MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA

RYAN DE AZEVEDO PEREIRA

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO GARIMPO NA TERRA INDÍGENA YANOMAMI DE 2017 A 2022

BELÉM

2023

RYAN DE AZEVEDO PEREIRA

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO GARIMPO NA TERRA INDÍGENA YANOMAMI DE 2017 A 2022

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da Universidade Federal Rural da Amazônia como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura

Orientador: Prof. Me. Carlos Rodrigo Tanajura Caldeira
Coorientador: Prof. Me. Josevando de Sousa Silva

BELÉM
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P436g Pereira, Ryan de Azevedo
Geotecnologias aplicadas na análise da evolução do garimpo na terra indígena Yanomami de 2017 a 2022 / Ryan de Azevedo Pereira. - 2023.
39 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - 3, , Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2023.
Orientador: Prof. Me. Carlos Rodrigo Tanajura Caldeira
Coorientador: Prof. Me. Josevando de Sousa Silva.

1. Garimpo. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Processamento Digital de Imagens. I. Caldeira, Carlos Rodrigo Tanajura, *orient.* II. Título

---

CDD 621.3678

RYAN DE AZEVEDO PEREIRA

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO GARIMPO NA TERRA INDÍGENA YANOMAMI DE 2017 A 2022

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da Universidade Federal Rural da Amazônia como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura

Aprovado em 19/04/23

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Carlos Rodrigo Tanajura Caldeira
Orientador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Profª. Me. Mayara Cobacho Ortega Caldeira
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Profª. Me. Carolina Gonçalves da Silva
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e incentivo.

Aos colegas de turma, por me acompanharem ao longo dessa jornada.

Ao corpo docente da Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, pelas orientações e pelo conhecimento compartilhado.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

A exploração irregular de ouro consiste em um dos processos responsáveis pela vulnerabilização de povos tradicionais. É o caso da terra indígena Yanomami, aonde as atividades garimpeiras apresentaram um alto crescimento nos últimos anos, sendo responsável pela crise sanitária que afeta a região atualmente. Nesse contexto, as técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto facilitam a detecção de áreas exploradas de forma indevida, auxiliando tomadas de decisão por órgãos responsáveis pela gestão do meio ambiente. O presente estudo objetivou avaliar a evolução do garimpo em uma porção da terra indígena Yanomami entre os anos de 2017 a 2022. Foram utilizadas imagens do satélite PLANET, obtidas pelo programa de acesso a dados de satélite Iniciativa Internacional de Clima e Florestas Norueguesa (NICFI, em inglês). Pra identificar e quantificar as áreas de garimpo utilizou-se o método de classificação supervisionada de imagens pela máxima verossimilhança. A classificação de imagens e a elaboração de peças cartográficas foi feita no *software* QGIS 3.22. Em 2017 foi identificado um total de 5,2659 hectares de garimpo e em 2022 foi identificado um total de 876,3898 hectares de garimpo. O maior incremento observado ocorreu no ano de 2020 pro ano de 2021, quando a área de garimpo apresentou um aumento de 449,76%. Esse período coincidiu com o aumento do preço do ouro no mercado internacional. Os resultados obtidos permitiram observar as regiões nas quais o garimpo estava presente a mais tempo, tal qual regiões aonde a atividade se deu de forma mais intensa.

Palavras-chave: classificação por máxima verossimilhança; sensoriamento remoto; imagem do satélite PLANET; exploração ilegal de ouro; Amazônia.

ABSTRACT

Irregular gold mining is one of the processes responsible for the vulnerability of indigenous peoples. This is the case of the Yanomami indigenous land, where mining activities have shown a high growth in recent years, being responsible for the health crisis happenning currently. In this context, geoprocessing and remote sensing techniques aid the detection of improperly exploited areas, helping decision-making by organizations responsible for environmental management. The present study aimed to evaluate the evolution of mining in a portion of the Yanomami indigenous land between the years 2017 to 2022. Images from the PLANET satellite were used, obtained by the satellite data access program Norwegian International Climate and Forestry Initiative (NICFI). To identify and quantify the mining areas, the maximum likelihood classification method was used. The satellite image classification and map elaboration were done in the software QGIS 3.22. In 2017, a total of 5.2659 hectares of mining were identified and in 2022 a total of 876.3898 hectares of mining were identified. The biggest increase observed occurred from 2020 to 2021, when the mining area increased by 449.76%. This period coincided with the gold price increase on the international market. The results obtained made it possible to observe the regions in which mining had been present for the longest time, as well as regions where the activity took place more intensely.

Keywords: maximum likelihood classification; remote sensing; PLANET satellite image; ilegal gold mining; Amazon.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 8
2. OBJETIVOS 10
2.1. Objetivo geral 10
2.2. Objetivos específicos 10
3. REFERENCIAL TEÓRICO 11
3.1. Garimpo na Amazônia 11
3.2. Impactos do Garimpo 13
3.3. Uso de Geotecnologias para Análises Ambientais 15
3.4. Classificação de imagens pelo método da máxima verossimilhança 17
4. METODOLOGIA 18
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 23
6. CONCLUSÃO 31
REFERÊNCIAS 32
APÊNDICE A – IMAGEM PLANET DE 2017 CLASSIFICADA 36
APÊNDICE B – IMAGEM PLANET DE 2018 CLASSIFICADA 37
APÊNDICE C – IMAGEM PLANET DE 2019 CLASSIFICADA 38
APÊNDICE D – IMAGEM PLANET DE 2020 CLASSIFICADA 39
APÊNDICE E – IMAGEM PLANET DE 2021 CLASSIFICADA 40
APÊNDICE F – IMAGEM PLANET DE 2022 CLASSIFICADA 41

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia têm sido um espaço no qual a exploração de ouro assumiu grande importância. Essa atividade está diretamente associada à valorização do ouro no mercado internacional: nos momentos em que o preço desse metal sobe, aumentam os conflitos nas regiões em que ele pode ser encontrado (MONTEIRO et al., 2010). A exploração irregular do ouro consiste em um dos processos responsáveis pela vulnerabilização de povos tradicionais. Essa atividade costuma ser realizada em ciclos que persistem até enfrentarem resistência ou esgotarem todos os recursos a serem extraídos, deixando um rastro de destruição oriundo das atividades garimpeiras (ROCHA e PORTO, 2020).

A garimpagem, que consiste em uma modalidade antiquada de mineração, possui como principal característica os extensos impactos ambientais causados pelo desmatamento e contaminação de água e solo através do despejo inadequado de mercúrio. Devido à falta de acompanhamento dessas atividades, se torna difícil o controle e monitoramento da degradação ambiental gerada (BRITO, 2021). Tal falta de fiscalização fica mais clara em regiões nas quais o poder do Estado não está tão presente, o que é evidenciado pela falta de equipamentos, de prestação de serviços e de repressão a atos ilícitos de forma geral. É o caso da terra indígena Yanomami, localizada na região norte do Brasil (RAMOS; ABRAHÃO; RODRIGUES, 2020). Os Yanomami são considerados uma das mais antigas populações que se mantiveram isoladas de outros povos, estando entre as maiores tribos existentes na Amazônia. As informações concretas mais antigas referentes a esse povo datam da década de 1950, registradas por missionários evangélicos e católicos. Na sua história mais atual observa-se um processo de desgaste e marginalização do indígena, oriundo da expansão político-econômica brasileira (BARAZAL, 2001).

Segundo levantamento do MapBiomas (2021), o garimpo na terra indígena Yanomami praticamente desapareceu após os anos 90, retornando a partir de 2016 com 20 hectares de área de garimpo observada. A partir desse ano, observou-se um crescimento exponencial da exploração da região, chegando a mais de 1000 hectares no ano de 2021. Devido à contaminação de rios por causa do garimpo, atividades de pesca e o acesso a água são dificultados. Nos últimos anos, apenas eventuais operações da Polícia Federal e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) foram realizadas para a destruição do maquinário utilizado. O ápice da crise de saúde na região se deu em 2022, com o aumento de casos de desnutrição grave (SASSINE, 2023). Esse cenário é preocupante, pois as terras indígenas são

dotadas de atributos que requerem o seu resguardo e utilização consciente, possuindo função estratégica na defesa da biodiversidade por apresentam características diferenciadas de demais espaços ambientais. Devido a abrigarem os mais variados recursos naturais e serviços ecológicos, a proteção dos territórios e a preservação do patrimônio cultural indígena ganham grande destaque no cenário de implementação de políticas ambientais (BRITO e BARBOSA, 2015).

Nesse contexto, o sensoriamento remoto constitui uma ferramenta vital para auxiliar a preservação do meio ambiente. Segundo Lopes (2008), as técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto facilitam a detecção de áreas exploradas de forma indevida e fornecem a sua localização precisa, auxiliando as tomadas de decisão na gestão do meio ambiente por parte dos órgãos responsáveis. Quanto ao processamento de imagens digitais obtidas pelo sensoriamento remoto, nota-se que os seus métodos de aplicação têm evoluído, aumentando ainda mais a aplicabilidade das imagens de satélite, tornando-se importantes para mensurar impactos ambientais e planejar a utilização de recursos naturais (ORTIZ e FREITAS, 2005). Portanto, torna-se necessária a avaliação do impacto das atividades de garimpo na terra indígena Yanomami por meio de tais geotecnologias. A área de estudo foi escolhida levando em consideração a sua importância como patrimônio histórico e cultural, além do fato de que a atividade garimpeira na região deu-se recentemente, e ainda não existem muitos estudos que quantifiquem os danos que foram causados. Ademais, por ser uma área de difícil acesso, o sensoriamento remoto por meio de imagens orbitais entra como ferramenta fundamental para a avaliação dos impactos na área. A dificuldade de acesso à região e a sua constante nebulosidade fazem com que exista uma certa escassez de dados geográficos e de imagens de satélite nítidas da área.

Tendo em vista esses fatores adversos e a importância do estudo, pode-se perguntar: Podemos mapear e quantificar o avanço do garimpo na terra indígena Yanomami? Será possível mostrar o quanto foi degradado e perdido nas áreas da terra indígena entre os anos de 2017 a 2022? Os resultados desse trabalho poderão auxiliar os órgãos competentes para fiscalizar e combater o garimpo ilegal na terra indígena?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar a evolução do garimpo na terra indígena Yanomami entre os anos de 2017 a 2022 através do uso de geotecnologias.

2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- Quantificar o crescimento das áreas de garimpo por meio da aplicação de técnicas de classificação de imagens de satélite;
- Analisar a dinâmica do crescimento do garimpo na área através de uma série multitemporal de mapas; e
- Comparar a devastação medida com a que ocorreu na área de estudo nos anos 90 consultando trabalhos realizados na época.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Garimpo na Amazônia

A extração minerária é uma das atividades mais antigas exercidas pelo homem. Isso fica evidenciado em um país como o Brasil, considerando a importância que a descoberta de ouro teve para o seu desenvolvimento inicial (COSTA e REZENDE, 2012). A garimpagem se fez presente na história brasileira desde as primeiras medidas estabelecidas pela Coroa Portuguesa durante o século XVI para estimular a descoberta de ouro. Na época, a produção de minérios no Brasil era feita totalmente pelo garimpo. Ao longo dos séculos seguintes, o ouro se tornou um metal presente nos principais momentos da história brasileira (SALOMÃO, 1982).

A Lei n° 11.685 de 2008, que instituiu o Estatuto do Garimpeiro no Brasil, define o garimpo como uma área na qual são extraídas substâncias minerais garimpáveis (ouro, diamante, cassiterita, entre outros). Essa extração é feita com o aproveitamento imediato do jazimento mineral, de acordo com critérios técnicos definidos pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DPNM), sem haver a necessidade de trabalhos prévios de pesquisa (BRASIL, 2008).

Na região amazônica, os primeiros registros de exploração de ouro datam de 1603, quando a Carta Imperial citou o estado do Pará como um grande produtor do metal. No ano de 1980, após grandes investidas à procura de ouro, ocorreu a descoberta das jazidas de Serra Pelada. Iniciou-se assim a última grande “corrida do ouro” na Amazônia. O ápice dessa agressão se deu em Roraima, onde a partir de 1987 os garimpeiros invadiram a reserva dos Yanomamis para explorar seu território, introduzindo sequelas profundas na vida dos povos indígenas (GUIMARÃES; SILVA; DUTRA, 1994).

Na década de 80 o número estimado de garimpeiros na área chegou a ser cinco vezes maior que o número de indígenas. A expansão da fronteira de exploração mineral na região superou todas as formas anteriores de contato entre os Yanomami com a sociedade. A “corrida do ouro” em Roraima foi parcialmente detida a partir de 1990, por meio de repetidas tentativas da Fundação Nacional do Índio (FUNAI) e da Polícia Federal. A terra indígena Yanomami foi demarcada em novembro de 1991 e homologada em 1992, o que resolveu o problema jurídico, mas não afastou permanentemente a agressão de invasores. Pequenos núcleos de garimpeiros

permaneceram instalados na área onde continuaram a causar violência e graves problemas de saúde (MILIKEN et al., 2002).

No Brasil, verifica-se a ausência de licenças ambientais ou de fiscalizações por parte dos órgãos responsáveis pela mineração no país. Consequentemente, os garimpeiros ficam em um certo estado de comodismo no que diz respeito à possível diminuição dos impactos causados ou mesmo de melhoria das condições de trabalho às quais os garimpeiros são submetidos (FERNANDES e FILHO, 2016). A falta de um planejamento adequado para tais atividades ocasiona em danos de difícil reparo ao meio ambiente, como a perca de ecossistemas nativos, assoreamento e poluição de corpos hídricos, contaminação do solo, entre outros. Por serem realizadas em locais distantes de centros urbanos, poucas pessoas testemunham a grandiosidade de seus efeitos (PORTELLA, 2015).

3.2. Impactos do Garimpo

Impacto ambiental, segundo a Resolução n° 1 de 1986 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), pode ser definido como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente que resultem de atividades humanas. Impactos ambientais, direta ou indiretamente, afetam a saúde, segurança e bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e/ou a qualidade dos recursos ambientais (BRASIL, 1986).

É importante ressaltar que impactos ambientais não se restringem apenas a consequências ecológicas, também apresentando repercussões nos âmbitos social, econômico e cultural. A realocação de populações tradicionais devido à implantação de um empreendimento, por exemplo, pode desfazer uma série de relações e referenciais de memória, modificando profundamente os seus modos de vida (SÁNCHEZ, 2020).

Devido ao aumento da preocupação com o meio ambiente ao longo dos anos, impactos ambientais são constantes alvos de discussões, com uma procura cada vez maior pela sustentabilidade. No que diz respeito a atividades de mineração, estas são caracterizadas por causarem grandes alterações no equilíbrio ecológico nas áreas em que são implantadas, causando danos irreversíveis aos ecossistemas envolvidos e afetando as populações adjacentes (SILVA e ANDRADE, 2017).

Impactos causados por atividades minerárias, tanto de cunho social quanto ambiental, se encontram evidentes na área de interesse do presente estudo. Os habitantes da terra indígena Yanomami apresentam quadro de desnutrição grave e malária, motivo pelo qual foi decretado estado de emergência na região. Observa-se um processo de cooptação das comunidades indígenas pelo garimpo, no qual indígenas mais jovens são atraídos à Venezuela com promessas de ouro e pedras preciosas, comprometendo a caça – atividade predominantemente masculina –, deixando as mulheres das comunidades divididas entre fazer a roça e pescar ao mesmo tempo que cuidam das crianças. A pesca também é comprometida pela contaminação de rios pelo mercúrio, o que contribui para o cenário atual de fome da população indígena (CARVALHO, 2023).

No garimpo, o mercúrio é utilizado para separar as partículas finas de ouro de outras substâncias presentes nos sedimentos do rio. Os rejeitos de mercúrio gerados ao longo desse processo são descartados nas áreas de garimpo. Devido ao manuseio inadequado, também ocorrem percas desse material nos rios e solos (LACERDA e SALOMONS, 1992).

A intoxicação por mercúrio, por causar danos irreversíveis e estar associada a outros fatores de risco, representa uma grande ameaça a populações em áreas de garimpo. Tais riscos evidenciam a necessidade de um monitoramento constante destes povos (PAULA; CORRÊA; TUTUNJI, 2006). Além da poluição de água, ar e solo advinda da contaminação mercurial, um efeito de grande impacto visual do garimpo de ouro é o desmatamento. Após a descoberta de deposição de materiais auríferos ao longo de cursos d'água e levantamento dos melhores pontos de extração, é feita a limpeza do local por meio da remoção da vegetação existente nas margens do rio (LIMA, 2005).

As florestas existentes ao longo de rios e córregos (mata ciliar), por reduzirem o escoamento da água da chuva, contribuem para a diminuição do assoreamento do leito de corpos d'água. Além disso, fornecem alimento e proteção à fauna, contribuindo para o seu desenvolvimento e diversidade. A falta de consciência ecológica para com os recursos florestais pode resultar em perdas irreparáveis (LORENZI, 2009).

Florenzano (2011) destaca que as imagens de satélite, por fornecerem uma visão ampla e multitemporal da superfície terrestre, evidenciam os ambientes e suas transformações. Por ressaltar os danos causados pela exploração de recursos minerais como a perca da vegetação e a poluição de recursos hídricos, os mesmos podem ser estudados e monitorados com o auxílio de imagens de satélite.

3.3. Uso de Geotecnologias para Análises Ambientais

Também conhecidas como “geoprocessamento”, as geotecnologias são tecnologias utilizadas para a coleta, tratamento e análise de dados que possuem referência geográfica, ou seja, estão associados a algum sistema de coordenadas. As imagens obtidas por sensores remotos, os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) e a cartografia digital são exemplos de geotecnologias, sendo ferramentas eficazes para a tomada de decisões (ROSA, 2005).

Os seres humanos concentram suas atividades predominantemente na porção superficial da Terra. Conhecer a localidade em que tais atividades acontecem é crítico, pois isso possibilita visitar ou enviar alguém ao local, buscar informações relacionadas ao mesmo lugar ou informar pessoas que morem nas proximidades. A localização geográfica é uma variável importante, e os SIGs consistem em um tipo especial de informação que não se preocupa apenas com os eventos ou atividades que ocorrem, mas também com o local em que eles ocorrem (LONGLEY et al., 2013).

O sensoriamento remoto pode ser definido como sendo a utilização conjunta de sensores – a bordo de aeronaves, espaçonaves ou outras plataformas – e equipamentos para processamento e transmissão de dados. Isso é feito com o objetivo de estudar a superfície do planeta terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que a compõem em suas mais diversas manifestações (NOVO, 2010).

As energias eletromagnéticas da superfície são captadas pelos sensores de satélites sem contato físico com a mesma. As informações são adquiridas a partir das interações entre o objeto e o sinal emitido, sendo que esse sinal pode incluir um campo eletromagnético, ondas acústicas ou perturbações do campo de gravidade ou potencial magnético com a presença do objeto. Geralmente a aquisição de informações é baseada na captação dos sinais eletromagnéticos, cujo espectro cobre desde as ondas de rádio, de maior comprimento de onda, aos raios gama, de menor comprimento de onda (LIU, 2006).

Satélites coletam dados em um conjunto de bandas espectrais: uma imagem em cor real, por exemplo, teria três bandas de dados (vermelho, verde e azul), com cada banda representando as diferentes intensidades de cada cor. Tal coleta resulta em um arquivo em formato *raster*, que consiste em uma matriz de milhares de elementos pictóricos denominados *pixels*. Cada *pixel* contém uma unidade de informação referente à assinatura espectral dominante naquela área e a sua posição XY. Imagens de satélite são submetidas à vários erros, mas é comum que distribuidores processem os dados brutos através de algoritmos para “limpar” a informação

antes da entrega ao consumidor final. Erros de posicionamento, por exemplo, podem ser sanados através do georreferenciamento da imagem à coordenadas terrestres, de modo que os erros posicionais não sejam significantes à escala de mapeamento que está sendo utilizada (FALKNER e MORGAN, 2002).

A identificação dos materiais da superfície terrestre pelo seu comportamento no espectro eletromagnético gera imagens de sensoriamento remoto multiespectrais que podem ser classificadas, ou seja, ter cada um dos valores numéricos de seus *pixels* associado a uma determinada classe (solo, vegetação, etc.). Os valores dos *pixels* definidos pela reflectância dos materiais que o compõem são identificados de acordo com seu respectivo material da superfície terrestre. Quando isso é realizado para todos os *pixels* de uma imagem, obtém-se um mapa temático que mostra a distribuição geográfica de um determinado tema. Uma imagem de sensoriamento classificada é uma forma de mapa digital temático que, ao ser ajustada a uma dada projeção cartográfica, torna-se um importante elemento para ser incorporado em um SIG (CRÓSTA, 1992).

A classificação de imagens, juntamente às etapas de pré-processamento e realce visual, estão incluídas entre as conhecidas técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI). A interpretação visual de imagens de sensores remotos é mais adequada quando há interesse apenas na aparência geral das feições existentes. Para avaliações mais criteriosas, o PDI se torna mais vantajoso, possibilitando a análise de quantos *pixels* ou bandas for necessário. A classificação de imagens utiliza o reconhecimento de padrões e regiões homogêneas através de algoritmos estatísticos ou determinísticos para estabelecer quais áreas pertencem a determinada classe, utilizando a informação espectral dos *pixels* e baseando-se nas propriedades espectrais e espaciais dos objetos que constituem as classes de interesse (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

Os métodos de classificação de imagem costumam ser categorizados como “supervisionados” ou “não supervisionados”. A classificação não supervisionada é um processo mais automatizado, baseado inteiramente na distribuição de dados na imagem, com o classificador gerando classes a partir do agrupamento de *pixels* de características semelhantes. A classificação supervisionada requer que o usuário selecione porções da imagem que representem cada classe para servirem como dados de treinamento, que “ensinam” o classificador a diferenciar as classes desejadas (LIU e MASON, 2009).

3.4. Classificação de imagens pelo método da máxima verossimilhança

Como exemplo de classificação supervisionada, tem-se o método da máxima verossimilhança, ou MAXVER, que consiste em uma abordagem estatística no reconhecimento de padrões. Ele parte do princípio de calcular a probabilidade de um *pixel* pertencer a uma determinada classe, com o *pixel* sendo atribuído à classe na qual a probabilidade é maior (TSO e MATHER, 2009).

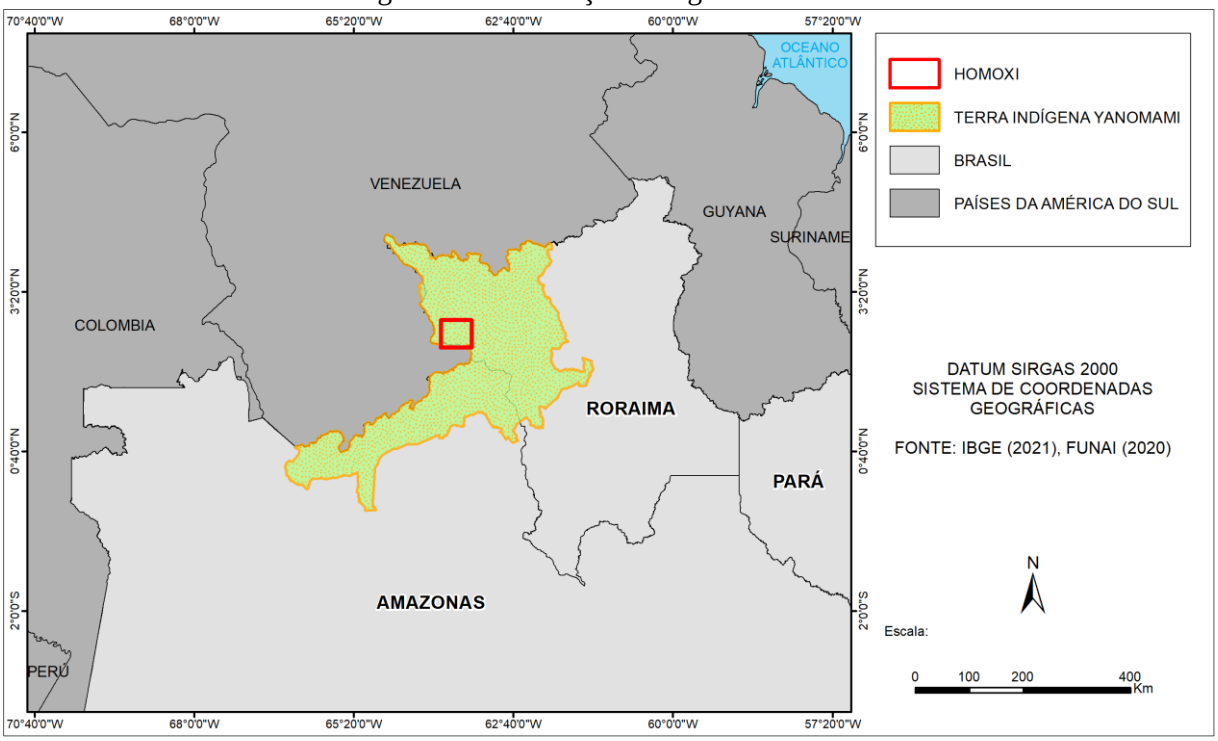
As amostras de treinamento são coletadas pela vetorização em forma de polígonos das áreas desejadas, e a partir dos valores da média e da covariância dos *pixels* amostrados é realizado o cálculo da probabilidade dos *pixels* que não fazem parte das amostras pertencerem às mesmas. Por se tratar de uma análise estatística, a sua precisão aumenta proporcionalmente ao tamanho da amostra, ou seja, à quantidade de *pixels* amostrados (FITZ, 2008). Como todo método de classificação supervisionada, a classificação MAXVER requer um conhecimento prévio da área a ser analisada, pois as amostras de treinamento precisam estar localizadas em regiões nas quais o analista conhece a realidade do terreno. De modo geral, isso se dá através da inspeção visual das imagens, o que é facilitado se as mesmas possuem alta resolução espacial (ZANOTTA; FERREIRA; ZORTEA, 2019)

O método de classificação de imagens pela máxima verossimilhança foi escolhido levando em consideração a sua facilidade de ser aplicada, além de sua maior precisão em análises de uso e cobertura do solo se comparado a outros métodos de classificação. Tal diferença já foi atestada por diversos trabalhos de análise comparativa de técnicas de classificação de imagem, motivo pelo qual o método MAXVER está entre os classificadores supervisionados mais utilizados atualmente (VALE et al., 2008; FIGUEIREDO e CARVALHO, 2007; MOREIRA et al., 2016).

4. METODOLOGIA

A terra indígena Yanomami abrange o oeste do estado de Roraima e norte do estado de Amazonas. A porção desse território considerada no estudo está inserida na região de Homoxi, localizada próxima à fronteira entre o Brasil e a Venezuela (Figura 1).

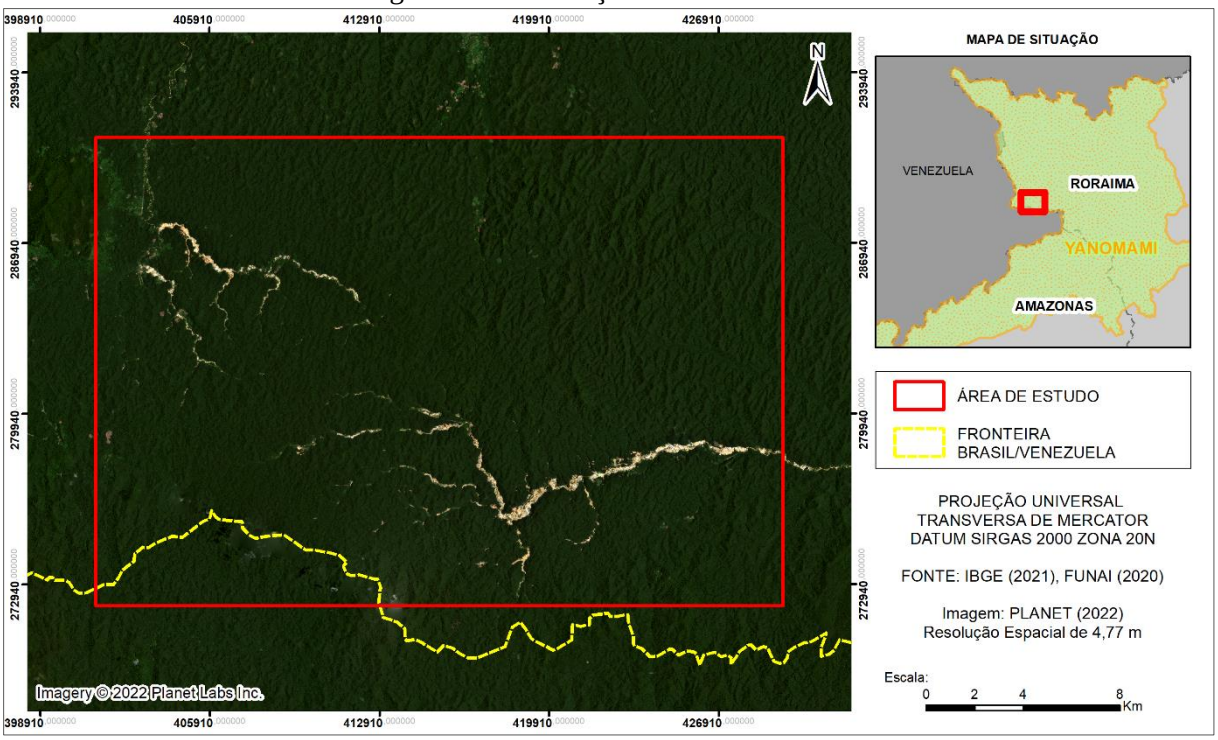
Figura 1 – Localização da região de estudo



Fonte: O autor (2023).

O recorte espacial considerado (Figura 2), situado entre as coordenadas 63°53’19” W, 63°38’1” W, 2°27’40” N, 2°38’6” N, situa-se no Alto rio Mucajaí, com uma área de aproximadamente 55000 hectares.

Figura 2 – Localização da área de estudo



Fonte: O autor (2023).

Essa área foi escolhida por estar entre as mais afetadas pelo garimpo na terra indígena Yanomami. Além disso, é uma área considerada como um dos principais eixos da invasão de garimpeiros na região (HAY, 2022).

As imagens de satélite utilizadas foram obtidas por meio do programa de acesso a imagens de satélite Iniciativa Internacional de Clima e Florestas Norueguesa (NICFI, em inglês), que consiste em disponibilizar mosaicos feitos com imagens do satélite PLANET para estudos em regiões tropicais. As imagens disponibilizadas pelo programa abrangem regiões localizadas entre as latitudes 30° N e 30° S.

O acesso aos dados é feito pelo site planet.com/nicfi, após a realização de um cadastro no qual o usuário fornece informações relacionadas a como as imagens serão utilizadas. Após o cadastro, o *download* das imagens é disponibilizado de forma gratuita, com a condição de que as mesmas sejam utilizadas para fins não lucrativos e que a PLANET seja citada como a provedora das imagens.

Além da alta resolução espacial de 4,77 metros, as imagens são ortorretificadas e corrigidas atmosfericamente, possibilitando a identificação e classificação das áreas de garimpo de forma precisa e dispensando a necessidade de tratamentos ou correções nas imagens. Foram utilizadas imagens de 2017 a 2022, possuindo 4 bandas espectrais (vermelho, verde, azul e infravermelho próximo) e resolução radiométrica de 12 bits. Do período de dezembro de 2015

a agosto de 2020 as imagens disponibilizadas possuem resolução temporal de 6 meses, e de setembro de 2020 em diante, as imagens possuem resolução temporal mensal.

Conforme a Figura 3, foi escolhida uma imagem por ano, com as imagens de 2017 a 2019 sendo do mês de dezembro e as de 2020 a 2022 do mês de setembro. Em qualquer análise multitemporal o ideal é que o intervalo de tempo entre as observações permaneça constante, mas isso não foi possível devido à preferência dada a imagens com menor cobertura de nuvens. Entretanto, considerando o fato de que exceto as imagens de dezembro de 2019 e setembro de 2020, todas as observações tiveram um intervalo de um ano entre si. Portanto, tal diferença não irá causar impacto no resultado final.

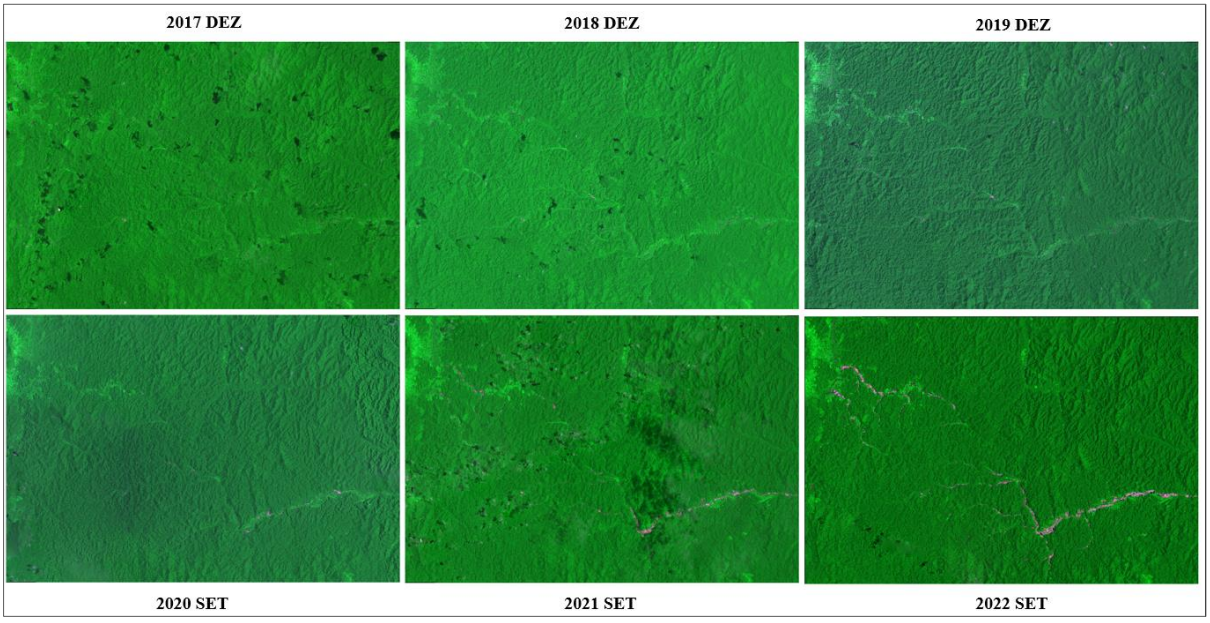
Figura 3 – Datas das imagens utilizadas

Ano	Mês
2017	Dezembro
2018	Dezembro
2019	Dezembro
2020	Setembro
2021	Setembro
2022	Setembro

Fonte: O autor (2023).

Após o *download* das imagens, foi feita a mosaicagem das cenas, o recorte das mesmas para o limite da área de estudo, e a composição de bandas falsa-cor R3G4B2. O resultado obtido consta na Figura 4.

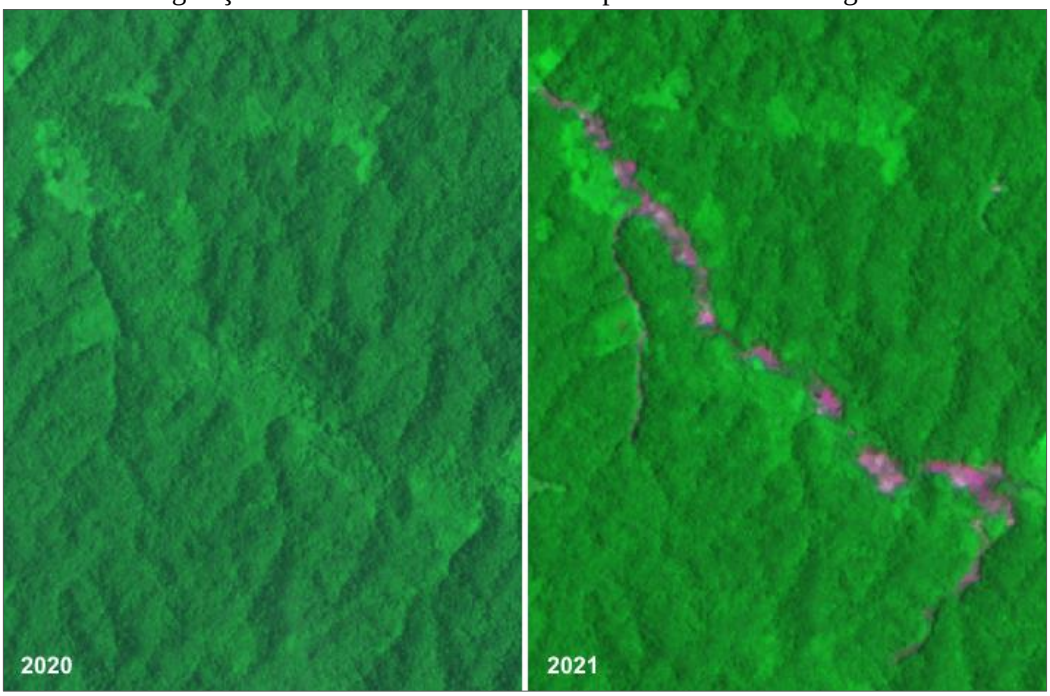
Figura 4 – Imagens de satélite utilizadas recortadas para a área de estudo e colocadas na composição de bandas R3G4B2



Fonte: O autor (2023).

Essa composição de bandas é caracterizada por exibir a vegetação em tons de verde e áreas de solo exposto em tons magenta. Para as imagens PLANET, as bandas 3, 4 e 2 correspondem, respectivamente, às bandas vermelho, infravermelho próximo e verde. Como o garimpo consiste em áreas de solos nus obtidas a partir da remoção da vegetação, a resposta espectral de uma área antes e depois da instalação do garimpo é bastante distinta e fácil de ser identificada, conforme exibido na Figura 5. A composição de bandas utilizada foi escolhida justamente por evidenciar essa diferença.

Figura 5 – Exemplo da diferença na resposta espectral de uma área antes e depois do garimpo, com a vegetação em tons de verde e o solo exposto em tons de magenta



Fonte: O autor (2023).

A classificação supervisionada das imagens e elaboração de produtos cartográficos foram realizadas no software QGIS 3.22. A classificação das imagem em específico foi feita pelo complemento *Semi-automatic Classification Plugin* (SCP), um *plugin* de classificação de imagens disponível para *download* dentro do próprio QGIS entre vários outros complementos existentes na plataforma. O SCP trabalha com classificadores do tipo supervisionados, entre os quais está incluso o da máxima verossimilhança, utilizado neste estudo.

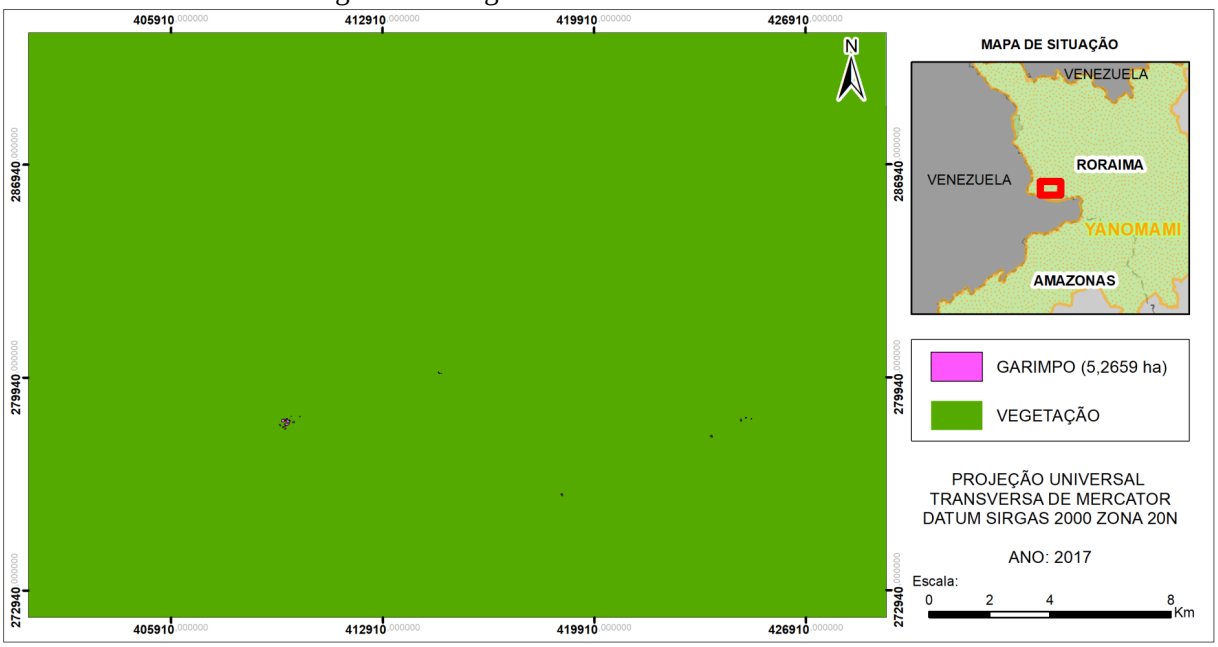
A coleta de amostras no SCP é feita pela formação de ROIs (*Regions of interest)*, que correspondem a polígonos vetorizados pelo usuário que abrangem os pixels amostrados. Como a classificação buscou dar foco à identificação de áreas de garimpo, foram criadas apenas as classes Garimpo e Vegetação. Áreas com nuvens foram consideradas como pertencentes à

classe de Vegetação, visto que em nenhum ano houve cobertura de nuvem sobre as áreas de garimpo. Para cada ano analisado, foi coletada uma média de 30 amostras (ROIs) para cada classe. Durante a execução da classificação MAXVER, a configuração padrão do SCP foi mantida, exceto pelo parâmetro "*Land Cover Signature Classification*", que foi definido como "*Algorithm*". O arquivo *raster* correspondente à imagem classificada gerado pelo algoritmo foi convertido em vetor para a realização dos cálculos de área.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A classificação das imagens possibilitou quantificar, em hectares (ha), a expansão do garimpo na área de estudo. No ano de 2017, conforme a Figura 6 (vide também Apêndice A), foi identificado um total de 5,2659 hectares de garimpo.

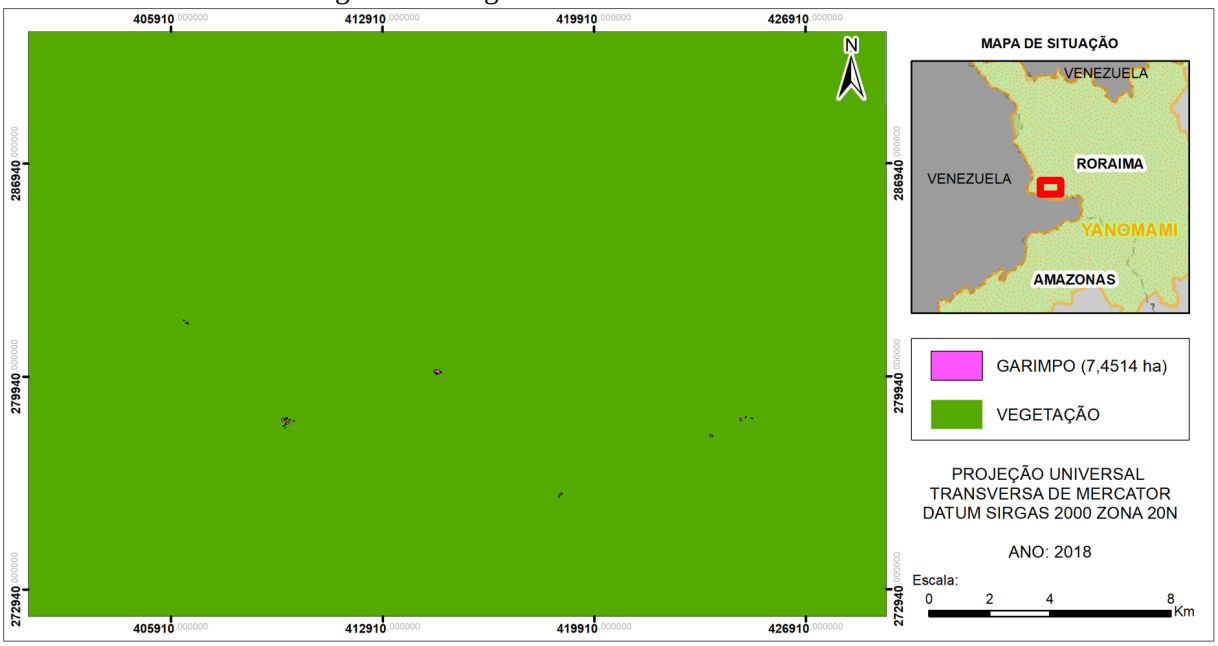
Figura 6 – Imagem PLANET de 2017 classificada



Fonte: O autor (2023).

No ano de 2018, conforme a Figura 7 (vide também Apêndice B), foram identificados pequenos focos de garimpo, com um total de 7,4514 hectares de extensão.

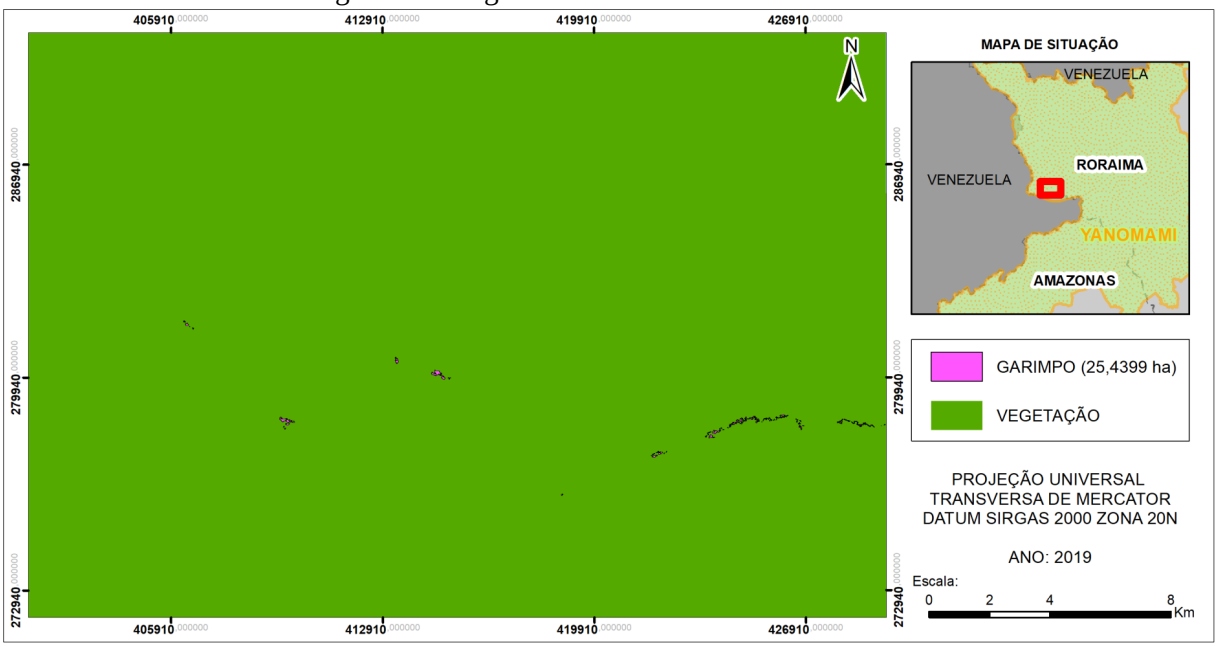
Figura 7 – Imagem PLANET de 2018 classificada



Fonte: O autor (2023).

No ano de 2019, conforme a Figura 8 (vide também Apêndice C), foi identificado um total de 25,4399 hectares de garimpo.

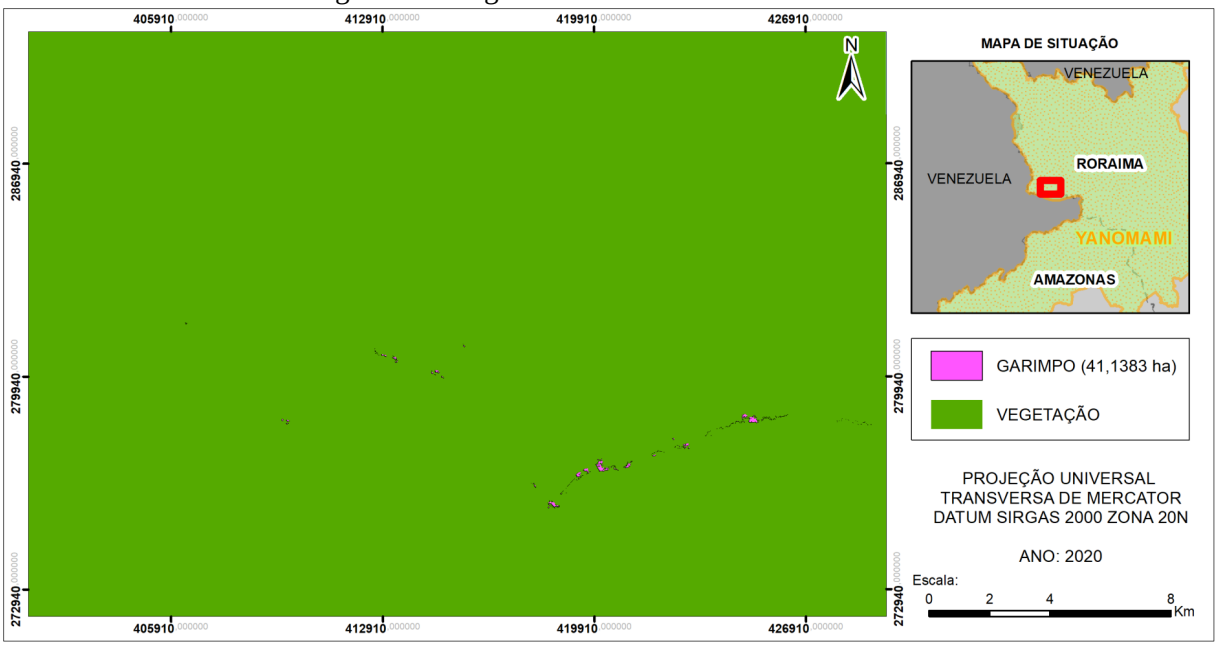
Figura 8 – Imagem PLANET de 2019 classificada



Fonte: O autor (2023).

No ano de 2020, conforme a Figura 9 (vide também Apêndice D), foi identificado um total de 41,1383 hectares de garimpo.

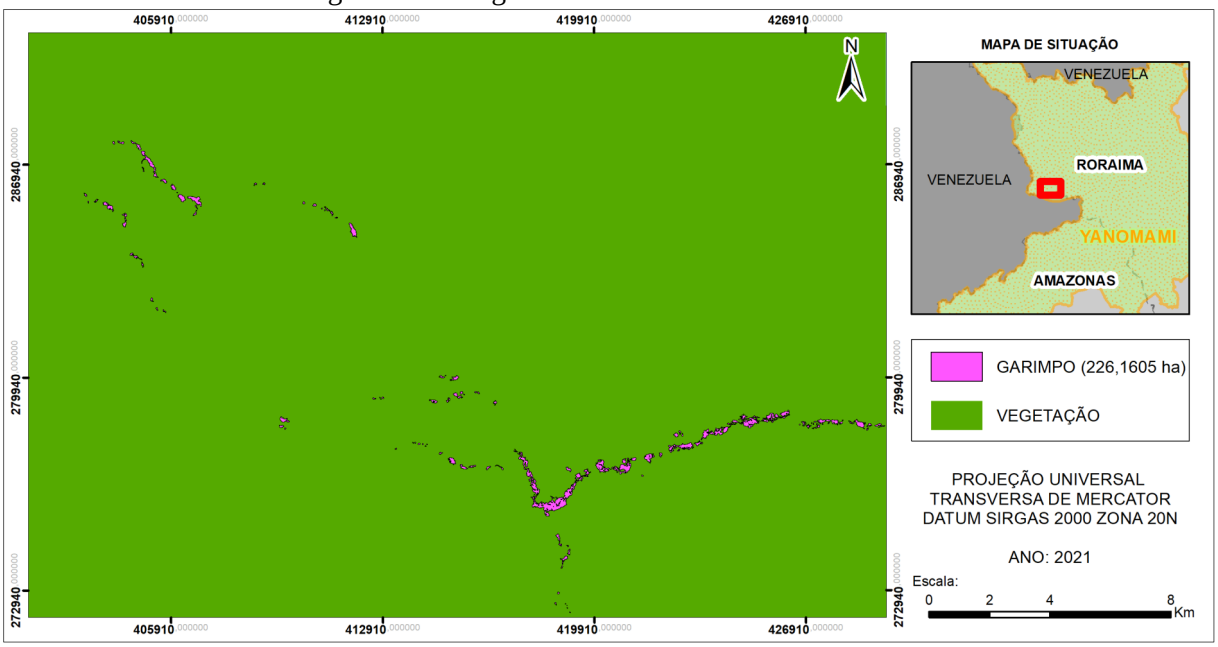
Figura 9 – Imagem PLANET de 2020 classificada



Fonte: O autor (2023).

No ano de 2021, conforme a Figura 10 (vide também Apêndice E), foi identificado um total de 226,1605 hectares de garimpo.

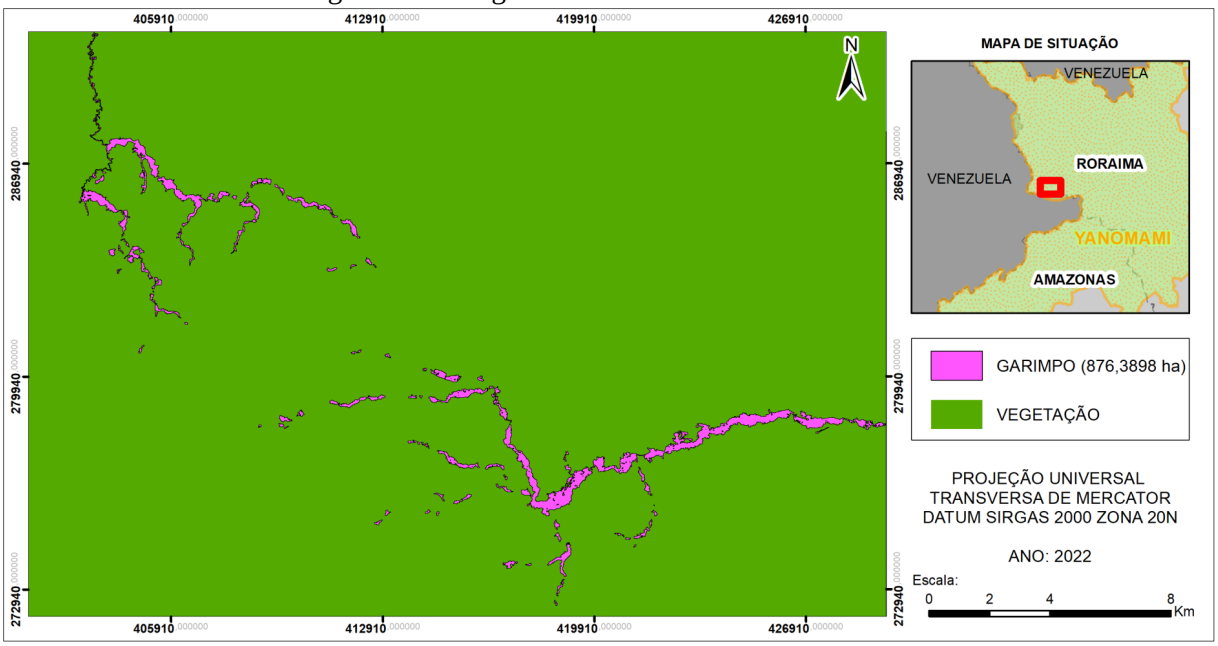
Figura 10 – Imagem PLANET de 2021 classificada



Fonte: O autor (2023).

Por fim, no ano de 2022, conforme a Figura 11 (vide também Apêndice F), houve um aumento mais considerável nas áreas de garimpo, identificando-se um total de 876,3898 hectares.

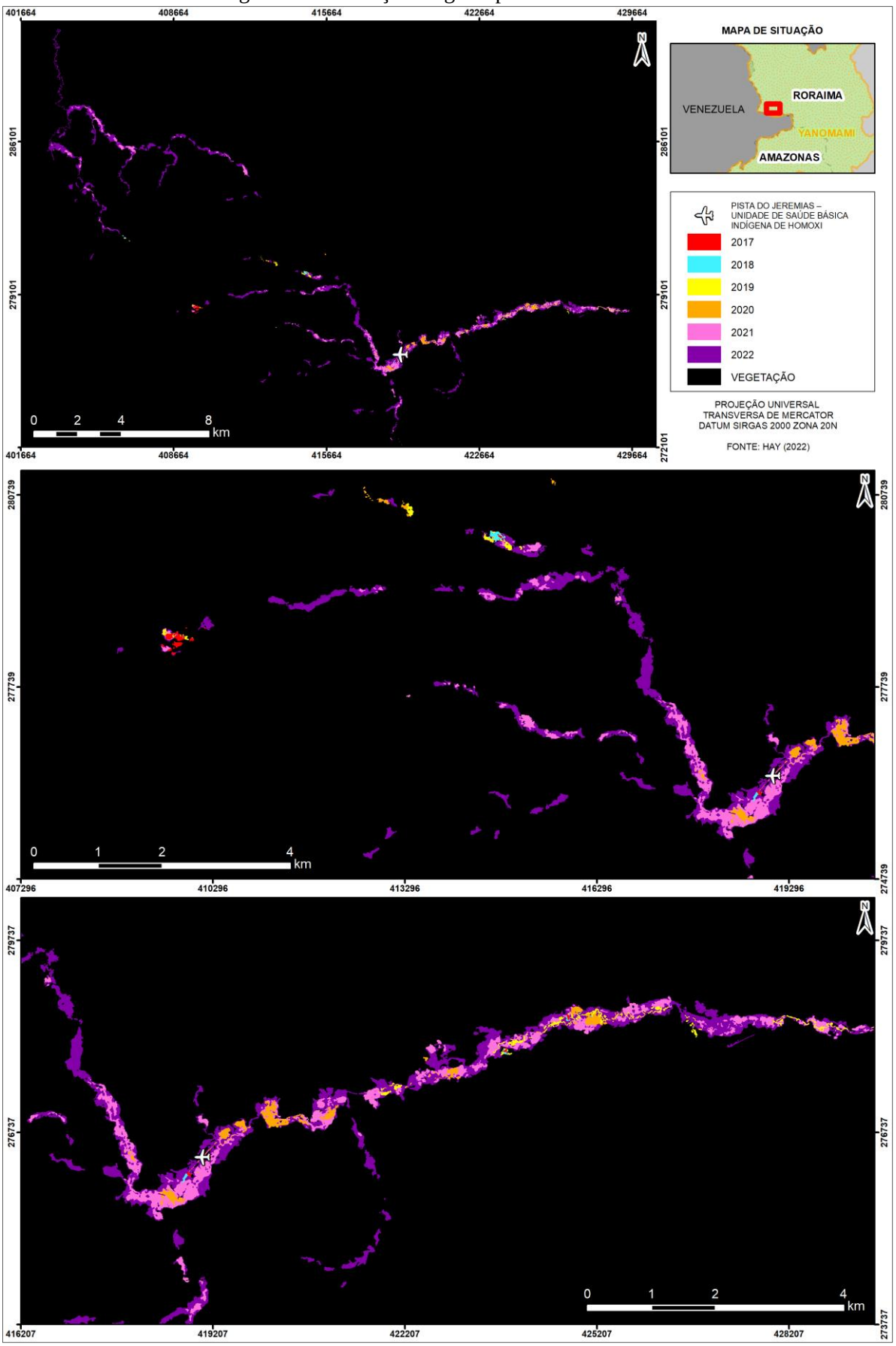
Figura 11 – Imagem PLANET de 2022 classificada



Fonte: O autor (2023).

No mapa da Figura 12 consta a representação da variação da área de garimpo ao longo dos anos analisados.

Figura 12 – Evolução do garimpo na área de estudo

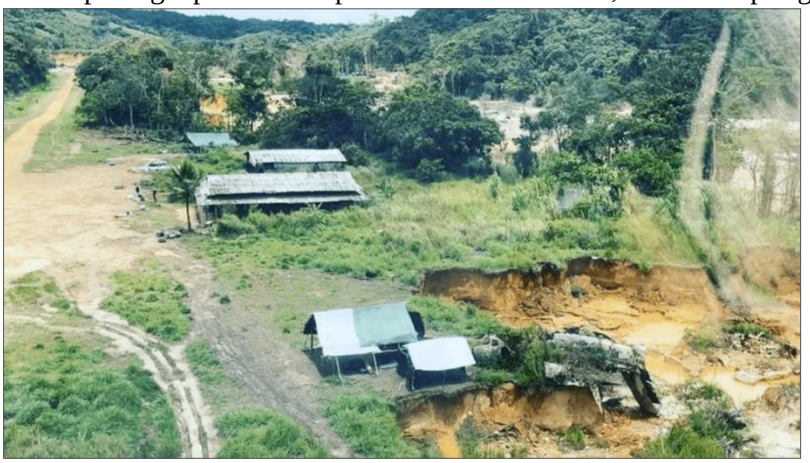


Fonte: O autor (2023).

Deu-se destaque à pista de voo localizada próximo à Unidade de Saúde Básica Indígena (USBI) da região Homoxi. No mapa observa-se que a USBI se encontra bem próxima à região na qual a atividade garimpeira foi mais intensa.

Segundo reportagem do G1 (2022), a USBI era a única unidade de saúde presente na região, desativada desde 2021 após ser alvo de ataques de garimpeiros. A pista de voo citada anteriormente servia para o transporte de profissionais de saúde ao posto, mas desde então ela tem sido controlada pelos garimpeiros da região, conforme ilustra a Figura 13. A falta de serviços de saúde aliada à intensificação do garimpo contribuíram para a crise sanitária que se observa atualmente.

Figura 13 – Garimpo ilegal próximo ao posto de saúde Homoxi, dominado por garimpeiros

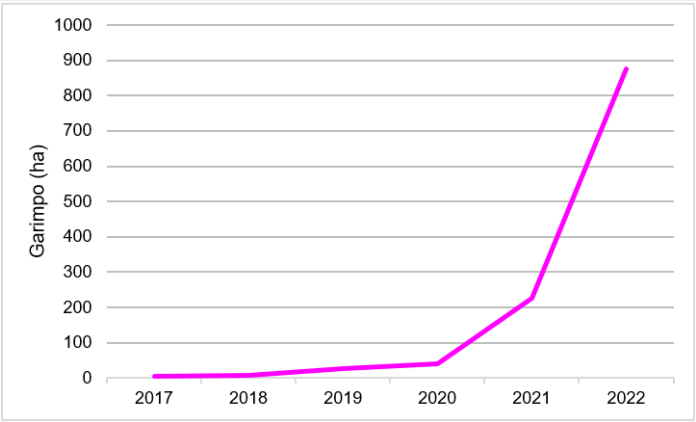


Fonte: G1 (2022).

Conforme a Figura 14, o garimpo analisado na área apresentou aumento em todos os anos analisados, com o maior incremento observado no ano de 2020 pro ano de 2021, quando a área do garimpo apresentou um aumento de 449,76%.

Figura 14 – Gráfico do aumento da área de garimpo observado na área de estudo

Ano	Garimpo (ha)	Aumento relativo ao ano anterior
2017	5,2659	----------
2018	7,4514	41,50%
2019	25,4399	241,41%
2020	41,1383	61,71%
2021	226,1605	449,76%
2022	876,3898	287,51%



Fonte: O autor (2023).

Conforme mencionado no início do trabalho, as atividades de garimpo de ouro costumam ser impulsionadas pelo aumento da cotação do metal no mercado internacional. O crescimento acelerado das áreas de garimpo observadas na área de estudo coincide com o aumento do preço do ouro que, conforme a Figura 15, após anos oscilando entre 120 e 160 R$/g, apresentou crescimento considerável a partir do ano de 2019, chegando a mais de 340 R$/g na segunda metade de 2020 e mantendo-se acima de 260 R$/g desde então.

Figura 15 – Preço do ouro em R$/g (2017 a 2023)

Fonte: GoldPrice (Disponível em: https://goldprice.org/gold-price-history.html).

Na Figura 16 consta os valores de hectare de garimpo em cada ano observado, o valor do preço do ouro correspondente a cada ano, e o resultado do teste de correlação entre estas duas variáveis. É importante ressaltar que os valores de preço de ouro utilizados correspondem à primeira observação disponível para cada ano.

Figura 16 – Correlação entre o preço de ouro no mercado internacional e o crescimento do garimpo na área de estudo

Ano	Garimpo (ha)	Preço do ouro (R$/g)	Coeficiente de correlação
2017	5,2659	121,09	0,780
2018	7,4514	136,87	
2019	25,4399	154,04	
2020	41,1383	202,71	
2021	226,1605	323,68	
2022	876,3898	326,04	

Fonte: O autor (2023), GoldPrice (Disponível em: https://goldprice.org/gold-price-chart.html)

O coeficiente de correlação indica o quão forte é a relação entre um par de variáveis, no qual valores próximos de 1 indicam uma correlação forte. Para as variáveis analisadas, o valor do coeficiente foi de 0,780, demonstrando uma forte correlação entre o aumento do preço do ouro no mercado internacional e o crescimento das atividades garimpeiras na região analisada.

Segundo estudo de Le Torneau e Albert (2010) (Figura 17), que a partir de metodologia semelhante, quantificou a área de garimpo na região Homoxi no ano de 1989, a área total de garimpo chegou a 554 ha.

Figura 17 – Resultados da classificação da área de estudo

Ecossistemas	Área (1989)	
	ha	%
Floresta primária	16626	75,9
Floresta de altitude	3033	13,8
Floresta secundária	699	3,2
Garimpos ativos e abandonados	554	2,5
Nuvens, sombras e névoas	1000	4,6

Fonte: Adaptado de LE TORNEAU e ALBERT (2010).

Pode-se afirmar que as atividades garimpeiras observadas nos anos analisados no presente estudo foram, em sua maior parte, inferiores à última onda que ocorreu na região nos anos 90, considerando apenas em 2022 a quantidade de garimpo observada foi superior à de 1989, com mais de 800 ha de garimpo.

6. CONCLUSÃO

A classificação das imagens pelo método da máxima verossimilhança permitiu observar as regiões nas quais o garimpo estava presente a mais tempo, tal qual regiões aonde a atividade se deu de forma mais intensa. O garimpo observado na área apresentou um aumento constante em todos os anos analisados, com o maior incremento observado no ano de 2021, no qual a área de garimpo foi quase seis vezes maior que o ano anterior, coincidindo com o período no qual houve aumento considerável na cotação do ouro no mercado internacional.

Através de comparações com um estudo realizado na mesma região nos anos 90, verificou-se que as atividades garimpeiras na região se deram com intensidade inferior. É importante ressaltar que o mesmo não pode necessariamente ser afirmado pra demais porções da terra indígena Yanomami que não foram analisadas neste estudo. Ademais, considerando o ritmo de crescimento que o garimpo apresentou nos últimos 2 anos analisados, caso não houvessem intervenções do governo na região para suprimir as atividades garimpeiras, é provável que a devastação observada superasse facilmente a que ocorreu na área décadas atrás.

Apesar da área de estudo ser de difícil acesso, as imagens de satélite permitiram mapear e analisar a evolução das atividades garimpeiras na região sem ser necessária a visita em campo. A partir dos resultados obtidos, reafirma-se a importância das geotecnologias, em especial do sensoriamento remoto, em estudos ambientais.

REFERÊNCIAS

BARAZAL, N. R. **Yanomami**: um povo em luta pelos direitos humanos. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001. 205 p.

BRASIL. Resolução CONAMA n°1, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 fev. 1986. Seção 1, p. 2548-2549.

BRASIL. Lei nº 11.685, de 2 de junho de 2008. Institui o Estatuto do Garimpeiro e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 jun. 2008. Seção 1, p. 1.

BRITO, A. L. C.; BARBOSA, E. M. A gestão ambiental das terras indígenas e de seus recursos naturais: fundamentos jurídicos, limites e desafios. **Veredas do Direito**, Belo Horizonte, v. 12, n. 24, p. 97-123, 2015.

BRITO, E. J. **Avaliação preliminar da degradação ambiental por sensoriamento remoto das áreas de concessão mineral para extração de ouro no distrito garimpeiro de Lourenço/AP**. Orientador: Marcelo José Oliveira. 2021. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2021.

CARVALHO, A. Os caminhos para acabar com o garimpo ilegal. **Superinteressante**, São Paulo, 16 fev. 2023. Seção Essencial, p. 8-9.

COSTA, B. S.; REZENDE, E. N. Meio ambiente do trabalho e a saúde do trabalhador na mineração brasileira. **Revista do Instituto do Direito Brasileiro**, Lisboa, v. 1, n. 2, p. 759-792, 2012.

CRÓSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas: UNICAMP, 1992. 170 p.

FALKNER, E.; MORGAN, D. **Aerial Mapping:** Methods and Applications. 2. ed. Nova York: CRC Press, 2002. 192 p.

FIGUEIREDO, S. M. M.; CARVALHO, L. M. T. Análise comparativa entre técnicas de classificação digital em imagens Landsat no mapeamento do uso e ocupação do solo em Capixaba, Acre. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis: INPE, 2007. p. 6729-6736.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160 p.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128 p.

G1. Posto de saúde indígena na Terra Yanomami é incendiado e associações atribuem autoria a garimpeiros. Disponível em: https://g1.globo.com/rr/roraima/noticia/2022/12/07/posto-de-saude-indigena-na-terra-yanomami-e-incendiado-e-associacoes-atribuem-a-garimpeiros.ghtml. Acesso em: 26 mar. 2023.

GOLDPRICE. Where the world checks the gold price. Disponível em: https://goldprice.org/. Acesso em: 26 mar. de 2023.

GUIMARÃES, G. A.; SILVA, A. R. B.; DUTRA, M. S. (org.). **Contaminação mercurial**: Homem versus meio ambiente nos garimpos de ouro da Amazônia. Belém: UNAMAZ, 1994. (Série Cooperação Amazônica, v. 12). 387 p.

HUTUKARA ASSOCIAÇÃO YANOMAMI. **Yanomami sob ataque:** garimpo ilegal na terra indígena Yanomami e propostas de combatê-lo. [*S. l.*], 2022. 120 p.

LACERDA, L. D.; SALOMONS, W. **Mercúrio na Amazônia**: Uma bomba relógio química? Rio de Janeiro: CETEM/ CNPq, 1992. (Série Tecnologia Ambiental, v. 3). 78 p.

LE TORNEAU, F. M.; ALBERT, B. Homoxi (1989-2004): o impacto ambiental das atividades garimpeiras na terra indígena Yanomami (Roraima). *In*: BARBOSA, R. I.; MELO, V. F. **Roraima: Homem, Ambiente e Ecologia**. Boa Vista: [*s. n.*], 2010. p. 155-170.

LIMA, A. P. S. **Avaliação do impacto de uma atividade garimpeira em um centro urbano no estado do Pará**. Orientador: Jorge Eduardo de Souza Sarkis. 2005. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências de Tecnologia Nuclear) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2. ed. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 908 p.

LIU, J. G.; MASON, P. J. **Essential image processing and GIS for remote sensing**. [*S. l.*]: John Wiley & Sons, 2009. 464 p.

LONGLEY, P. A. et al. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 540 p.

LOPES, H. M. L. Uso e cobertura do solo no município de Tailândia/PA utilizando o TM/LANDSAT e técnica de classificação não-supervisionada. **ENGEVISTA**, v. 10, n. 2, p. 126-132, 2008.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil, vol. 2. 3. ed. São Paulo: Instituto Plantarum, 2009. 384 p.

MAPBIOMAS. Dados de área (ha) de mineração (separado por classes industriais e de garimpo) detectados de 1985 a 2021 por bioma, estado, município e território indígena - Coleção 7. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/estatisticas. Acesso em: 23 out. 2022.

MILLIKEN, W. et al. Degraded areas in the Yanomami territory, Roraima, Brazil: Ethnoenvironmental evaluation of the Homoxi region. Boa Vista: Comissão Pró-Yanomami (CCPY), 2002. Disponível em: http://www.proyanomami.org.br/v0904/index.asp?pag=noticia&id=1388. Acesso em: 12 out. 2022.

MONTEIRO, M. A. et al. Ouro, empresas e garimpeiros na Amazônia: o caso emblemático de Serra Pelada. **Revista Pós Ciências Sociais**, v. 7, n. 13, p. 131-158, 2010.

MOREIRA, E. F. et al. Comparação e desempenho de algoritmos paramétricos na classificação supervisionada de áreas naturalmente heterogêneas e dinâmicas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 3, p. 581-594, 2016.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto**: princípios e aplicações. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 387 p.

ORTIZ, J. L.; FREITAS, M. I. C. Mapeamento do uso da terra, vegetação e impactos ambientais por meio de sensoriamento remoto e geoprocessamento. **Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 91-104, 2005.

PAULA, V. G.; CORRÊA, R. L.; TUTUNJI, V. L. Garimpo e mercúrio: impactos ambientais e saúde humana. **Universitas: Ciências da Saúde**, [*S. l.*], v. 4, n. 2, p. 101-110, 2006.

PLANET. Norway's International Climate and Forests Initiative Satellite Data Program. Disponível em: https://www.planet.com/nicfi/. Acesso em: 21 fev. 2023.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. 127 p.

PORTELLA, M. O. Efeitos colaterais da mineração no meio ambiente. **Revista Brasileira de Políticas Públicas**, Brasília, v. 5, n. 3, p. 263-276, 2015.

RAMOS, A. R. A.; ABRAHÃO, B. A.; RODRIGUES, F. S. Vazios de poder estatal no garimpo Yanomami – Amazônia Brasileira. **Brazilian Journal of Development**, [*S. l.*], v. 6, n. 3, p. 15753-15771, 2020.

ROCHA, D. F.; PORTO, M. F. S. A vulnerabilização dos povos indígenas frente ao COVID-19: autoritarismo político e a economia predatória do garimpo e da mineração como expressão de um colonialismo persistente. **Observatório Covid-19 Fiocruz**, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/41407. Acesso em: 19 out. 2022.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, Uberlândia, v. 16, p. 81-90, 2005.

SALOMÃO, E. P. A força do garimpo. **Revista Brasileira de Tecnologia**, Brasília, v. 13, n. 2, p. 13-20, 1982.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental**: conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de Textos, 2020. 495 p.

SASSINE, V. Garimpo impede pesca, e yanomamis recebem latas de sardinha em fardos jogados de avião. **Folha de S. Paulo**, São Paulo, 27 jan. 2023. Caderno Cotidiano, p. 1.

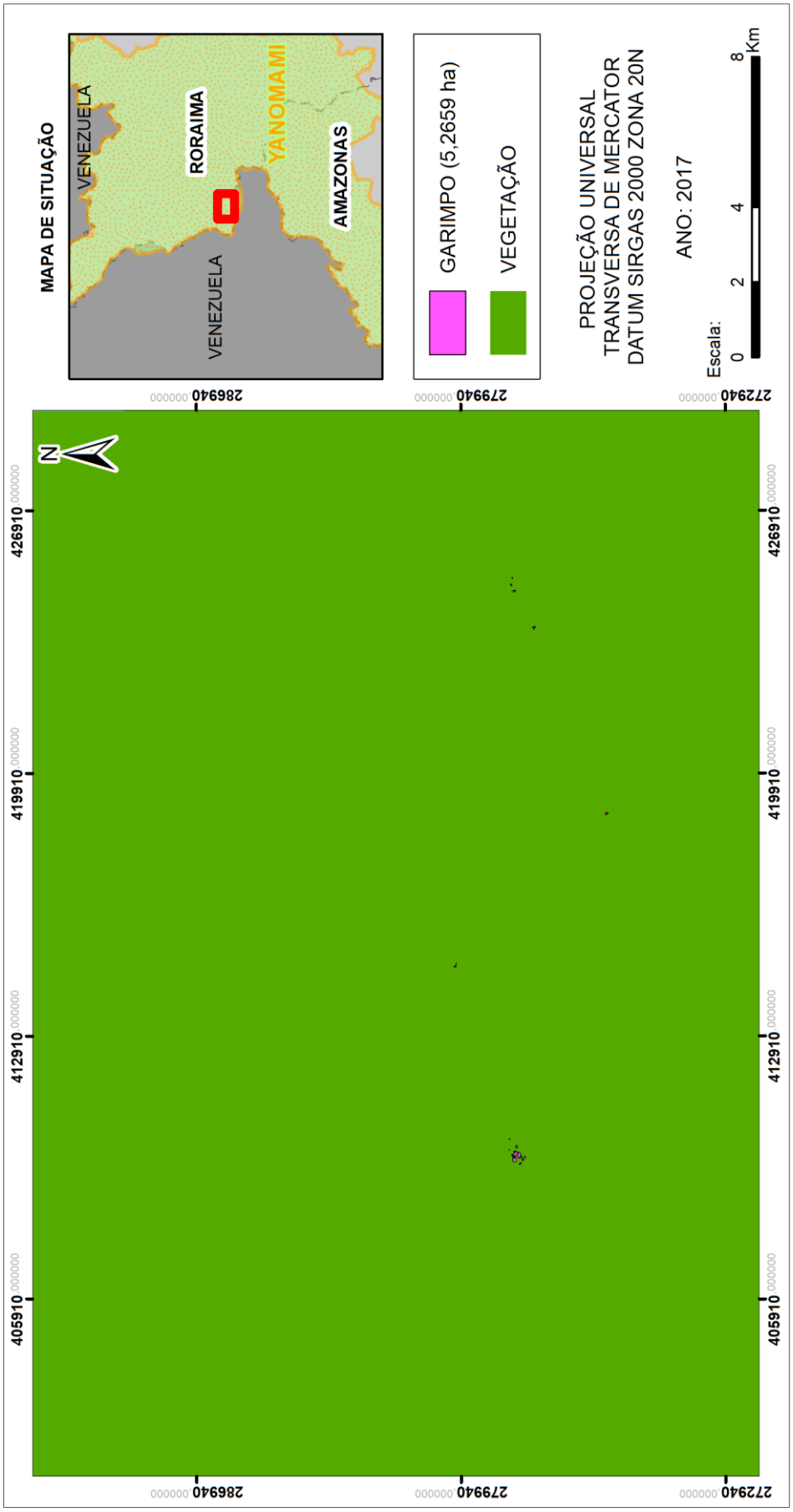
SILVA, M. L.; ANDRADE, M. C. K. Os impactos ambientais da atividade mineradora. **Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 11, n. 6, p. 67-82, 2017.

TSO, B.; MATHER, P. M. **Classification methods for remotely sensed data**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 356 p.

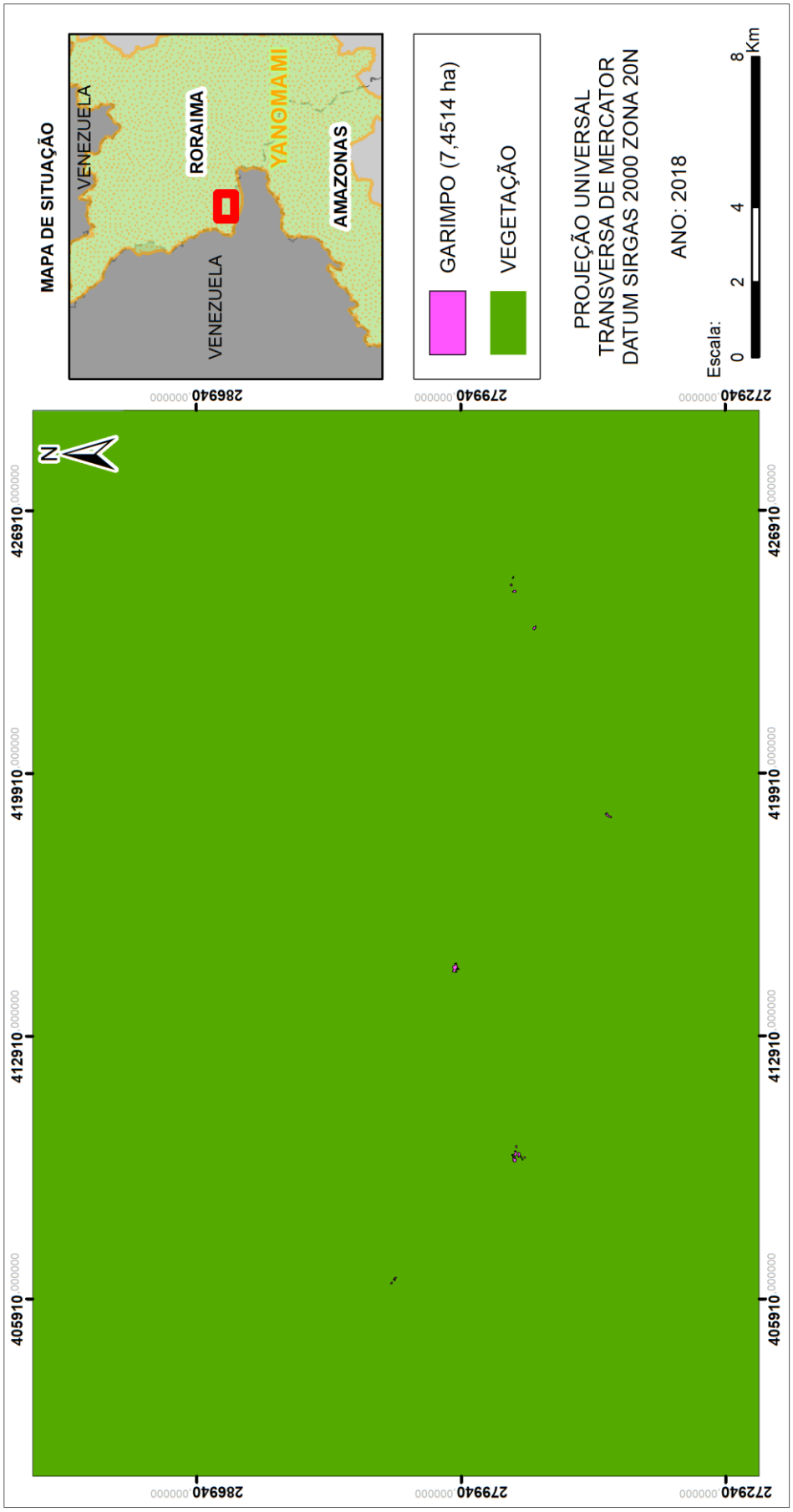
VALE, J. R. B. et al. Análise comparativa de métodos de classificação supervisionada aplicada ao mapeamento da cobertura do solo no município de Medicilândia, Pará. **InterEspaço**, v. 4, n. 14, p. 26-44, 2008.

ZANOTTA, D. C.; FERREIRA, M. P.; ZORTEA, M. **Processamento de imagens de satélite**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320 p.

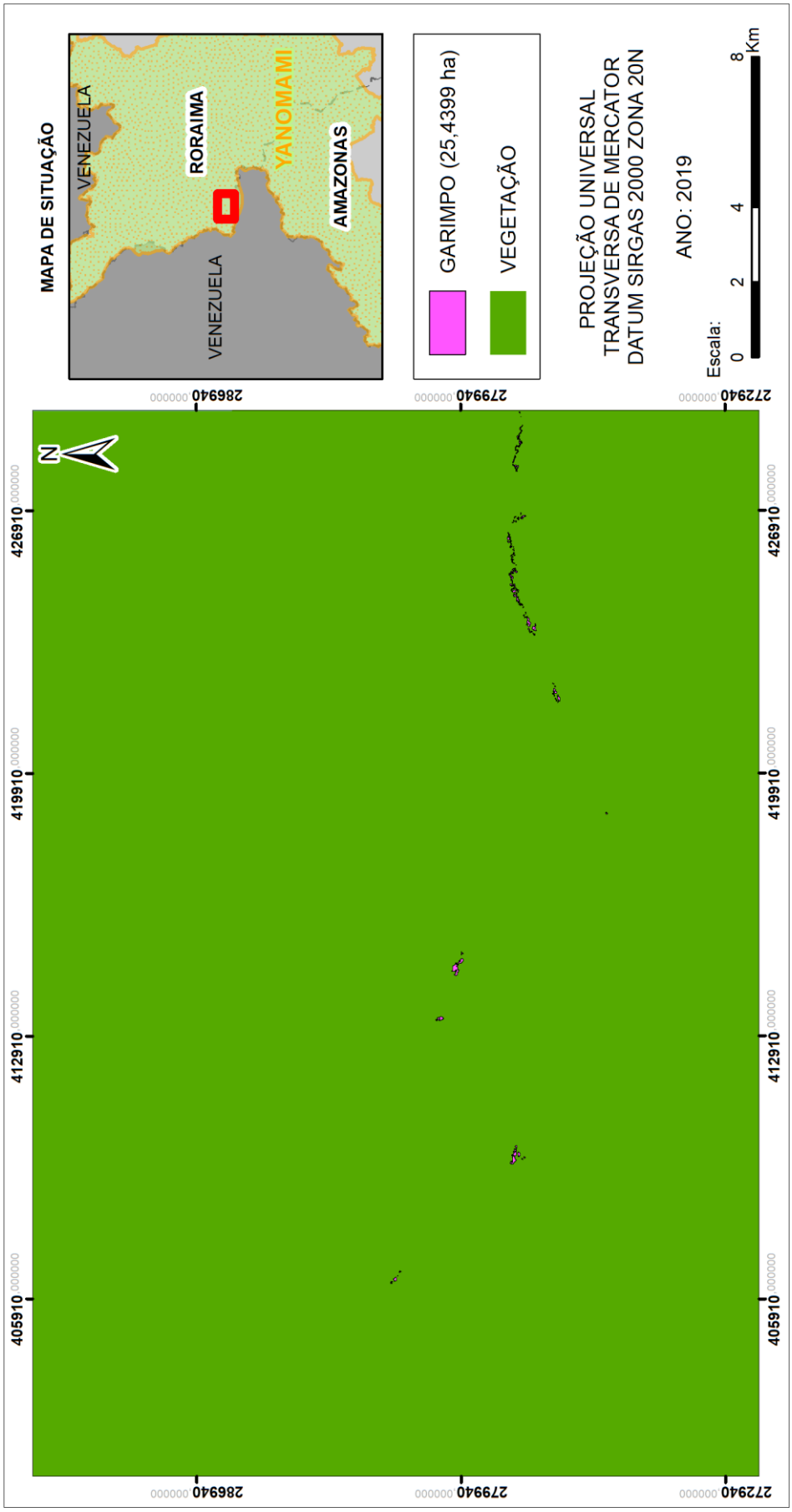
APÊNDICE A – IMAGEM PLANET DE 2017 CLASSIFICADA



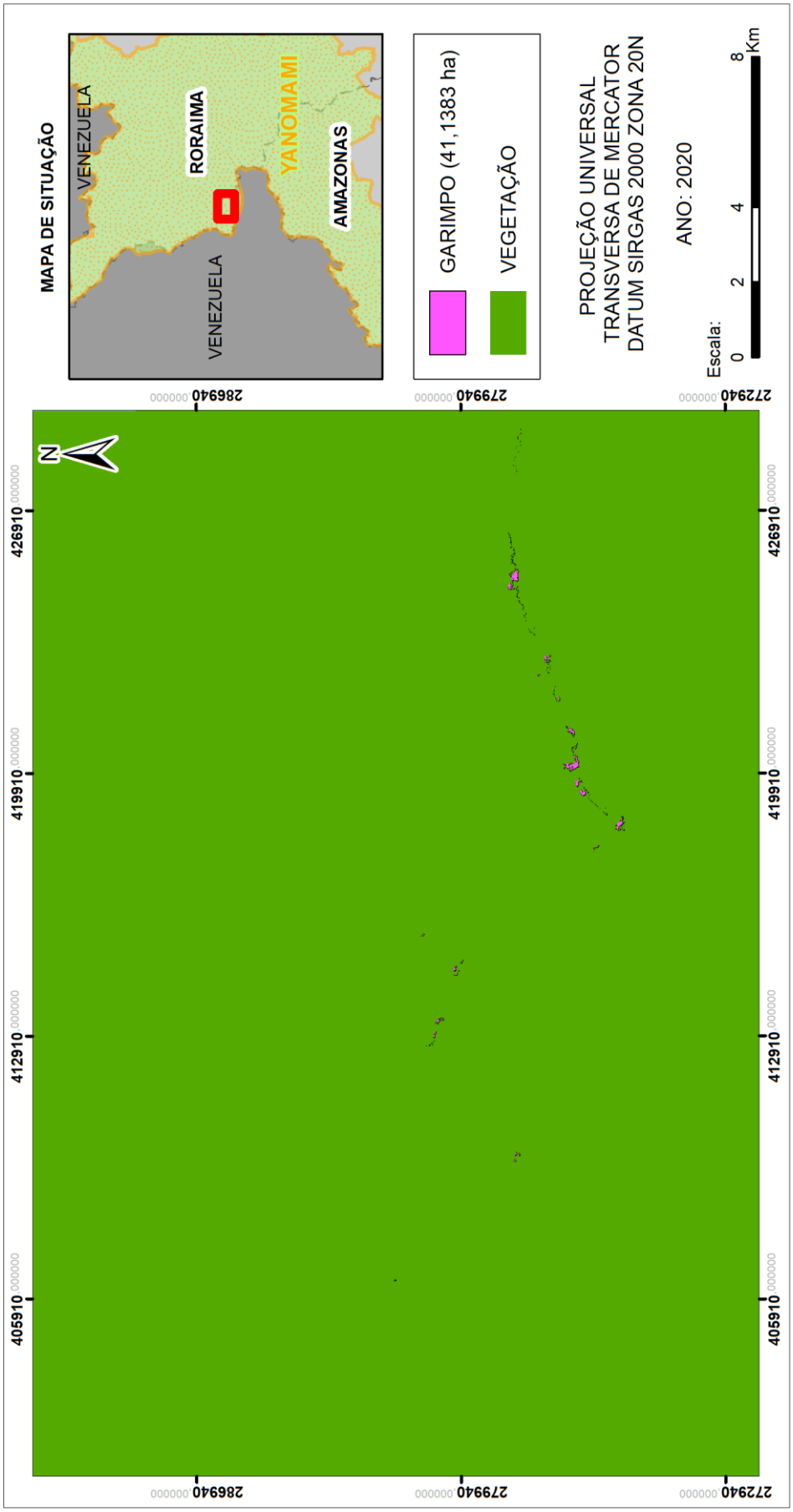
APÊNDICE B – IMAGEM PLANET DE 2018 CLASSIFICADA



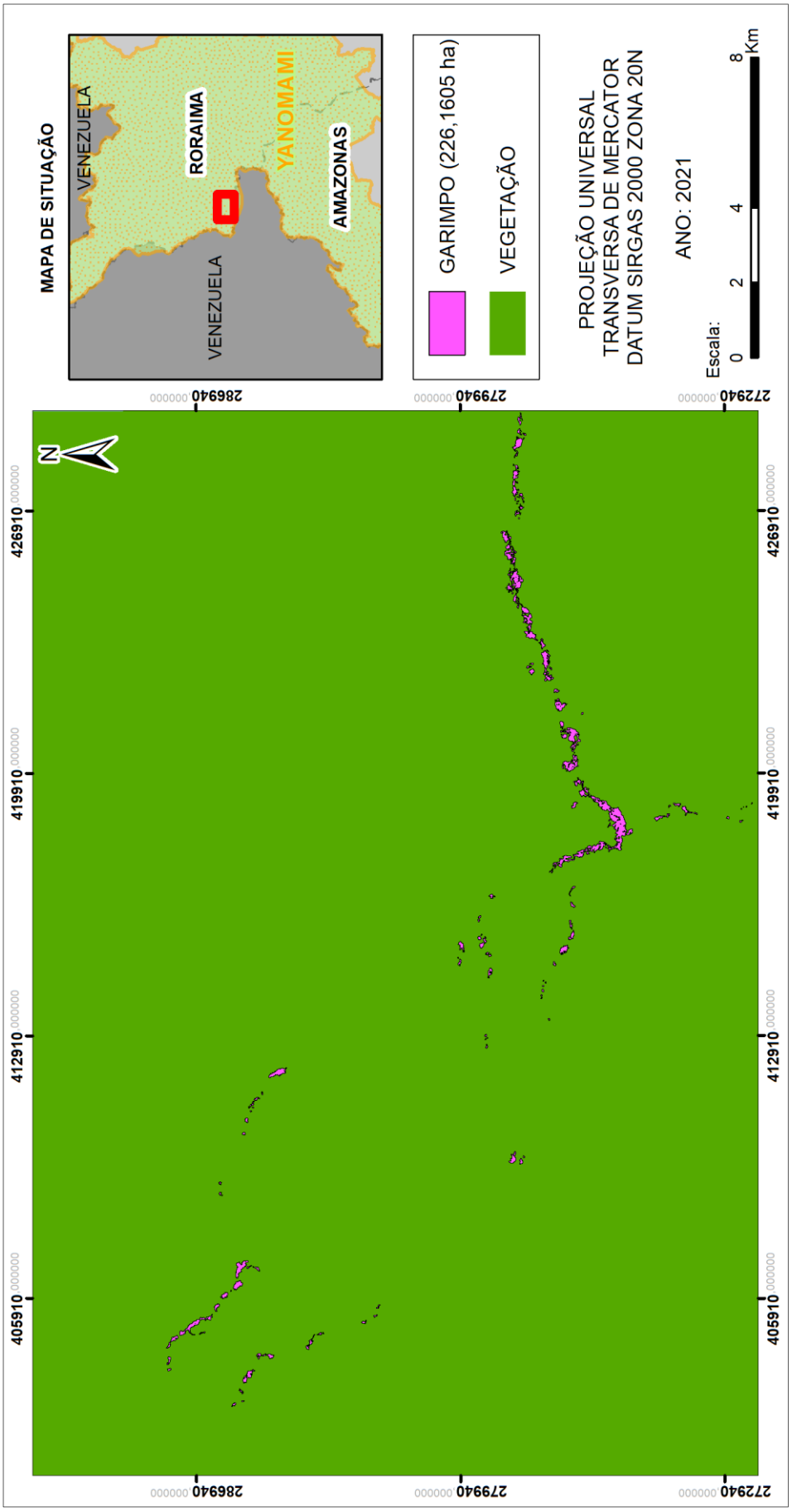
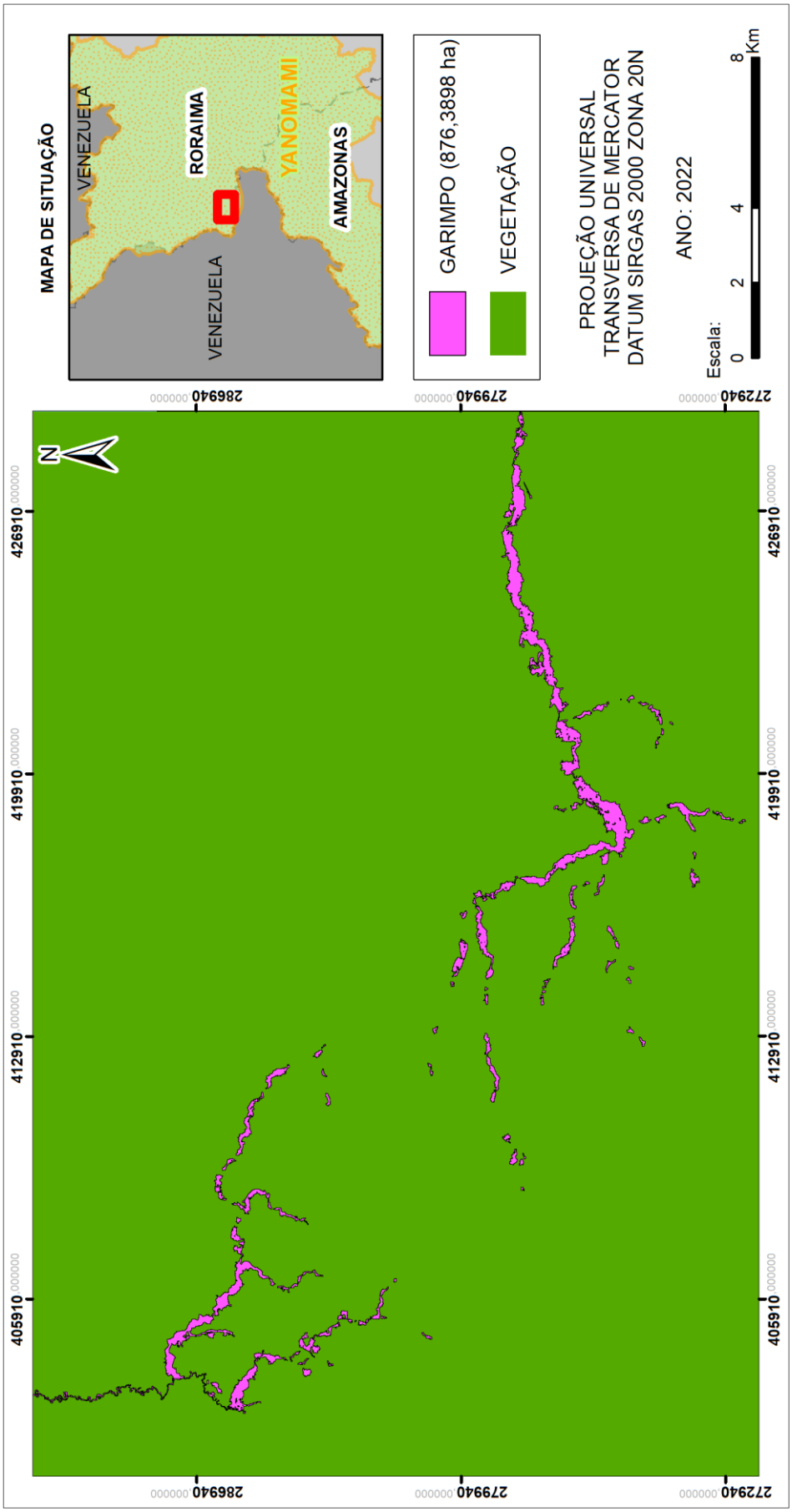
APÊNDICE C – IMAGEM PLANET DE 2019 CLASSIFICADA



APÊNDICE D – IMAGEM PLANET DE 2020 CLASSIFICADA



APÊNDICE E – IMAGEM PLANET DE 2021 CLASSIFICADA



APÊNDICE F – IMAGEM PLANET DE 2022 CLASSIFICADA