



ANÁLISE ESPACIAL DA DENSIDADE DE PISTAS DE POUSO CLANDESTINAS EM TERRAS INDÍGENAS DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Tatiano Diego Armando da Silva ¹, Viviane Adriano Falcão ¹, Alex Mota dos Santos ², Carlos Fabricio Assunção da Silva ¹

1. Universidade Federal de Pernambuco
2. Universidade Federal do Sul da Bahia

* Corresponding author e-mail address: tatiano.silva@ufpe.br

PAPER ID: SITXXX

ABSTRACT

The Amazon Rainforest plays a fundamental role in climate regulation and biodiversity conservation, but it faces increasing threats due to expanding clandestine activities. In this context, this study aims to conduct a spatial analysis of the density of clandestine airstrips within Indigenous Lands (ILs) and a 10 km buffer in the Amazon biome. To achieve this, the Kernel Density Estimator was used, allowing the visualization of the density of illegal infrastructures. The results revealed that, within the ILs, the highest density of clandestine airstrips occurs in Yanomami IL and ILs in the state of Roraima. In the 10 km buffer, although no very high density areas were identified, high densities were found in the Munduruku IL, smaller ILs in Roraima, and the southern portion of the biome. The study reinforces the need for enforcement and control measures, especially in environmentally vulnerable areas, to mitigate the expansion of these illegal infrastructures.

Keywords: Amazon biome, Illegal infrastructures, Protected areas, Kernel Density Estimator, Cartographic visualization.

DECLARAÇÃO DE USO DE IA GENERATIVA

Esta pesquisa não utilizou IA generativa



PAPER ID: SITXXX

ANÁLISE ESPACIAL DA DENSIDADE DE PISTAS DE POUSO CLANDESTINAS EM TERRAS INDÍGENAS DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

1 INTRODUÇÃO

O bioma Amazônia, é reconhecido por abrigar a maior floresta tropical do mundo (Dominguez et al., 2022). A floresta amazônica desempenha um papel importante na regulação do clima (Bowman et al., 2022), na conservação da biodiversidade (Alves-Pinto et al., 2022) e no equilíbrio do ciclo hidrológico (Covey et al., 2021). No entanto, a floresta amazônica vem enfrentando grande mudanças na sua cobertura, causada por diversos fatores, como por exemplo, desmatamento (Santos et al., 2021), exploração madeireira ilegal, mineração ilegal (Silva et al., 2023a) e expansão de atividades agropecuárias (Trigueiro et al., 2020), dentre outras. Essas mudanças têm fragmentado o bioma, ameaçando a biodiversidade e provocando mudanças significativas em áreas especiais, como as Terras Indígenas (TIs), além de contribuir significativamente para as mudanças climáticas.

As Terras Indígenas (TIs) desempenham um papel importante na preservação da Floresta Amazônica, atuando como barreiras naturais contra o avanço do desmatamento, mineração ilegal e incêndios florestais, além de protegerem sua biodiversidade (Lima et al., 2025). Entretanto, nos últimos anos, as TIs passaram a ser as únicas áreas onde ainda se encontram remanescentes florestais, não mais identificados fora desses territórios. Esse cenário de degradação ambiental é agravado por diversas práticas ilegais que ameaçam a integridade desses territórios e intensificam a exploração predatória da floresta. Entre os fatores que impulsionam essas práticas, destacam-se a expansão de infraestruturas ilegais, como as pistas de pouso clandestinas, que facilitam o acesso a áreas remotas da floresta e ampliam o alcance de atividades ilegais.

As pistas de pouso clandestinas são infraestruturas construídas sem autorização legal, frequentemente localizadas próximas a áreas especiais no bioma Amazônia. A presença dessas infraestruturas agrava diversos problemas, entre eles, a mineração ilegal, que, segundo Silva et al. (2023a), se concentra fortemente ao redor dessas pistas. De acordo com Pardini et al. (2025) devido à densa cobertura florestal, criminosos frequentemente dependem de pistas de pouso clandestinas como uma ferramenta logística para abastecer locais remotos e sustentar essas atividades clandestinas.

Atualmente, a mineração ilegal, impulsionados pela implantação de pistas de pouso clandestinas são consideradas como uma das ameaças à floresta amazônica. De acordo com o MapBiomias (2023), há um problema logístico inerente à mineração ilegal nessas áreas, principalmente devido à necessidade de mais acesso. Como resultado, há uma necessidade crescente de acesso aéreo para fornecer e transportar minerais extraídos ilegalmente para fora das Terras Indígenas.

Além de facilitar o acesso a regiões remotas da floresta, essas pistas também servem como pontos logísticos para o escoamento de produtos ilícitos, viabilizando tanto a extração quanto o transporte de minerais. Dessa forma, não apenas ampliam a exploração dos recursos naturais, mas também intensificam os impactos socioambientais na região, incluindo degradação ambiental, conflitos territoriais e perda de biodiversidade (Rutt et al., 2019; Conceição et al., 2021).

Nos últimos anos, pesquisas têm revelado mudanças significativas em áreas das Terras Indígenas da Amazônia sob a influência de infraestruturas de transportes clandestinas (Neves et al., 2021; Silva et al., 2022, Silva et al., 2023a; Silva et al., 2023b). Por exemplo, Silva et al. (2022) avaliou os impactos das infraestruturas rodoviárias no aumento dos impactos de incêndios florestais nas Terras Indígenas do bioma Amazonia, por meio de métodos de análises espaciais. Os resultados do estudo

de Silva et al. (2022), revelaram que as infraestruturas de transportes clandestinas quanto mais próximo as florestas, maior o aumento de incêndios florestais.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo realizar uma análise espacial da densidade de pistas clandestinas dentro das Terras Indígenas e em um buffer de 10 km no bioma Amazônia, identificando sua distribuição espacial.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde as 332 Terras Indígenas (TIs) que estão integralmente localizadas no Bioma Amazônia (Figura 1). De acordo com a Fundação Nacional dos Povos Indígenas (FUNAI, 2022), o órgão indigenista oficial do Brasil, as Terras Indígenas são classificadas como Em Estudo, Delimitadas, Declaradas, Reserva Indígena encaminhada e Homologada.

De acordo com o Instituto Socioambiental (2019) as TIs possuem uma área de 1.081.258 km², representando 27% da área florestada e abrigando 355 mil pessoas de 150 etnias. A vegetação inclui florestas de terras altas, inundadas, ripárias e campinaranas, além de campos naturais e savanas. A geologia do bioma é rica em minerais como ouro, diamantes, cobre e ferro (Mucida et al., 2019).

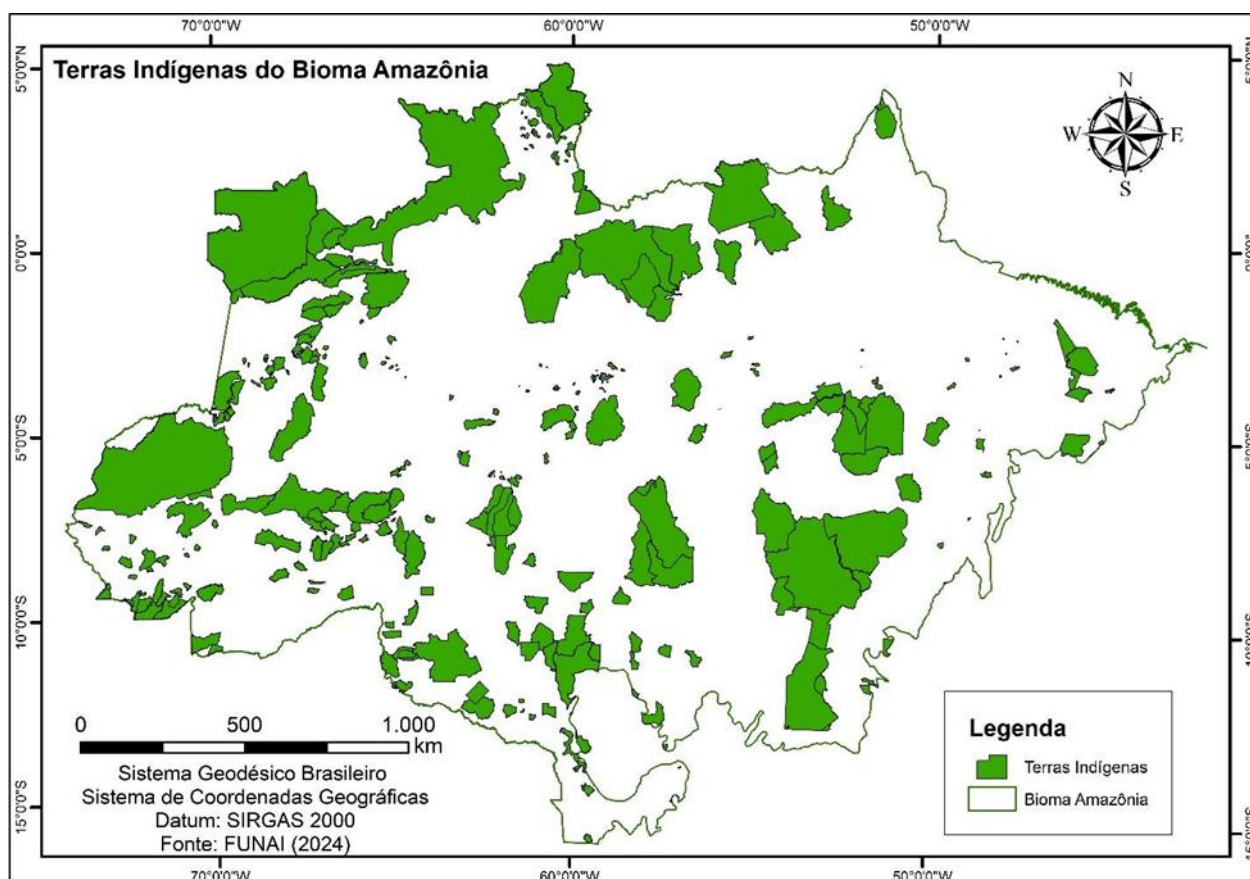


Figure 1: Localização das Terras Indígenas no Bioma Amazônia.

Fonte: Os autores (2025).

O relevo amazônico, predominantemente plano e de planalto, favorece a construção de pistas clandestinas. A vegetação predominante é composta por floresta tropical úmida, com uma diversidade significativa de espécies arbóreas, como castanheira-do-pará (*Bertholletia excelsa*) e mogno (*Swietenia macrophylla*), além de plantas medicinais utilizadas pelas comunidades indígenas. O clima do Bioma Amazônia é classificado como equatorial úmido, com temperaturas médias que

variam entre 24°C e 27°C, caracterizando-se por elevados índices de pluviosidade anual, entre 2.000 mm e 3.500 mm. As chuvas são distribuídas irregularmente ao longo do ano, concentrando-se nos meses mais úmidos e influenciando diretamente a dinâmica ecológica da região.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Fonte de Dados

O presente estudo utilizou dados do ano de 2023 provenientes de diferentes fontes oficiais de dados secundários. Os dados e informações sobre as pistas clandestinas foram obtidas pelo MapBiomias. Os dados das Terras Indígenas foram adquiridos junto à Fundação Nacional dos Povos Indígenas (FUNAI), contemplando a extensão, localização e status de demarcação de cada TI. Além disso, os dados sobre a área total do bioma Amazônia foram obtidos pelo site do TerraBrasilis, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Por fim, foi considerado um buffer de 10 km para cada Terra Indígena, seguindo a proposta de Santos (2014).

3.2. Método de análise

O Estimador de Densidade de Kernel (EDK) é um método amplamente utilizado para análise espacial, permitindo a criação de superfícies de densidade para visualização e identificação de padrões geográficos. No contexto deste estudo, o EDK será aplicado para analisar a distribuição espacial das pistas clandestinas dentro das Terras Indígenas e no Buffer de 10 km no bioma Amazônia.

A Estimativa de Densidade de Kernel baseia-se em dois parâmetros principais: o raio de influência (τ) e a função de estimativa do Kernel (k). O raio de influência, também conhecido como largura de banda, foi determinado utilizando a regra prática de Silverman (Silverman, 2018), garantindo robustez contra outliers espaciais. O cálculo da densidade foi realizado por meio da função quártica do Kernel, que modela a influência dos pontos vizinhos na formação da superfície de densidade.

Os resultados serão categorizados em quatro classes principais: Baixa, Média, Alta e Muito Alta, permitindo uma interpretação clara da distribuição espacial das pistas clandestinas dentro das TIs e no Buffer de 10km.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da Figura 2 indicam que as áreas classificadas como de densidade muito alta de pistas clandestinas estão concentradas principalmente na porção norte do bioma Amazônia. A maior concentração é observada dentro da Terra Indígena Yanomami, a maior TI do Brasil, seguida por outras Terras Indígenas localizadas no estado de Roraima.

Já as áreas de densidade alta, conforme demonstrado na Figura 2, também estão fortemente distribuídas no estado de Roraima, incluindo partes da TI Yanomami. Além disso, registros de densidade alta são encontrados na porção central e sul do Bioma Amazônia, destacando-se em três grandes Terras Indígenas: Kayapó, Munduruku e Parque do Xingu. Nessas regiões, a presença de pistas clandestinas sugere um padrão de ocupação que acompanha a expansão de atividades extrativas e o avanço da degradação ambiental, localizadas no chamado “Arco do Desmatamento”.

A presença de pistas de pouso clandestinas exerce um impacto significativo na expansão da mineração ilegal em Terras Indígenas. Segundo Rudke et al. (2020), essa atividade predatória ocorre devido à grande diversidade de recursos naturais existentes na Floresta Amazônica, tornando a região altamente visada para a exploração de ouro e outros minérios. Em estudos recentes, Silva et al. (2023a) verificou que essas pistas clandestinas atuam como um fator determinante na intensificação da mineração ilegal, especialmente na TI Yanomami, onde há um número expressivo dessas infraestruturas. Os autores destacam que a localização remota da TI Yanomami, aliada à ausência de

redes de infraestrutura rodoviária, torna o transporte aéreo a principal alternativa para a logística da atividade ilegal, facilitando o acesso e o escoamento dos minérios extraídos.

Além da TI Yanomami, o estudo de Silva et al. (2023a) indica que a presença de pistas de pouso clandestinas tem impulsionado a mineração ilegal em outras Terras Indígenas, particularmente nas terras Kayapó e Munduruku. De acordo com Silva et al. (2023a) nessas regiões, a infraestrutura rodoviária oficial e não oficial facilita o transporte de equipamentos clandestinos, ampliando os impactos da degradação ambiental e dos conflitos territoriais.

As áreas classificadas como de densidade baixa estão majoritariamente próximas às zonas de densidade média, alta e muito alta, o que demonstra um gradiente espacial na distribuição das pistas clandestinas. Esse padrão reforça a ideia de que a presença dessas infraestruturas ilegais segue um processo de expansão contínuo, conforme há maior conectividade com áreas de alto impacto.

Um aspecto relevante a se considerar é a situação das Terras Indígenas localizadas na porção oeste do bioma Amazônia, onde não foram identificadas densidades categorizadas como “Baixa”. Esse resultado pode indicar que, nas regiões mais isoladas do bioma, a pressão para a construção dessas infraestruturas ainda é reduzida, possivelmente devido a menor acessibilidade, à distância de corredores logísticos e à presença de barreiras naturais.

A inacessibilidade imposta pelo isolamento de parte do Bioma Amazônia, aliada à ausência de infraestrutura rodoviária e à dificuldade logística de intervenções em áreas remotas, atua como um fator limitador para a construção de pistas clandestinas. Segundo Becker (2005) tal condição é observada nas regiões de floresta ainda intocada, onde a baixa conectividade física reduz a atratividade para ações de grupos criminosos.

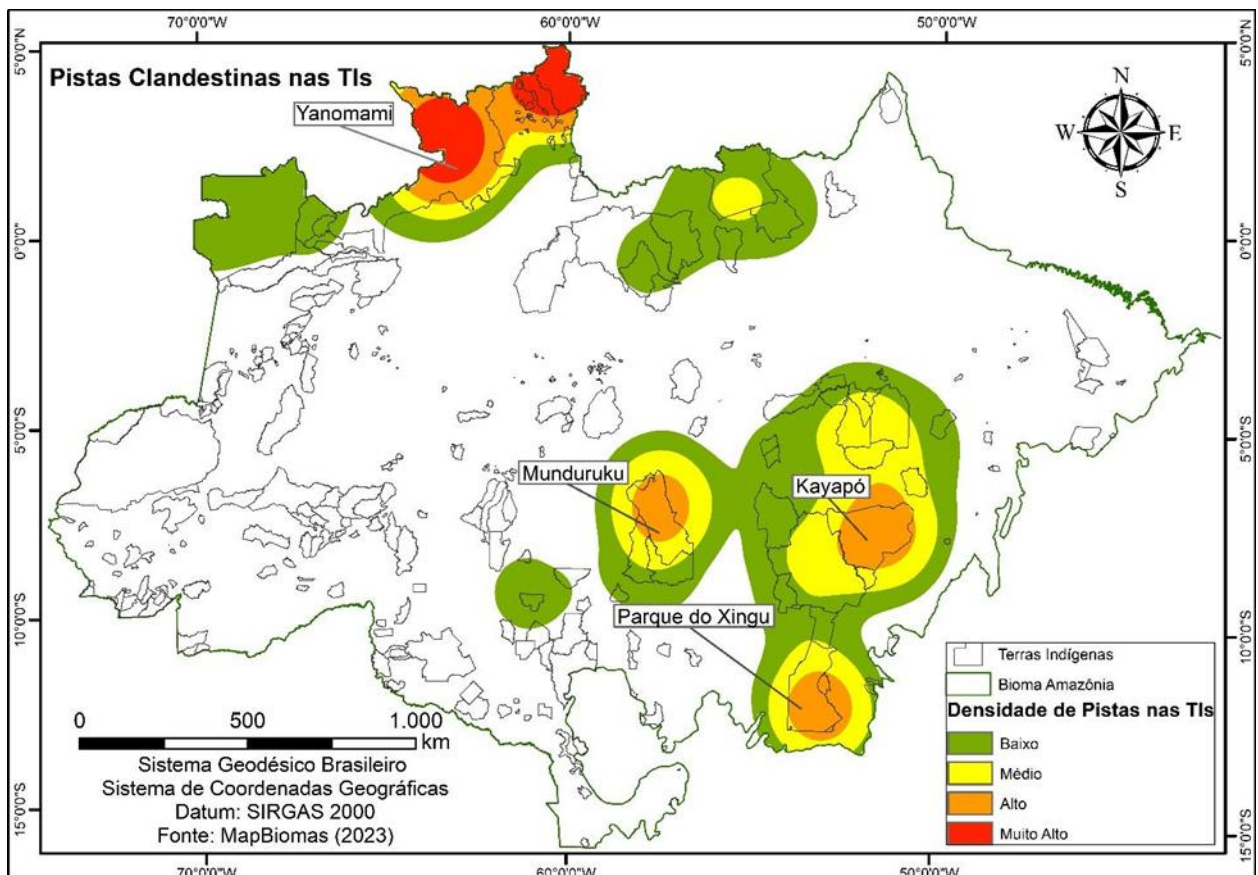


Figura 2: Densidade das Pistas Clandestinas nas Terras Indígenas do Bioma Amazônia.

Fonte: Os autores (2025).

Com relação aos resultados da Figura 3, o Estimador de Densidade de Kernel (EDK) revela padrões distintos na distribuição das pistas de pouso clandestinas dentro do buffer de 10 km ao redor das Terras Indígenas do Bioma Amazônia. Diferente da análise anterior, realizada exclusivamente dentro das TIs, observa-se que não há áreas classificadas como de densidade muito alta nesse buffer, indicando uma menor concentração direta nessas zonas de transição.

As áreas de densidade categorizada como “Alta”, entretanto, aparecem em três pontos principais: duas delas estão dentro da TI Munduruku e em outras TIs no estado de Roraima, enquanto a terceira está localizada na porção sul do bioma Amazônia, na região conhecida como Arco do Desmatamento. Esse padrão reforça a hipótese de que pistas clandestinas tendem a se concentrar em áreas que já sofrem grande pressão ambiental devido à presença de outras atividades ilícitas, como mineração ilegal e desmatamento.

A concentração de densidades de pistas de pouso clandestinas dentro do Buffer de 10 km em Terras Indígenas em regiões específicas da Amazônia, como a TI Munduruku localizadas no chamado “Arco do Desmatamento”, está fortemente associada à presença de atividades ilegais preexistentes, como o garimpo e o desmatamento.

Estudos demonstram que áreas de influência (buffer) sofrem uma sinergia de pressões antrópicas, favorecendo a construção de infraestruturas clandestinas (Barber et al., 2014; RAISG, 2022). Além disso, o Arco do Desmatamento é reconhecido por ser uma zona de fronteira agrícola e exploração mineral, onde a presença do Estado é limitada e a ocupação do território frequentemente ocorre de forma desordenada, facilitando a instalação dessas pistas clandestinas (Fearnside, 1985; Nogueira et al., 2007; Barber et al., 2014). Para Silva et al. (2023b), quanto maior a presença dessas infraestruturas dentro da área de influência das TIs, maior é a probabilidade de ocorrência de mineração ilegal, demonstrando que áreas impactadas por essa atividade frequentemente possuem pistas clandestinas próximas.

Já as densidades baixas, quando comparadas às densidades dentro das Terras Indígenas, apresentam uma variação importante. Observa-se que essas áreas de menor concentração aparecem em TIs como Alto Rio Negro, Yanomami e Terras Indígenas no Noroeste do bioma, sugerindo que, mesmo em regiões tradicionalmente mais preservadas, há registros de pistas clandestinas. Além disso, grande parte das densidades dentro do buffer de 10 km está localizada em Terras Indígenas próximas a grandes infraestruturas de transporte rodoviário, evidenciando a possível relação entre vias de acesso e expansão dessas infraestruturas ilegais.

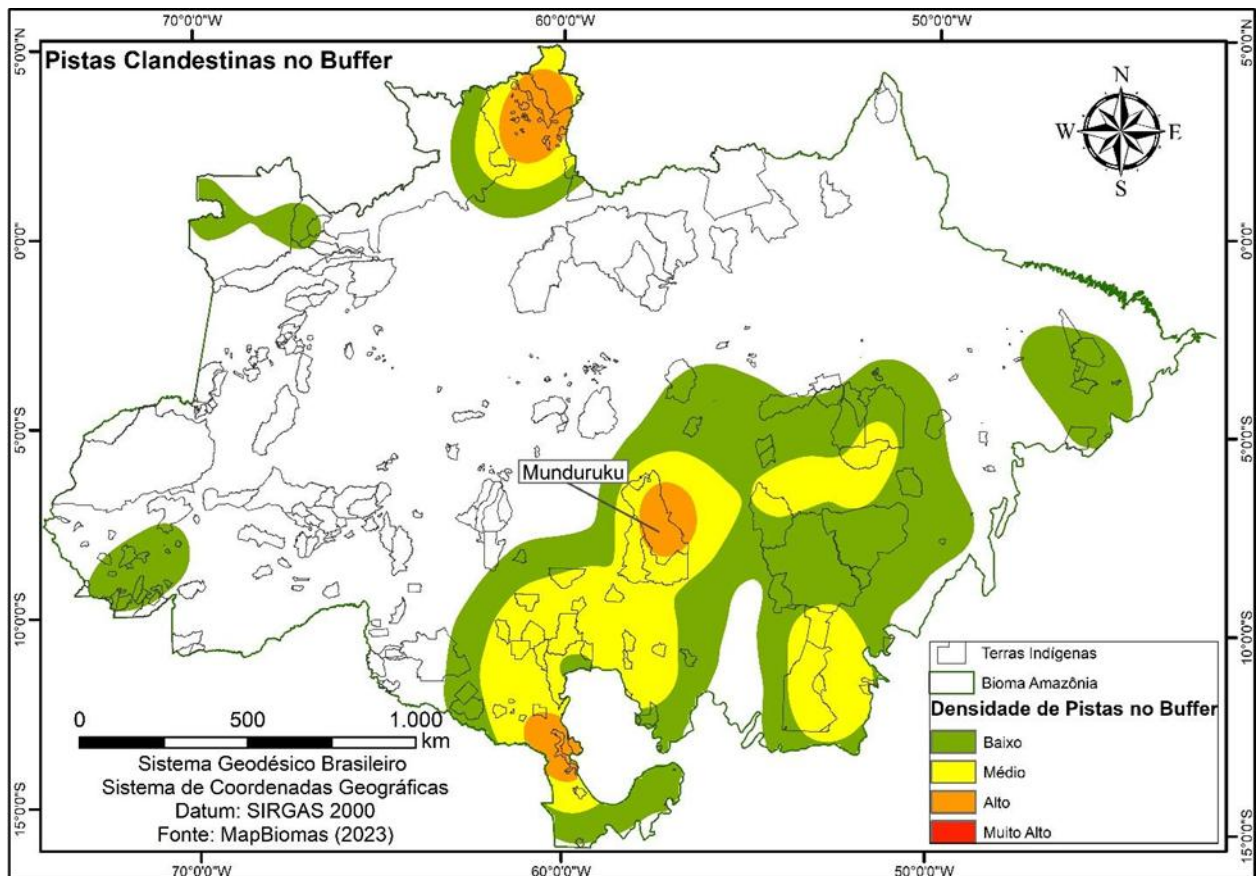


Figura 3: Densidade das Pistas Clandestinas no Buffer do Bioma Amazônia.

Fonte: Os autores (2025).

Diferente da análise dentro das TIs, a distribuição espacial das pistas clandestinas no buffer de 10 km mostra que essas infraestruturas também aparecem em áreas mais isoladas, ainda que em menor número. Isso indica que embora as TIs mais remotas estejam menos expostas à presença dessas pistas, sua proximidade com corredores logísticos pode favorecer uma expansão gradual dessas ocupações ilegais, aumentando os riscos de degradação ambiental e conflitos territoriais.

5 CONCLUSÕES

Os resultados desta análise espacial evidenciam a distribuição concentrada de densidades das pistas de pouso clandestinas dentro das Terras Indígenas e em seu buffer, no bioma Amazônia, revelando padrões distintos de sua localização. A maior densidade foi identificada na porção norte do bioma, especialmente na TI Yanomami e em TIs menores no estado de Roraima, indicando que essas regiões são pontos críticos de pressão ambiental em Terras Indígenas no Bioma Amazônia. No buffer de 10 km, a ausência de áreas de densidade muito alta sugere uma menor concentração nessas zonas de transição, embora TIs próximas a corredores logísticos e grandes rodovias apresentem maiores registros. Esse padrão reforça a relação entre infraestruturas clandestinas e acessibilidade, evidenciando que a proximidade de vias de transporte pode favorecer a expansão dessas pistas ilegais.

6 REFERENCES

Alves-Pinto, H. N., Newton, P., Pinto, L. F. G., & Torquebiau, E. (2022). The role of different governance regimes in reducing native vegetation conversion and promoting regrowth in the

Brazilian Amazon. Biological Conservation, 267, 109473.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109473>

- Barber, C. P., Cochrane, M. A., Souza Jr, C. M., & Laurance, W. F. (2014). Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon. *Biological Conservation*, 177, 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.07.004>
- Becker, B. K. (2005). Geopolítica da Amazônia. *Estudos Avançados*, 19, 71–86. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000100005>
- Bowman, K. W., Arora, V., Fisher, J. B., & Worden, J. R. (2022). The degradation of the Amazon rainforest: Regional and global climate implications. In *Climate Impacts on Extreme Weather* (pp. 217–234). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88456-3.00011-3>
- Conceição, K. V., Abessa, D. M. S., & Domingos, R. F. (2021). Government policies endanger the indigenous peoples of the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, 108, 105663. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105663>
- Covey, K., Figueira, A. M. S., & Neill, C. (2021). Carbon and beyond: The biogeochemistry of climate in a rapidly changing Amazon. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 618401. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.618401>
- Dominguez, D., da Silva, M. P., Sobrinho, R. P. e Gomes, R. A. T. (2022). Forecasting Amazon rainforest deforestation using a hybrid machine learning model. *Sustainability*, 14(2), 691. <https://doi.org/10.3390/su14020691>
- Fearnside, P. M. (1985). Brazil's Amazon forest and the global carbon problem. *Climatic Change*, 10(4), 179–186. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00140253>
- FUNAI, (2022). Fundação Nacional dos Povos Indígenas. Disponível em: <https://www.gov.br/funai/pt-br>. Acessado em: 25 de maio de 2025.
- Instituto Socioambiental. (2019). om Amazônia sob ataque, povos isolados são os mais vulneráveis. Disponível em: <https://site-antigo.socioambiental.org/pt-br/noticias-socioambientais/com-amazonia-sob-ataque-povos-isolados-sao-os-mais-vulneraveis>. Acessado em: 25 de maio de 2025.
- Lima, I. B., Vieira, R. M., & de Moraes Sousa, W. (2025). Yanomami People and Land in Roraima: Reviewing the Complex Nexus of Illegal Mining, Indigenous Vulnerability and Government Interventions. In *Amazon 2030 – Sustainability Issues in the World's Largest Rainforest Region* (pp. 513–543). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81465-5_34
- MapBiomias. (2023). Cerca de um terço das pistas de pouso na Amazônia está dentro de alguma área protegida. MapBiomias Brasil. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/cerca-de-um-terco-das-pistas-de-pouso-na-amazonia-esta-dentro-de-alguma-area-prottegida>. Acessado em: 25 de maio de 2025.
- Mucida, D. P., Barbosa, M. C. A., & Ribeiro, L. R. D. (2019). A degradação ambiental em narrativas de naturalistas do século XIX para a reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço. *Caderno de Geografia*, 29(57), 465–495. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2019v29n57p465-495>
- Neves, P. B. T., Sousa, F. M. L., Costa, R. M. D. S., & Mello, M. C. S. (2021). Amazon rainforest deforestation influenced by clandestine and regular roadway network. *Land Use Policy*, 108, 105510. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105510>
- Nogueira, E. M., Fearnside, P. M., Nelson, B. W., & França, M. B. (2007). Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': Implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. *Forest ecology and management*, 248(3), 119-135. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.04.047>

- Pardini, G. R., Silva, C. F. A., Nascimento, G. T. D., & Barbosa, L. A. (2025). Algoritmo aprimorado para detecção de pistas de pouso clandestinas na Floresta Amazônica. *Algorithms*, 18(2), 102. <https://doi.org/10.3390/a18020102>
- RAISG – Rede Amazônica de Informação Socioambiental Georreferenciada. (2022). Atlas de Pressões e Ameaças às Terras Indígenas da Amazônia. <https://www.amazoniasocioambiental.org>
- Rutt, C. L., Lees, A. C., Tobias, J. A., & Marsden, S. J. (2019). Avian ecological succession in the Amazon: A long-term case study following experimental deforestation. *Ecology and Evolution*, 9(24), 13850–13861. <https://doi.org/10.1002/ece3.5822>
- Rudke, A. P., Amaral, D. F., & da Silva, M. P. (2020). Impact of mining activities on areas of environmental protection in the southwest of the Amazon: A GIS- and remote sensing-based assessment. *Journal of Environmental Management*, 263, 110392. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110392>
- Santos, A. M., Ferreira, D. B., Souza, C. M., & Cochrane, M. A. (2021). Deforestation drivers in the Brazilian Amazon: Assessing new spatial predictors. *Journal of Environmental Management*, 294, 113020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113020>
- Silva, C. F. A., Barbosa, L. A., & Diniz, C. G. (2023a). The drivers of illegal mining on Indigenous Lands in the Brazilian Amazon. *The Extractive Industries and Society*, 16, 101354. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101354>
- Silva, C. F. A., Barbosa, L. A., & Diniz, C. G. (2023b). Road network and deforestation of Indigenous lands in the Brazilian Amazon. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119, 103735. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103735>
- Silva, C. F. A., Barbosa, L. A., Diniz, C. G., & de Oliveira, T. M. (2022). Highway network and fire occurrence in Amazonian Indigenous lands. *Sustainability*, 14(15), 9167. <https://doi.org/10.3390/su14159167>
- Silverman, B. W. (2018). *Density estimation for statistics and data analysis*. Routledge.
- Trigueiro, W. R., Nabout, J. C., & Tessarolo, G. (2020). Uncovering the spatial variability of recent deforestation drivers in the Brazilian Cerrado. *Journal of Environmental Management*, 275, 111243.