

GEOLOGIA: ORIGEM E TRANSFORMAÇÃO

VOLUME III

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Plínio Ferreira Pires

Geologia: origem e transformação

3ª ed.

Goiâna-GO
Editora Conhecimento Livre

Copyright© 2026 por Editora Conhecimento Livre

3ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pires, Plínio Ferreira
P638G Geologia: origem e transformação

/ Plínio Ferreira Pires. – Goiânia-GO

Editora Conhecimento Livre, 2026

27 f.: il
DOI: 10.37423/2026.edcl1299
ISBN: 978-65-5367-792-0
Modo de acesso: World Wide Web
Incluir Bibliografia

1. terra 2. composição 3. estrutura 4. evolução I. Pires, Plínio Ferreira II. Título

CDU: 550

https://doi.org/10.37423/2026.edcl1299

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Conselho Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos

Editora Conhecimento Livre
Goiânia-GO
2026

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 5
MINERAIS ESTRATÉGICOS NA MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA
Mary Lucia da Silva Nogueira
Sara Yasmin Teixeira de Jesus
Luan de Souza França
Tiago José de Castro
Helenice Vital
Izaac Cabral Neto
DOI 10.37423/260510989

CAPÍTULO 2 18
GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO NA ILHA DE COTIJUBA (BELÉM/PA)
Samia Lima Carmo
Aline Maria Meiguins De Lima
DOI 10.37423/260510998

Capítulo 1

10.37423/260510989

MINERAIS ESTRATÉGICOS NA MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA

Mary Lucia da Silva Nogueira — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN*

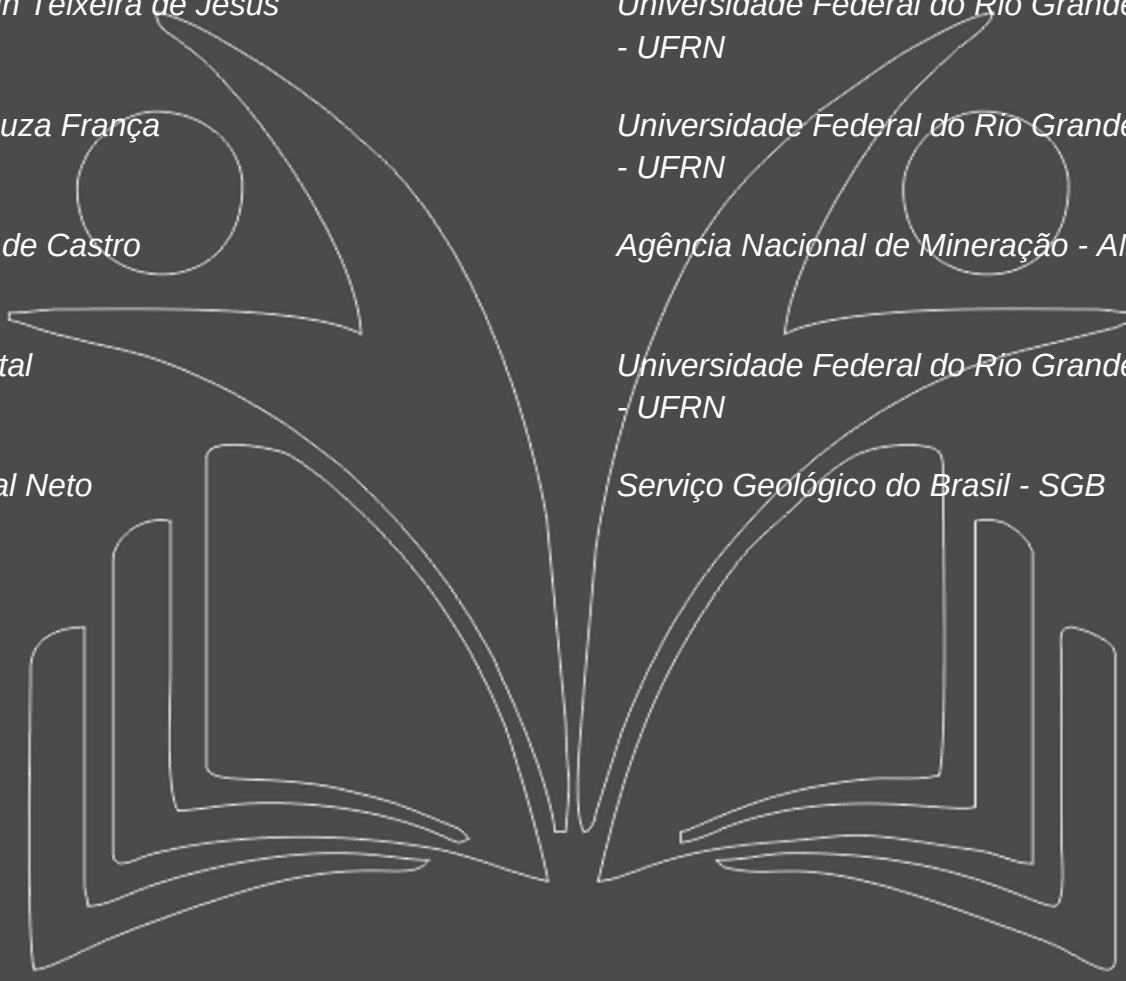
Sara Yasmin Teixeira de Jesus — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN*

Luan de Souza França — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN*

Tiago José de Castro — *Agência Nacional de Mineração - ANM*

Helenice Vital — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN*

Izaac Cabral Neto — *Serviço Geológico do Brasil - SGB*



RESUMO

Os minerais estratégicos possuem relevância crescente no contexto da segurança energética, desenvolvimento tecnológico e transição para economias de baixo carbono. Nesse cenário, o presente trabalho teve como objetivo identificar e caracterizar os processos minerários relacionados aos minerais estratégicos na Margem Equatorial Brasileira (MEB), abrangendo os ambientes terrestre e marinho entre os estados do Rio Grande do Norte e Amapá. Os dados utilizados foram obtidos a partir do Sistema de Informação Geográfica da Mineração (SIGMINE), disponibilizado pela Agência Nacional de Mineração (ANM), sendo posteriormente tratados e analisados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS versão 3.34. A metodologia consistiu na filtragem dos processos minerários por estados, substâncias minerais estratégicas e fases processuais da ANM. Os resultados demonstraram que a MEB concentra 15.117 processos minerários relacionados aos minerais estratégicos definidos pelo Decreto nº 10.657/2021, predominando as fases de requerimento e autorização de pesquisa mineral. Observou-se destaque para o fosfato no critério de dependência de importação, para o cobre no critério de aplicação tecnológica e para o ouro no critério de relevância econômica associada à balança comercial. O interesse por minerais estratégicos na margem equatorial é maior nos estados do Nordeste para diferentes substâncias, destacando-se os estados do Piauí com fosfato e ferro, estado do Ceará com cobre e lítio. Na região Norte, destaca-se o estado do Pará, com áreas de pesquisa relacionadas à fosfato, cobre e ouro. Em relação a terras raras, no Brasil existem 2.513 processos minerários, predominante nos estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais. Destes, 70 processos estão localizados na MEB. Conclui-se que a Margem Equatorial Brasileira representa uma importante fronteira mineral estratégica para o país, evidenciando potencial para superação dos desafios relacionados à pesquisa mineral, licenciamento ambiental, estudos de viabilidade técnica e econômica dos projetos de mineração voltados ao aproveitamento sustentável desses recursos e disponibilidade de dados à sociedade.

Palavras-chave: Mineração; Sigmine; Terras Raras.

INTRODUÇÃO

No âmbito do Ministério de Minas e Energia (MME), o conjunto de políticas públicas direcionadas à transição e à segurança energética no Brasil estrutura-se em eixos prioritários a geração de energia, o programa Luz para Todos, a transmissão de energia, a eficiência energética, o setor de petróleo e gás natural, a pesquisa mineral e o desenvolvimento de combustíveis de baixo carbono, configurando um arranjo integrado de planejamento energético nacional.

A pesquisa mineral, através do Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021, Pró-Minerais Estratégicos, no Art. 2º define minerais estratégicos para o Brasil em 3 critérios:

I - bem mineral do qual o País dependa de importação em alto percentual para o suprimento de setores vitais da economia (enxofre, fosfato, molibdênio e sais de potássio);

II - bem mineral que tenha importância pela sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia (minério de cobalto, minério de cobre, minério de estanho, minério de grafita, minérios do grupo da platina, minério de lítio, minério de nióbio, minério de níquel, minério de silício, minério de tálio, minério de tântalo, minério de terras raras, minério de titânio, minério de tungstênio, minério de urânio e minério de vanádio);

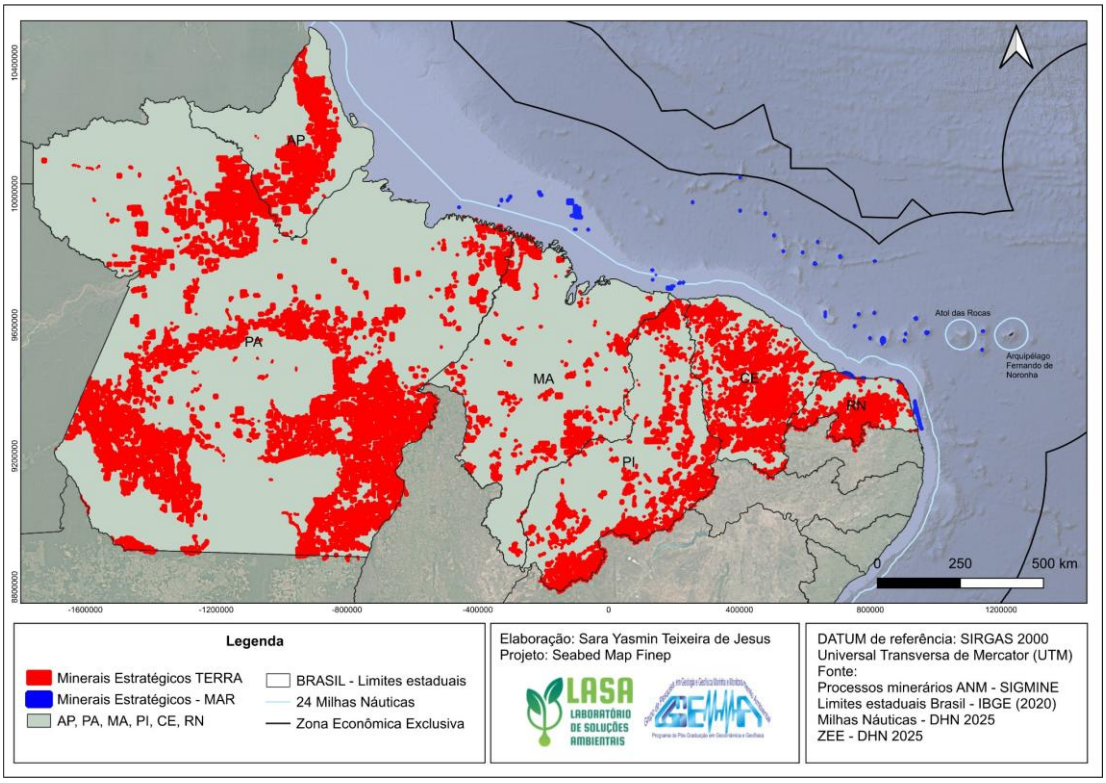
III - bem mineral que detenha vantagens comparativas e que seja essencial para a economia pela geração de superávit da balança comercial do País (cobre, alumínio, ouro, manganês, ferro, urânio, grafita e nióbio).

Posteriormente a Resolução Nº 2, de 18 de junho de 2021, define a relação de minerais estratégicos para o País, de acordo com os critérios de que trata o Art. 2º do Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021.

Os minerais de terras raras são definidos por 17 elementos químicos: lantânio, cério, praseodímio, neodímio, promécio, samário, európio, gadolínio, térbio, disprósio, hólmio, érbio, escândio, túlio, itérbio, lutécio e ítrio.

O presente trabalho tem como objetivo geral identificar e caracterizar os processos minerários situados em ambientes marinho e terrestre da Margem Equatorial Brasileira, Figura 1, de acordo com o Decreto nº 10.657, de 24 de Março de 2021. A margem equatorial brasileira abrange a região entre os estados do Rio Grande do Norte e do Amapá.

Figura 1: Mapa da área de estudo.



Fonte: Elaboração própria.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido de acordo com o fluxo de atividades apresentado na Figura 2. Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos por meio do SIGMINE (Sistema de Informação Geográfica da Mineração), plataforma desenvolvida pela Agência Nacional de Mineração (ANM). As informações foram coletadas no dia 12 de janeiro de 2026.

Figura 2: Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Elaboração própria.

Após o download, os dados foram visualizados e filtrados em ambiente de SIG (Sistema de Informação Geográfica), através do software QGIS versão 3.34. A primeira filtragem dos dados iniciou por estados, seguida pelo filtro de minerais estratégicos com foco em 24 substâncias do banco de dados da ANM. Por fim, aplicou-se o filtro baseado nas fases processuais da ANM de acordo com o Código de Mineração Brasileiro Lei n° 227/1967. As fases consideradas relevantes para fins de análise neste trabalho foram: Requerimento de Pesquisa; Autorização de Pesquisa; Requerimento de Lavra; Direito de Requerer Lavra e Concessão de Lavra. A filtragem dos dados por estados possibilitou realizar uma análise na forma visual pela elaboração de mapas, quanto a produção dos quantitativos no formato de tabelas e gráficos.

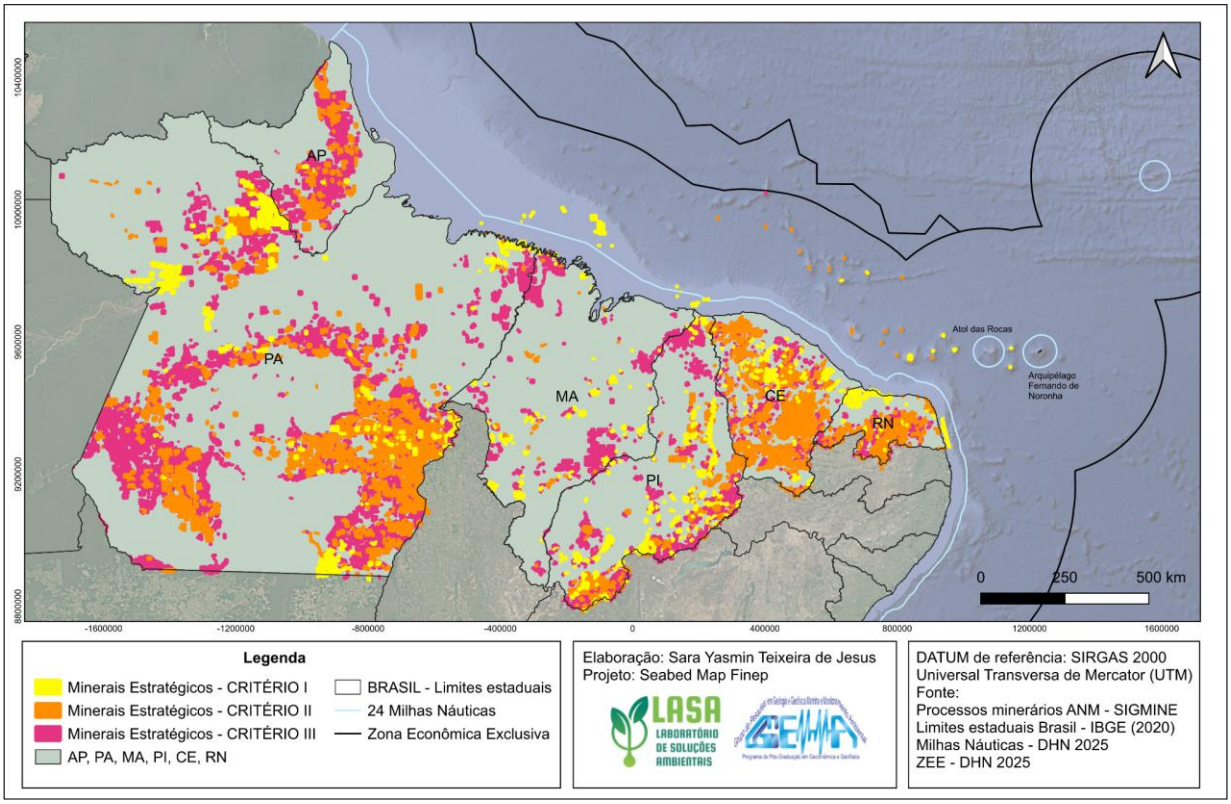
A análise dos dados e produção dos mapas foi realizada levando em consideração as fases de exploração (Requerimento de Pesquisa e Autorização de Pesquisa) e produção mineral (Requerimento de Lavra; Direito de Requerer Lavra e Concessão de Lavra).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise dos dados adquiridos pelo SIGMINE, foi possível conhecer a distribuição espacial dos minerais estratégicos presentes na margem equatorial, no ambiente marinho e terrestre, Figura 3.

No Brasil, o interesse por minerais estratégicos se materializa em 63.580 processos minerários. Destes, um total de 15.117 processos está na margem equatorial, sendo 14.649 em fase de pesquisa mineral e 468 em fase de produção mineral no ambiente terrestre e marinho, como mostra a Figura 3. Observando a distribuição dos processos pelos critérios definidos no Decreto nº 10.657 (Brasil, 2021), há o predomínio de processos minerários pelo critério III ou seja para o bem mineral que detenha vantagens comparativas e que seja essencial para a economia pela geração de superávit da balança comercial do País.

Figura 3: Mapa dos minerais estratégicos de acordo com a classificação pelo Decreto nº 10.657(Brasil, 2021).



Fonte: Elaboração própria.

As tabelas 1, 2 e 3 apresentam os quantitativos dos processos minerários para os critérios I, II e III por estados e por fases processuais da ANM consideradas neste trabalho.

O critério I, referente aos bens minerais dos quais o País depende de importação em elevado percentual para o suprimento de setores vitais da economia, apresenta 1.502 processos, sendo o fosfato a substância de maior interesse no estado do Piauí, o qual detém a maior quantidade de processos minerários. Os processos na fase de exploração mineral são predominantes, com 1.078 autorizações de pesquisa.

Tabela 1: Quantitativos de minerais e processos minerários ANM para o Critério I de minerais estratégicos, pelo Decreto nº 10.657 (Brasil, 2021).

Substâncias minerais por estado (Terra/Mar)	AP	PA	MA	PI	CE	RN
Enxofre		64				
Fosfato	6	227	209	533	217	173
Minério de molibdênio						4
Sais de potássio		55		10	1	3

Total	6	346	209	543	218	180

Quantidade de processos minerários (Terra/Mar)	AP	PA	MA	PI	CE	RN
Autorização de pesquisa	2	162	183	467	156	108
Concessão de lavra				1	1	
Direito de requerer a lavra		1			1	3
Requerimento de lavra		3	1	2		1
Requerimento de pesquisa	4	180	25	73	60	68
Total	6	346	209	543	218	180

O critério II, referente aos bens minerais que tenham importância pela sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia, apresenta 5.449 processos, sendo o Ceará o estado com a maior quantidade deles (1.975 processos). O cobre é a substância de maior interesse, sobretudo no estado do Pará. Assim como no critério I, os processos na fase de exploração mineral são predominantes, com 3.815 processos em fase de autorização de pesquisa.

Tabela 2: Quantitativos de minerais e processos minerários ANM para o Critério II de minerais estratégicos, pelo Decreto nº 10.657 (Brasil, 2021).

Substâncias minerais por estado (Terra/Mar)	AP	PA	MA	PI	CE	RN
Minério de cobalto		15			1	
Cobre	41	1.591	21	576	889	123
Estanho	19	68	6		41	6
Grafita		4		6	78	
Platina	8	14			65	
Lítio		3		11	830	328
Nióbio	17	2				20
Níquel	3	126		54	15	37
Minério de silício		6				

Tântalo	44	35		1	20	84
Terras raras		6	1	26	28	9
Titânio	3	46		22	2	34
Tungstênio	7	12			1	38
Minério de urânio					3	
Minério de vanádio		1			2	
Total	142	1.929	28	696	1.975	679

Quantidade de processos minerários (Terra/Mar)	AP	PA	MA	PI	CE	RN
Autorização de pesquisa	44	1.152	15	581	1.448	575
Concessão de lavra		27		1	4	5
Direito de requerer a lavra		9			8	5
Requerimento de lavra	1	61			7	14
Requerimento de pesquisa	97	680	13	114	508	80
Total	142	1.929	28	696	1.975	679

O critério III, bens minerais que detenham vantagens comparativas e que sejam essenciais para a economia pela geração de superávit da balança comercial do País, apresenta 8.166 processos minerários, sendo a substância de maior interesse o Ouro no Estado do Pará, bem como a maior quantidade de processos minerários. A pesquisa mineral é predominante com 4.988 processos na fase de autorização de pesquisa.

Tabela 3: Quantitativos de minerais e processos minerários ANM para o Critério III de minerais estratégicos, pelo Decreto nº 10.657 (Brasil, 2021).

Substâncias minerais por estado (Terra/Mar)	AP	PA	MA	PI	CE	RN
Alumínio	2	138	12	7		
Ferro	148	329	316	876	335	231
Grafita						
Ouro	333	3.617	166	300	247	141

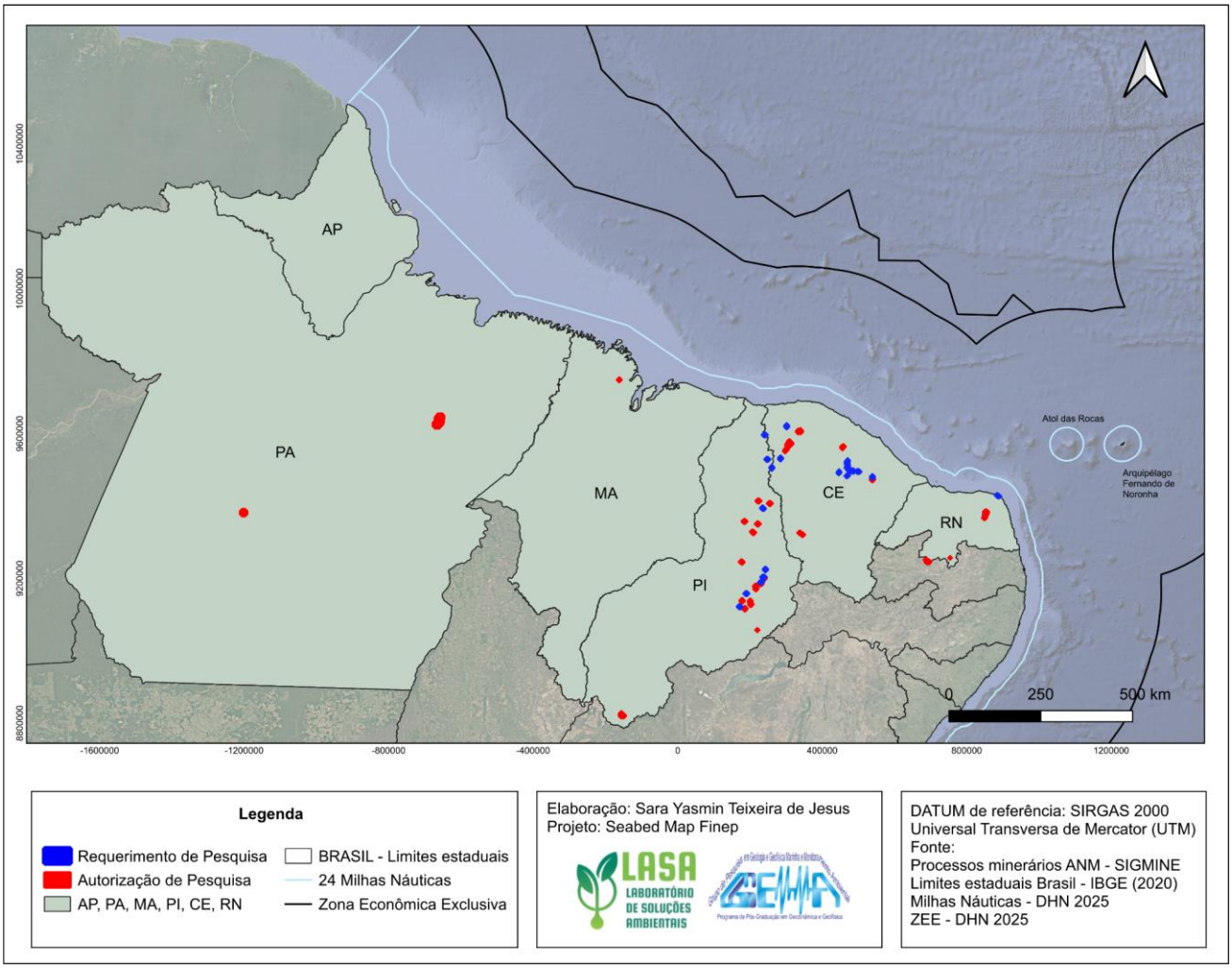
Manganês	22	322	6	345	248	25
Total	505	4406	500	1528	830	397

Quantidade de processos minerários (Terra/Mar)	AP	PA	MA	PI	CE	RN
Autorização de pesquisa	157	2267	401	1264	616	283
Concessão de lavra	16	29	2	8	10	8
Direito de requerer a lavra	8	30		1	10	19
Requerimento de lavra	15	98	8	14	11	25
Requerimento de pesquisa	309	1982	89	241	183	62
Total	505	4406	500	1528	830	397

No Brasil, o interesse em Terras Raras se materializa em 2.513 processos minerários, predominando nos estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais. Destes, 2.471 processos estão na fase de pesquisa mineral, com 369 requerimentos de pesquisa e 2.102 autorizações de pesquisa. Na fase de produção, há 8 requerimentos de lavra, 7 concessões de lavra e 27 processos em fase de direito de requerer a lavra.

Na margem equatorial, atualmente existem 70 processos minerários (Figura 4). A filtragem nas cinco fases processuais da ANM (Requerimento de pesquisa, autorização de pesquisa, direito de requerer a lavra, requerimento de lavra e concessão de lavra), revelou que os estados do Ceará e do Piauí apresentam maior interesse em Terras Raras, com 28 e 26 processos minerários respectivamente. O cenário é predominantemente de pesquisa mineral nas fases de requerimento de pesquisa com 26 processos e autorizações de pesquisa com 44 processos. Destaca-se a ocorrência de 1 requerimento de pesquisa no ambiente marinho no estado do Rio Grande do Norte.

Figura 4: Mapa da distribuição dos processos minerários para Terras Raras.



Fonte: Elaboração própria.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil apresenta um cenário de pesquisa mineral para minerais estratégicos, incluindo terras raras, se traduzindo em 2.282 empresas pesquisando e 1.071 empresas solicitando pesquisar. O elevado número de processos minerários nas fases de requerimento de pesquisa e autorização de pesquisa demonstram esse cenário. Contudo, o resultado dessas pesquisas não são disponibilizados para a sociedade, como acontece, por exemplo, no setor de óleo e gás, onde os dados são disponibilizados pela ANP, Agência Nacional do Petróleo, após o tempo de sigilo. A disponibilidade desses dados é um desafio a ser superado para o setor da mineração, que pode favorecer a cooperação entre empresas e instituições de pesquisa na fase de pesquisa mineral.

No cenário de produção mineral, os quantitativos de processos são menores, pois dependem de licenciamento ambiental, que no ambiente terrestre varia de acordo com o órgão ambiental de cada

estado e no ambiente marinho é concedido pelo Ibama, além de viabilidade técnica e econômica dos projetos de mineração. Atualmente 106 empresas estão na fase de requerer lavra e 65 empresas estão com concessão de lavra.

Os processos minerários no ambiente marinho seguem o mesmo tratamento normativo aplicado aos processos em terra conforme estabelecido no Código de Mineração, embora as metodologias de pesquisa e de produção mineral no meio marinho sejam distintas daquelas empregadas no ambiente terrestre.

O Brasil participa junto à Organização das Nações Unidas (ONU) da Década da Ciência Oceânica (2020-2030) por meio do Comitê Nacional da Década do Oceano, vinculado ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Entretanto, observa-se, que essa agenda ainda apresenta limitada integração com o Ministério de Minas e Energia (MME), apesar da crescente expansão de processos minerários no ambiente marinho.

Em 2025 foi criada a Divisão de Minerais Críticos e Estratégicos na Agência Nacional de Mineração (ANM), e há registros de discussões sobre a possível criação de uma nova estatal voltada ao setor de terras raras. Observa-se, contudo, um déficit de reconhecimento do papel regulador e fiscalizador da ANM, bem como de suas limitações estruturais e de recursos humanos.

O interesse por minerais estratégicos na margem equatorial é maior nos estados do Nordeste para diferentes substâncias, destacando-se o Piauí com fosfato e ferro, e o Ceará com cobre e lítio. Na região Norte destaca-se o estado do Pará com pesquisas para fosfato, cobre e ouro.

A distribuição dos processos minerários refletem a geologia do Brasil que em terra e mar tem sido cada vez mais estudada através de projetos do Serviço Geológico do Brasil - SGB, cujos resultados são disponibilizados para a sociedade no Repositório Institucional de Geociências - RIGeo (https://rigeo.sgb.gov.br/home), e do Instituo Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, no âmbito da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais – INDE (https://inde.gov.br).

A implementação de políticas públicas brasileiras no setor mineral, o valor das commodities e o contexto da transição energética têm contribuído para impulsionar a atividade minerária no Brasil.

Os minerais estratégicos apresentam relevância crescente no contexto da segurança energética, do desenvolvimento tecnológico e da transição para economias de baixo carbono.

Os resultados desta pesquisa contribuem para o projeto de pesquisa e inovação SeabedMap - Sensoriamento, Integração e Análise de Informações Digitais no Mapeamento Geológico Marinho (FINEP/MCTI/Marinha do Brasil/SGB/UFRN/GGEMMA, Ref. 093/21).

No contexto da transição energética, os dados evidenciam o potencial mineral a ser investigado, contribuindo também para o setor de geração de energia elétrica por fontes eólicas offshore, o qual atualmente conta com 59 projetos de parques eólicos offshore em tramitação na etapa de licenciamento ambiental no Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), com potencial total de geração de 134.255 MW. Desse total, a margem equatorial (abrangendo os estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e Maranhão) apresenta potencial de 62.248 MW, incluindo 8 projetos no Rio Grande do Norte, com potencial de geração de 12.768 MW e previsão de instalação de 867 aerogeradores.

Os autores agradecem o apoio da FINEP, do MCTI, da Marinha do Brasil, do SGB, da UFRN, da UFOP, da ANM, do Laboratório de Soluções Ambientais (LASA), do Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental (GGEMMA), bem como do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, PRH-ANP25.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). ArcGIS Web Application – Geoportal SIGMINE. Disponível em: https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908. Acesso em:12 jan. 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021. Estabelece a relação de minerais estratégicos para o Brasil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 jun. 2021. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-2-de-18-de-junho-de-2021-327352416. Acesso em:12 jan. 2026.

BRASIL. Presidência da República. Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. Institui o Programa Pró-Minerais Estratégicos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 25 mar. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Decreto/D10657.htm. Acesso em:12 jan. 2026.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Versão 3.34. [S.l.]: QGIS Association, 2024. Disponível em: https://qgis.org. Acesso em: 12 jan. 2026.

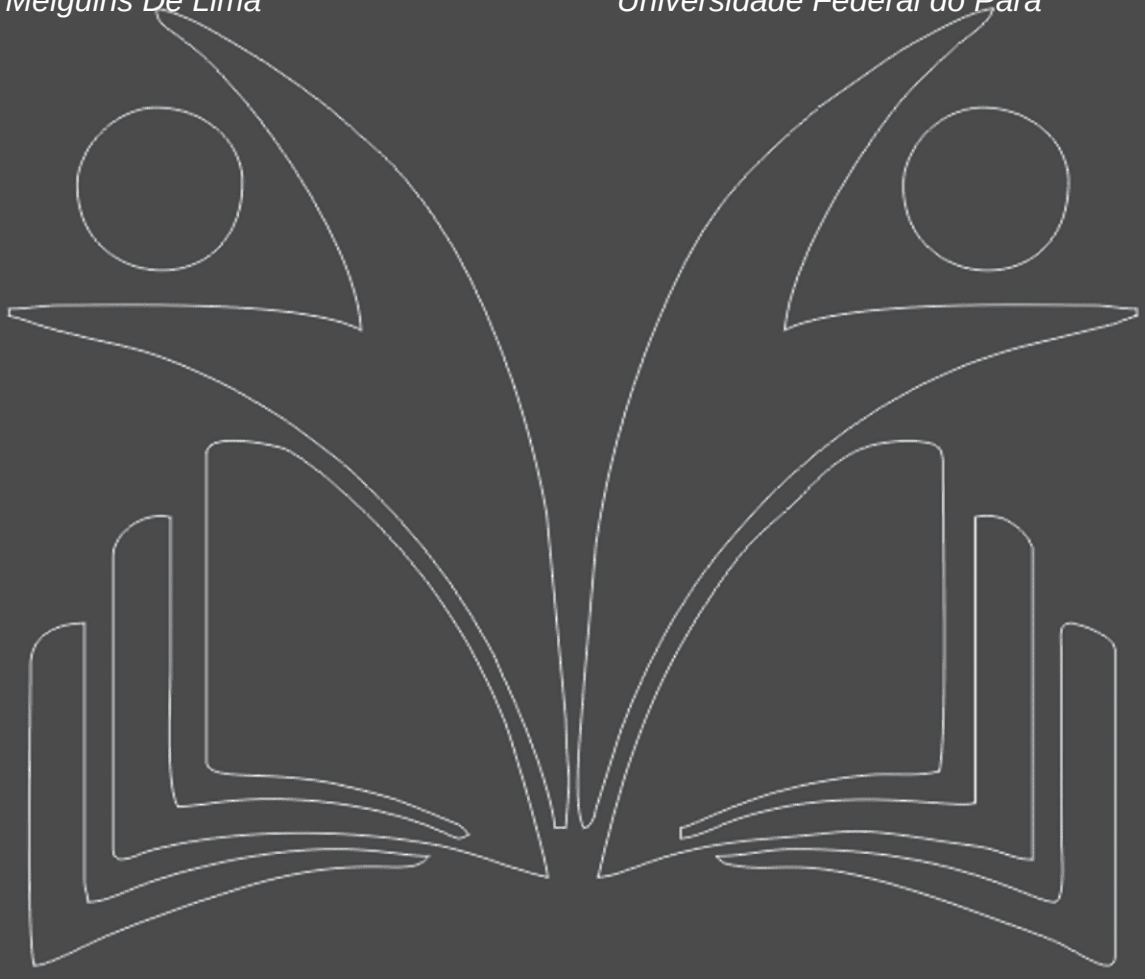
Capítulo 2

10.37423/260510998

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO NA ILHA DE COTIJUBA (BELÉM/PA)

Samia Lima Carmo — *Universidade Federal do Pará*

Aline Maria Meiguins De Lima — *Universidade Federal do Pará*



RESUMO

Metodologias aplicadas em diferentes fases do trabalho de campo auxiliam e garantem agilidade para o mapeamento geológico, trazendo vantagens na aquisição de dados e no refinamento de resultados. Este estudo compara duas metodologias de classificação de imagens digitais: a tradicional pixel a pixel e a orientada a objetos, usando algoritmos de decisão e treinamento de máquina. Nesse contexto, imagens de alta resolução do satélite CBERS-4A foram utilizadas para mapear uma porção da Ilha de Cotijuba, localizada em área insular do município de Belém (PA). Os resultados obtidos demonstram a aplicação de metodologias de processamento digital de imagens oferecem vantagens e resultados mais precisos, trazendo potencialidades para o mapeamento geológico de formações rochosas lateríticas em áreas estuarinas, além de considerar aplicações e resultados equivalentes em outros contextos geológicos.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Classificação orientada à objetos; Formações rochosas lateríticas.

1 INTRODUÇÃO

Inovações tecnológicas nas áreas de informação e comunicação, têm permitido a adoção de novas abordagens para a coleta, análise e processamento de dados do espaço geográfico. Isso torna mais fácil a avaliação dos componentes da paisagem e amplia as possibilidades de uma cartografia voltada ao processamento digital de imagens (PDI) e ao aprendizado de máquinas, resultando em mapas mais precisos e alinhados com a realidade (Blaschke, 2010).

Pesquisas acerca do sensoriamento remoto, geologia e mineração, especialmente na identificação de corpos rochosos aflorantes, estão focadas na classificação automática ou visual de dados obtidos por sensores ópticos, utilizando índices de vegetação (NDVI), treinamento de máquinas e a geoestatística, para a criação de mapas e a formação de bancos de dados (Vieira et al., 2012; Mohammadizad e Arfania, 2017; Gizdavec et al., 2022).

Estudos sobre a evolução geológica dos ambientes possuem grande relevância a Geologia Regional, pois fornecem um modelo significativo para entender os processos geológicos e climáticos. Nesse sentido, este trabalho teve por objetivo comparar duas metodologias de classificação de imagens digitais - a tradicional pixel a pixel e a orientada a objetos, usando algoritmos de decisão e treinamento de máquina.

Dessa maneira, visa contribuir tanto para o melhor desenvolvimento dos trabalhos de campo na geologia, quanto aos voltados para questões ambientais, tais como condições de risco geológico, com técnicas que aplicam metodologias complementares por meio de sensores remotos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O contexto geológico-geomorfológico ao qual a Ilha de Cotijuba pertence é relativo ao Neógeno (Mioceno a Plioceno) e Quaternário (Pleistoceno ao Holoceno) vinculado as Formações Barreiras e Pós-Barreiras.

Este reflete processos de sedimentação costeira e fluvial, indicando ambientes de deltas, estuários e planícies de inundação. A transição entre as duas unidades não é contínua, representando uma lacuna erosiva significativa (Rossetti et al. 2001). A Ilha de Cotijuba está localizada em um ambiente de transição entre rio e mar (estuário), ou seja, está sujeita ao fluxo de marés e sedimentos mistos,

transportados pelos rios e pela corrente marítima. Esses ambientes são dinâmicos e estão constantemente sofrendo alterações devido aos processos de erosão e deposição de sedimentos.

Silva (2021) com base em levantamentos de campo e caracterização em Sistema de Informações Geográficas (SIG), delimitou três unidades geológicas presentes na Ilha de Cotijuba. Essa classificação teve o intuito de definir unidades geoambientais e considerou a compartimentação geológica de fundamental importância, bem como fator determinante para o entendimento do meio.

Para a área de estudo, adquiriu-se a imagem do satélite CBERS 4A, sensor WPM (Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura), coleção: CBERS4A_WPM_L4_DN, com data de passagem em 10/08/2023 às 13h58min, contendo as bandas dos espectros azul, verde e vermelho (RGB), além da banda pancromática (PAN) e do infravermelho próximo (NIR), com resolução espacial na faixa de 2 a 8 metros.

As ferramentas utilizadas para o PDI no QGIS, são os complementos Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) versão 7.10.11 Matera, desenvolvido por Congedo (2021), e o complemento Orfeo ToolBox (OTB) versão 8.1 Centre National D'études Spatiales (CNES 2019). Ambos são softwares Open Source, assim como o QGIS. Isso significa que são disponibilizados gratuitamente para qualquer usuário acessar, copiar, modificar e redistribuir.

As duas ferramentas foram utilizadas nos processos de PDI de forma semelhante no que diz respeito as etapas de segmentação, coleta de amostras, treinamento de algoritmo e classificação.

Para o empilhamento das bandas de 8 m de resolução espacial, empregou-se as funções nativas do software QGIS, correspondentes às ferramentas de agregação de imagem (Raster>>Miscelânia>>Mosaico); após foi aplicada a ferramenta de fusionamento com a banda de 2 metros para melhor definição dos alvos (função "pansharpening", do GDAL que faz parte do módulo de ferramentas nativas do QGIS).

Para gerar uma imagem de falsa cor, utilizou-se a funcionalidade de estilização de bandas para opção Multibanda Colorida (R:4, G:3, B:2), afim de possibilitar uma melhor distinção de cores e realce das feições na área de estudo.

Utilizando a composição de bandas cor verdadeira, empregando a ferramenta do SCP, foram definidas classes de assinaturas para discriminação dos elementos em amostras de treinamento (ROI e Signature

list, função “Training Input”). As categorias definidas foram: 1 - Rocha; 2 - Areia; 3 - Vegetação; 4 - Água; 5 - Solo Exposto; e 6 - Construções.

A seguir, foram indicadas as micro classes (id_class), na função de processamento de bandas, utilizou-se a classificação supervisionada com o algoritmo “Maximum Likelihood”, que executa a classificação multiespectral pixel a pixel.

Com a caixa de ferramenta do OTB, a metodologia inicia com a divisão da imagem em objetos significativos baseados em regiões delimitadas ou objetos visualmente homogêneos.

Com a mesma imagem utilizada anteriormente, na composição de bandas cor verdadeira é aplicada a função de seleção de amostras. Foram consideradas as informações dos pixels vizinhos, uma vez que estes permitem adaptar a sensibilidade do algoritmo em relação a dinâmica e a resolução espectral da imagem (função “Spatial radius” e “Range radius”).

Estes foram definidos respectivamente em 5 e 20, para menor raio espacial da vizinhança e maior suavização de ruído nas bordas. O arquivo de saída foi definido para o modo vetor e o tipo “int16” para seguir padrão da camada de entrada (comp. bandas), para então gerar o arquivo de seleção de amostras. Em seguida, foram calculados os valores de média e desvio padrão para cada uma das bandas (B1, B2, B3, B4).

Os polígonos que correspondem as classes de amostras (389 no total), foram selecionados manualmente com base em suas características visuais da imagem e atribuídos valores inteiros na tabela de atributos para cada classe que deverá ser classificada posteriormente. Em seguida, realizou-se o treinamento do algoritmo (função “TrainVectorClassifier”).

A camada de entrada utilizada foi a de amostras definida anteriormente, com as respectivas classes e suas estatísticas zonais. O algoritmo escolhido para treinar o classificador foi Random Forest (rf).

A validação dos dados deu-se por meio da matriz de confusão (Vieira et al., 2012). Para gerar o conjunto de amostras de classe 1 (rocha) e classifica-las em cada método, inicialmente baseou-se em 7 amostras independentes (Pontos piloto – Pp) por meio da interpretação visual das imagens CBERS 4A, como aquisição primária para a validação.

3 RESULTADOS

As rochas localizadas entre a Praia do Vai-quem-quer e a Praia Funda foram evidenciados como exposições das unidades geológicas das Formações Barreiras/Pós Barreias.

As coberturas lateríticas são definidas por sedimentos semi-consolidados com concreções em diversas fases de retrabalhamento erosivo.

Foram observados sedimentos argilo-arenoso marrom avermelhado, com aspecto mosqueado, altamente intemperizados, dispersos localmente nos horizontes arenosos das praias e concentrados em algumas porções as margens dos taludes. Estes aspectos relacionam-se com o descrito anteriormente por França (2003) e João (2013).

Considerando os resultados obtidos pela validação da acurácia, análises visuais de fotointerpretação e registros de campo, a classificação fundamentada no algoritmo Random Forest baseada em objetos, obteve o melhor resultado, com melhor distinção entre as classes e delimitações preliminares próximas à classificação pixel a pixel (Figura 1).

Na classificação supervisionada pelo algoritmo MAXVER resultou em aproximadamente 66% de exatidão global. Para a Classe 1 (Rocha) foi obtido 88% de confiabilidade em acurácia do usuário (AU) e 79% em conformidade segundo a acurácia do produtor (AP).

Na classificação realizada com o algoritmo “Randon Forest” foi obtido 77,37% de exatidão global. E para a Classe 1, 92% de confiabilidade em acurácia do usuário (AU) e 85% de conformidade do produtor (AP) (Tabela 1).

4 DISCUSSÕES

As metodologias utilizadas dispõem de potencialidades para adquirir dados de ocorrências de rochas e que sejam mapeáveis através do sensoriamento remoto e imagens de alta resolução disponíveis gratuitamente.

A análise comparativa indica que a classificação baseada em objetos apresenta melhores resultados, pois considera informações espectrais, espaciais, texturais e contextuais para cada classe, e não apenas grupos de pixels (Ouchra et al., 2022).

Figura 1 - a) Resultado comparativo: metodologias (a) pixel a pixel e (b) orientada a objetos.

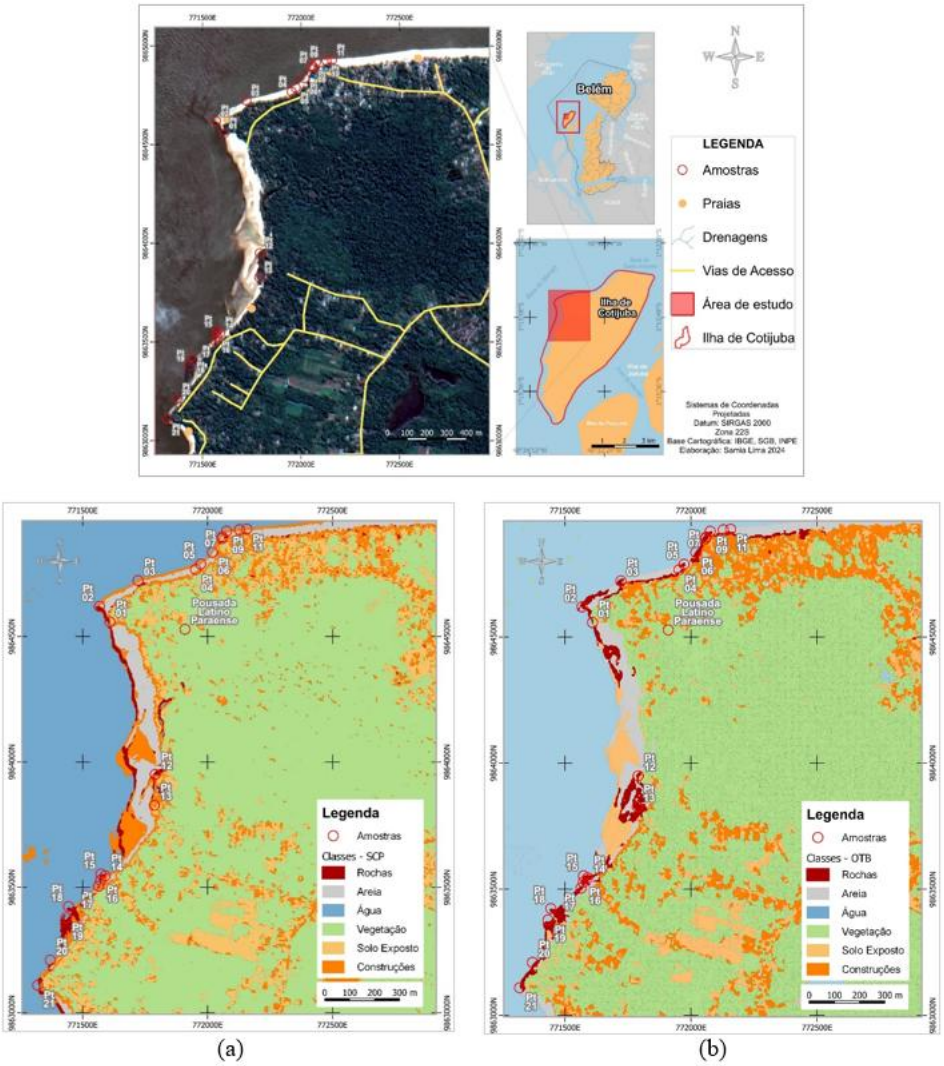


Tabela 1 - Matriz gerada para a classificação Randon Forest.

		Validação						Total de amostras	Acurácia do Usuário
	Classes	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**		
R. Forest (OTB)	1 - Rocha	**71**	2	3	0	0	2	**78**	0.920
	2 - Areia	7	**54**	9	5	2	0	**77**	0.816
	3 - Água	2	8	**41**	11	0	0	**62**	0.774
	4 - Vegetação	8	2	11	**48**	0	0	**69**	0.698
	5 - Solo Exposto	0	11	0	0	**25**	0	**36**	0.815
	6 - Construções	0	0	0	4	1	**62**	**67**	0.908
	Total	88	77	64	68	28	64	**389**	
	Acurácia do Produtor	0.855	0.801	0.763	0.689	0.872	0.962		
	Exatidão global	77.37							

Esse método demonstrou eficiência e precisão para mapeamentos geológicos e de exploração mineral em abordagens aplicadas por Mohamed (2016) em modelagem estrutural em larga escala e controle estrutural de veios mineralizados.

Ressalta-se que na região amazônica o espesso manto intempérico dificulta o mapeamento do material rochoso aflorante, em geral este está sob uma camada de solo residual com cobertura vegetal

associada. Porém, tais fatores não são impeditivos de um melhor aproveitamento do sensoriamento remoto no mapeamento geológico, havendo necessidade apenas de aprimoramento da técnica em função dos alvos escolhidos.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que o mapa da área de estudo gerado através da classificação orientada a objetos, utilizando as ferramentas do OTB aplicadas na imagem CBERS 4A/WPM, apresentou valores de acurácia melhores que a classificação pixel a pixel. Independentemente dos valores considerados nas outras classes, a classe 1 “Rocha” atingiu o resultado concordante com a amostragem/validação de campo.

O mapeamento geológico com o suporte de técnicas de sensoriamento remoto auxilia no alcance de uma resposta mais descritiva da área avaliada. A conjugação de métodos de mapeamento que potencializem o tempo das atividades de campo e permitam contemplar maiores áreas fornecem resultados de maior aplicação, como na Ilha de Cotijuba. Com potencial de serem adotados como subsídio ao planejamento do uso e ocupação da faixa de praial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blaschke, T. (2010). Análise de imagem baseada em objetos para sensoriamento remoto. Jornal ISPRS de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, 65, 2-16.

Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. Journal of Open-Source Software, 6, 64, 3172.

França, C. F. (2003). Morfologia e mudanças costeiras da margem leste da Ilha de Marajó - (PA). 144 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Pará, Belém.

Gizdavec, N.; Gasparov, M.; Miko, S.; Luzar, B. (2022). Discrimination of Rock Units in Karst Terrains Using Sentinel-2A Imagery. Remote Sensing, 14, 20, 5169.

João, X. S. J. (2013). Geodiversidade do Estado do Pará. Belém: Serviço Geológico do Brasil - SGB. Apêndice I, 221-260.

Mohamed, M. V. (2016). Object-Oriented Image Classification Method of Automatic Lineaments Extraction Contribution to Geological Fractures of Anti-Atlas, Morocco. European Journal of Scientific Research, 142, 87-104.

Mohammadizad, R.; Arfania, R. (2017). Advanced Investigation of Remote Sensing to Geological Mapping of Zefreh Region in Central Iran. Open Journal of Geology, 7, 1509-1529.

Ouchra, H.; Belangour, A.; Erraissi, A. (2022). A Comparative Study on Pixel-based Classification and Object-Oriented Classification of Satellite Image. International Journal of Engineering Trends and Technology. 70, 8, 206-215.

Rossetti, D. F.; Góes, A. M.; Souza, L. S. B. (2001). Estratigrafia da sucessão sedimentar Pós-Barreiras (Zona Bragantina, Pará) com base em radar de penetração no solo. Revista Brasileira de Geofísica, 19, 2, 113-130.

Silva, E. K. L. R. (2021). Análises das paisagens da ilha de Cotijuba: através do mapeamento das unidades geoambientais. 79 f.. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Pará, Belém.

Vieira, M. A.; Formaggio, A. R.; Rennó, C. D.; Atzberger, C.; Aguiar, D. A.; Mello, M. P. (2012). Object Based Image Analysis and Data Mining applied to a remotely sensed Landsat time-series to map sugarcane over large areas. Remote Sensing of Environment, 123, 553-562.

conhecimentolivre.org/home
contato@conhecimentolivre.org
editoraconhecimentolivre

GEOLOGIA: ORIGEM E TRANSFORMAÇÃO

VOLUME III

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE