *bits*), em que 0 indica 0% da probabilidade da ocorrência de ametistas e 255 indica 100% de probabilidade dessa ocorrência (i.e., presença confirmada). Com a aplicação de uma transformação linear simples, obteve-se essas porcentagens para os intervalos probabilísticos dos valores angulares do SAM (Tabela 2) e seus indicadores. Em relação ao padrão espacial para identificação das maiores probabilidades de ocorrência de ametistas, estas se apresentam pela sobreposição do basalto, malaquita e quartzo que se encontram em percentuais acima de concentrações médias já presentes em outras jazidas.

Tabela 2 - Tabela dos indicadores.

Valor obtido no SAM	Porcentagem correspondente	Número de pixels
0,018 - 10	0,01% - 19,60%	6715418
10 - 70	19,60% - 27,45%	98331
70 - 90	27,45% - 35,29%	2046841
90 - 110	35,29% - 43,13%	13680321
110 - 130	43,13% - 50,98%	803805
130 - 150	50,98% - 58,82%	241848
150 - 170	58,82% - 66,6%	39123
170 -184,946	66,66% - 72,52%	590

Fonte: Elaborado pelos autores.

Levando em consideração que a imagem do sensor ASTER possui tamanho de *pixel* 15x15 metros, foi possível aferir a área abrangente para cada intervalo de porcentagem correspondente a partir da contagem de seus *pixels*. Para o mapa probabilístico geral da ocorrência de ametista, os resultados mostraram que 13,28 hectares de área apresentaram probabilidade de ocorrência entre 66,66% e 72,52%. Em 880,27 hectares de área foi evidenciada uma probabilidade entre 58,82% e 66,66%. Por fim, para 5441,58 hectares de área, as probabilidades foram de 50,98% a 58,82%. O mapa da Figura 14 indica as áreas correspondentes que apresentaram probabilidades de ocorrência de ametista entre 66,66% e 72,52%.

Figura 14 - Mapa apresentando os *pixels* que denotam os valores de porcentagem de ocorrência de ametistas entre 66,66% e 72,52%.



Fonte: Elaborado pelos autores.

As áreas de alto potencial de jazimentos de ametistas são bem restritas em relação à área total analisada. Segundo Espinoza *et al.* (2015), tal configuração era esperada em virtude das condições peculiares necessárias para a formação desse achado, formações magmáticas vesiculares de rápido resfriamento e com a presença de cobre e água para potencializar a mineralização das ametistas.

CONCLUSÃO

O sensoriamento remoto com base em metodologias de mapeamento e prospecção de minerais, tem contribuído de forma significativa para o mapeamento de recursos minerais, firmando-se como uma ferramenta importante no apoio à prospecção mineral. A metodologia empregada neste estudo se mostrou como uma excelente alternativa no apoio à prospecção de ametistas. O uso do sensoriamento remoto e os demais conceitos apresentados possibilitou a geração de resultados não somente qualitativos, mas também quantitativos, onde foi possível fazer mapas probabilísticos, de

litologias, jazidas e dos próprios minerais que estão em foco no processo prospectivo.

Os resultados aqui apresentados, produziram uma orientação às fases de campo, reduzindo as áreas de interesse e permitindo maior efetividade das equipes em campo. O método apontou uma área de aproximadamente 13 hectares com altíssimo potencial de mineralização de ametistas (probabilidade acima de 70%), reduzindo de forma significativa a área foco a ser analisada em campo.

A experiência obtida no decorrer deste estudo mostrou que as informações fornecidas pelo método *Spectral Angle Mapper* permitem aprofundar o conhecimento sobre as áreas de maior probabilidade de ocorrência de ametistas da região sudoeste do Rio Grande do Sul. Nessas condições, pretende-se dar continuidade a essa pesquisa, cruzando os resultados com os futuros dados obtidos em campo pelos autores e ampliando a cobertura para outras regiões do estado.

O uso de métodos não invasivos na identificação de áreas potenciais à exploração mineral auxilia num processo de prospecção mais sustentável. Essas técnicas podem limitar impactos negativos da atividade de prospecção mineral ao meio ambiente, bem como produzir soluções eficientes e eficazes na diminuição de custos oriundos dessa atividade. Por fim, a partir dos produtos gerados ao final deste estudo espera-se produzir subsídios a outros projetos acerca da prospecção de ametistas no Rio Grande do Sul. Além disso, essa mesma abordagem metodológica pode ser empregada na prospecção de outros achados de interesse, considerando as devidas adaptações quanto aos *endmembers* a serem utilizados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS, e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS pela concessão da bolsa de iniciação tecnológica durante o período de realização do projeto.

REFERÊNCIAS

ALBERTI, E. A.; DA SILVA, G. S.; REIS, J. T.; PIRES, C. A. F. O caráter dicotômico da produção de ametista no estado do Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, 25: 189-210. 2003

AMORIM, V. A. **Modelagem geológica e controle dos depósitos em geodos no distrito mineiro de Ametista do Sul**. 2009. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Brasil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

BERGMANN, M.; ROCHA, P. G.; SANDER, A.; PARISI G. N. Modelo prospectivo para ametista e ágata na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul. **Avaliação dos recursos Minerais do Brasil, Áreas de relevante interesse mineral - ARIM**. Porto Alegre: CPRM, 2020.

CRÓSTA, A. P. Caracterização espectral de minerais de interesse à prospecção mineral e sua utilização em processamento digital de imagens. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7. Curitiba. **Anais**. Curitiba: INPE. p. 202-210, 1993.

CRÓSTA, A. P.; SOUZA FILHO, C. R.; AZEVEDO, F. Caracterizando halos de alteração hidrotermal em depósitos auríferos epitermais com os sensores multiespectrais orbitais LANDSAT/TM e ASTER: o caso do Distrito de Los Menucos, Argentina. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa. **Anais**. João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geologia. 2002.

ESPINOZA, J. M. A.; ALVES ROLIM, S. B.; ORTIZ, M. S.; WESTPHALEN, A. B. Identificação de áreas de garimpo de Ametista com o uso de imagens ASTER e processamento digital de imagens. **Scientia Plena**, 11(2). 2015.

GOMES, M. E. B. **Mecanismos de resfriamento, estruturação e processos magmáticos em basaltos da Bacia do Paraná - região de Frederico Westphalen-RS Brasil**. P. Alegre, 264 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UFRGS, 1996.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; DIETZ, J. B. Expert System-Based Mineral Mapping in northern Death Valley, California/Nevada using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS): **Remote Sensing of Environment, Special issue on AVIRIS**, v. 44, p. 309 - 336. 1993.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. Porto Alegre, 225p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997.

SABINS, F. F. Remote sensing for mineral exploration. **Ore Geology Reviews**, 14 (3-4): 157-183. 1999.

SHIRMARD, H.; FARAHBAKHS, E.; MÜLLER, R. D.; CHANDRA R. A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration. **Remote Sensing of Environment**, 268: 112750. 2022

SULSOFT. ENVI guide: **Sulsoft**, 2006.

ZALÁN, P. V.; WOLF, S.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; APPI, V. T.; NETO, E. V. S.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUES, A. The Paraná Basin, Brazil. **Interior cratonic basins. American Association of Petroleum Geologists Memoir**, 51: 681–708, 1991.

ZEINELABDEIN, K. A. E.; EL-NADI, A. H. H.; BABIKER, I. S. Prospecting for gold mineralization with the use of remote sensing and GIS technology in North Kordofan State, central Sudan. **Scientific African**, 10: e00627. 2020.

Recebido em: 01/09/2022
Aceito em: 25/04/2023