

Emergency fragility and natural vulnerability to soil loss in the eastern Amazônia

Artur Sales de Abreu Vieira¹, Daniel Araújo Sombra Soares², Antonio Jorge Silva Araújo Junior, Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa

e-mail: a-sales@hotmail.com (corresponding author) Universidade Federal do Pará¹²

A B S T R A C T

Soil is one of humanity's most essential natural resources and provides numerous ecosystem services, therefore, the assessment of vulnerability to soil is essential to identify the extent of fragility and preparing suitable plans for the conservation of the area. Thus, this research aimed to evaluate the natural vulnerability to soil loss and the emergency fragility of the Canaã dos Carajás, in the Pará state (East Amazonia), because it is a strategic location for the development of the state and the country, it is also a region with great mining activity. For this, a spatial database was created in a Geographic Information Systems (GIS) environment using the Qgis software version 3.16.11. The maps were prepared based on relative and empirical information on morphogenesis/pedogenesis proposed by Ross (1994) and Crepani et al. (2001), both based on the concept of ecodynamics by Tricart (1977), analyzing each of the themes individually: geology, geomorphology, pedology, vegetation, precipitation and land use. As a result of Natural Vulnerability, the Medium Stable/Vulnerable units stand out, on average, 75% of the study area, and Moderately Vulnerable to Vulnerable units, prevailing erosive processes with an area of approximately 14%. In the Emergency Fragility scenarios, the Moderately Stable and Medium Stable/Fragile classes stand out, representing, on average, 87% of the study area. The Moderately Fragile and Fragile classes, when added together, encompass approximately 11% of the entire area. In the units in which high Vulnerabilities (0.01%) and Fragilities (0.80%) predominated, special attention is suggested in relation to the natural environment and the agents that influence it, aiming at good social practices associated with environmental policies in the decision-making process. of economic decisions, enabling the valorization and protection of the environment.

Keywords: Geographic Information Systems; Morphogenesis; Pedogenesis.

Fragilidade emergencial e vulnerabilidade natural à perda de solo no leste da Amazônia

R E S U M O

O solo é um dos recursos naturais mais essenciais da humanidade e fornece inúmeros serviços ecossistêmicos, neste sentido, a avaliação da vulnerabilidade à perda de solo desempenha um papel fundamental na identificação da extensão da fragilidade e na elaboração de planos adequados para a conservação da área. Assim, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade natural à perda de solo e a fragilidade emergencial do município de Canaã dos Carajás, no estado do Pará (Leste da Amazônia), pois além desta ser uma localização estratégica para o desenvolvimento do estado e do país, é também uma região que é bastante aquecida pela atividade de mineração. Para tal, foi elaborado um banco de dados espaciais em um ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) com auxílio do software Qgis versão 3.16.11. Os mapas foram elaborados com base nas informações relativas e empíricas de morfogênese/pedogênese proposta por Ross (1994) e Crepani et al. (2001), ambas fundamentadas no conceito de ecodinâmica de Tricart (1977), analisando-se individualmente cada um dos temas: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, precipitação e uso da terra. Como resultado da Vulnerabilidade Natural, destacam-se as unidades Mediamente Estáveis/Vulneráveis, em média, 75% do município, e unidades Moderadamente Vulnerável a Vulnerável, prevalecendo os processos erosivos com área de aproximadamente 14%. Nos cenários de Fragilidade Emergencial destacam-se as classes Moderadamente Estável e a Mediamente Estável/Frágil que representam, em média, 87% da área de estudo. Já as classes Moderadamente Frágil e a Frágil, quando somadas, englobam aproximadamente 11% de toda a área. Nas unidades em que predominou altas Vulnerabilidades (0,01%) e Fragilidades (0,80%) sugere-se especial atenção em relação ao meio natural e aos agentes que o influenciam, visando boas práticas sociais associadas às políticas ambientais no processo de tomada de decisões econômicas, possibilitando a valorização e proteção do meio ambiente.

Palavras-chave: Sistemas de Informações Geográficas; Morfogênese; Pedogênese.

Introdução

O solo é um dos recursos naturais mais essenciais da humanidade e fornece inúmeros serviços ecossistêmicos, incluindo serviços primários, abastecimento e regulação, como produção de alimentos, regulação da perturbação climática por armazenamento de carbono e mitigação de inundações (Daily, Matson, & Vitousek, (1997); Adhikari & Hartemink, 2016). A diminuição de espessura do solo está frequentemente associada à perda do teor de matéria orgânica, típico da morfogênese, prevalecendo os processos erosivos, modificadores das formas de relevo. Isso pode diminuir o potencial de infiltração e armazenamento de água, favorecendo o escoamento superficial, através do fluxo terrestre de Horton, aumentando ainda mais a erosão (Bailey, Becraft, & Forsling, 1934).

O processo erosivo depende da combinação de fatores como, por exemplo, inclinação da encosta, clima (Bailey, Becraft, & Forsling, 1934), uso e cobertura da terra, e desastres ecológicos como incêndios florestais, entre outros (Parveen, Kumar, & Singh, 2012). A topografia controla o movimento do solo em uma bacia hidrográfica e as áreas cobertas principalmente por vegetação de alta fração favorecem ao menor risco de erosão do solo (Prasannakumar et al., 2011). Logo a redução do efeito protetor da cobertura da terra leva à diminuição das categorias de estabilidade. Neste sentido, a avaliação da Vulnerabilidade à Perda de Solo desempenha um papel fundamental na identificação da extensão da fragilidade e na elaboração de planos adequados para a conservação de bacias hidrográficas (Gelagay & Minale, 2016).

O município de Canaã dos Carajás está inserido num contexto típico da região amazônica formado pela disputa de território, principalmente, pela grande atividade exploratório de recursos minerais e ao avanço da agropecuária (Lopes, Santos, & Cruz, 2018). Este local apresenta um ecossistema frágil devido aos seus declives acentuados, solo instável e fortes chuvas, tornando importante o estudo de sua vulnerabilidade natural fragilidade emergencial. Com essa visão, torna-se necessário conhecer a frequência de estudos anteriores realizados nesta região e os métodos empregados globalmente para avaliar tais ecossistemas para planejar estratégias futuras. Existem numerosos modelos de avaliação da erosão do solo, mas há uma falta de conhecimento sobre o melhor método utilizado. Portanto, a compilação de modelos de erosão do solo é crucial

para grandes e pequenas escalas espaciais para planejamento, gestão e medidas políticas.

Neste contexto, esta pesquisa objetivou avaliar a Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo e a Fragilidade Emergencial do município de Canaã dos Carajás, Estado do Pará, a partir da aplicação de técnicas embasadas em metodologias de aplicação ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. De forma geral, neste trabalho os métodos de avaliação das vulnerabilidades ambientais baseiam-se na adoção, adaptação e/ou modificações das propostas metodológicas de Ross (1994) e Crepani, et al. (2001), ambas fundamentadas no conceito de ecodinâmica de Tricart (1977), analisando-se individualmente cada um dos temas: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, clima e uso da terra. O estudo se constituiu em um mapeamento cartográfico contendo o zoneamento de Canaã dos Carajás em classes das Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo e a Fragilidade Emergencial permitindo a avaliação das potencialidades do meio ambiente de forma integrada, compatibilizando suas características naturais com suas restrições.

Área de estudo

O município de Canaã dos Carajás tem área territorial de 3147 km², aproximadamente 39.103 habitantes e encontra-se na latitude de 6°29'51"S, longitude 49°52'42"O (IBGE, 2021), localizada na Mesorregião Sudeste Paraense, Microrregião Parauapebas, do Estado do Pará. O clima da região cita temperatura média mensal elevada, em torno de 26,40 °C, máxima de 29,10 °C e mínima de 24,70 °C.

A precipitação pluviométrica de acordo com dados meteorológicos possui uma média anual de 2.000 mm, com distribuição variável. Os períodos de maiores intensidades pluviais são de dezembro a maio, sendo março o mês mais chuvoso, enquanto os meses mais secos são de junho a novembro, e julho o mês mais seco, de chuvas mensais abaixo de 60 mm (INMET, 2022).

O leito rochoso do território possui uma estrutura geológica complexa sendo dominado por rocha migmatito, compostas por aproximadamente 40 % do território e inseridas dentro do Complexo Xingu. A pedologia ocorrente na área de estudo são predominantemente classificados em Argissolos vermelho-amarelos distróficos, e ocorrem ainda na região outras duas classes de solo de forma mais abrangente como Latossolos vermelho distróficos e Neossolos litólicos distróficos.

A vegetação de maior representatividade são a Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Ombrófila Densa e Campo Rupestre Ferruginoso, onde cerca de 10% de sua área de floresta está localizada na região da Floresta Nacional de Carajás (ICMBio, 2017). Economicamente as atividades de exploração mineral (ferro, cobre e níquel) e da pecuária no município são desenvolvidas de forma mais intensa, além de setor imobiliária, agricultura urbana, apicultura, artesanato e serviços informais (Cardoso, Cândido, & Melo, 2018).

Material e Métodos

Inicialmente, foi realizado aquisição de dados vetoriais e matriciais, sendo eles: limite municipal, limite estadual, mapa geológico, pedologia e vegetação adquiridos da base do IBGE, imagens de satélite Landsat 8 disponibilizadas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS); dados de uso e ocupação do solo no MapBiomias Brasil; o atributo morfométrico (declividade) foi obtido a partir de informações contidas no Modelo Digital do Terreno (MDT), elaborado a partir da manipulação de dados matriciais extraídos do Projeto TOPODATA (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e processadas no software Qgis 3.16.11 - GRASS 7, sendo realizado o fatiamento em classes. Já o mapa de intensidade pluviométrica média anual foi elaborado a partir do banco de dados de chuvas de estações pluviométricas situadas no interior e adjacências da área de estudo, disponibilizados pela INMET (2022), período de 1989 a 2021. As imagens estão apresentadas em arquivos digitais compatíveis com as quadriculas de articulação 1:250.000 com dimensão de pixels de 30m x 30m.

As vulnerabilidades e fragilidades ambientais de Canaã dos Carajás foram obtidas de acordo com as propostas de Crepani, et al. (2001) e Ross (1994). A metodologia propõe uma classificação do grau de estabilidade, segundo as relações de morfogênese e pedogênese, a partir da análise integrada das rochas, do solo, do relevo, uso e ocupação, vegetação e do clima. Desse modo, quando predomina a morfogênese, prevalecem os processos erosivos modificadores da forma do relevo, e, quando predomina a pedogênese, sobressaem os processos formadores do solo.

Ross (1994) traduz a fragilidade do terreno em cinco classes hierárquicas: muito fraca (1), fraca (2), média (3), forte (4) e muito forte (5). A concepção teórica da matriz de dissecação do relevo, proposta pelo autor, integra as variáveis referentes ao grau de entalhamento do vale (eixo Y) e dimensão interfluvial média (eixo X), sendo que a dissecação do relevo é diretamente proporcional à primeira variável e inversamente proporcional à segunda. Para o cálculo automatizado das variáveis entalhamento do vale e dimensão, usou-se a metodologia adaptada de Guimarães et al. (2017). Na Figura 1, apresentam-se perfis de vales que representam cada valor de dissecação da matriz proposta por Ross (1994), bem como a proposta de reclassificação da matriz e a proposta por Guimarães et al. (2017), além da estratificação da legenda.

Este estudo usa a metodologia proposta por Ross (1994) e adaptado por Guimarães et al. (2017), na qual aquele utiliza uma matriz de dissecação do relevo com as duas variáveis morfométricas, grau de entalhamento dos vales x dimensão interfluvial média; a soma dessas duas variáveis em determinada área mostra a dissecação dessa área (IDR) (Equação 1).

Segundo Guerra (1993), para representar o grau de entalhamento dos vales foi utilizado a amplitude relativa do relevo que é a diferença entre os pontos mais altos e mais baixos, considerando em um nível relativo por área amostral, que tem relação com a profundidade de drenagem, assim, pode-se definir como Dissecação Vertical (DV). A dimensão interfluvial média é a medição do tamanho dos interflúvios em determinada porção da superfície terrestre. Interflúvios são pequenas ondulações que separam os vales. Essa variável morfométrica pode ser definida como Dissecação Horizontal (DH).

Os critérios de Crepani et al. (2001) consideram que cada uma das classes dos atributos avaliados (substrato rochoso, geomorfologia, solos, uso e ocupação do solo e clima) possui um valor de vulnerabilidade que varia de 1 a 3, do mais estável para o mais vulnerável. Na avaliação da vulnerabilidade Geológica (G), Crepani et al. (2001) analisam dados morfométricos (declividade, dissecação do relevo e amplitude altimétrica), de acordo com a equação (2).

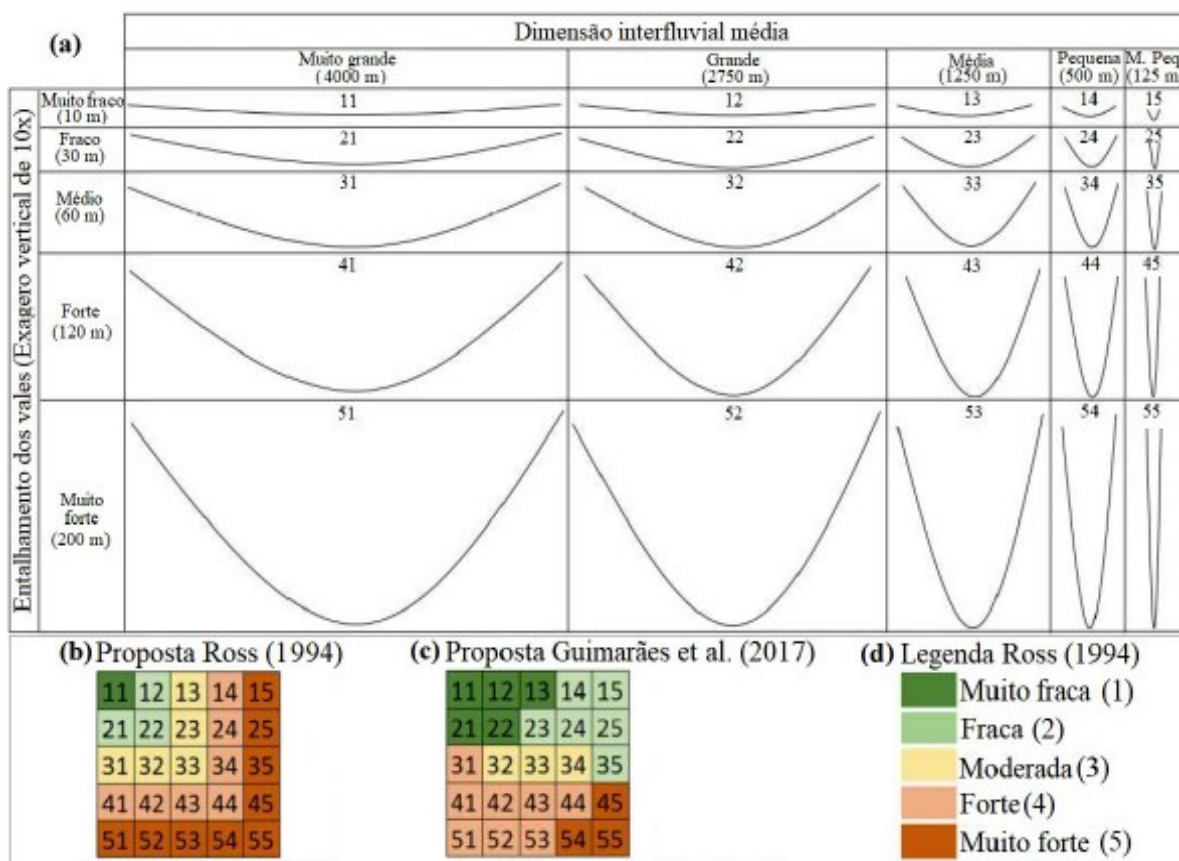


Figura 1 (a) Perfil dos vales que representam cada classe de dissecação da matriz de Ross (1994), (b) proposta de classificação de Ross (1994), (c) proposta de Guimarães et al. (2017), (d) legenda Ross (1994). Fonte: Adaptada de Guimarães et al. (2017).

O valor da Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo (VNPS) é obtido pela média aritmética das vulnerabilidades atribuídas a cada atributo conforme a equação (3). Para a avaliação da Fragilidade Emergente (FE) realiza-se o cruzamento entre os dados VNPS e os dados de Uso e Ocupação do Solo (U) (Equação 4).

$$IDR = DV + DH \quad (1)$$

$$R = \frac{(DC + DV + DH)}{3} \quad (2)$$

$$VNPS = \frac{(G + R + S + Vg + C)}{5} \quad (3)$$

$$FE = \frac{VNPS + U}{2} \quad (4)$$

Sendo “G” a vulnerabilidade para o tema Geologia; “DC” vulnerabilidade atribuída a

declividade em porcentagem; “DV” a dissecação vertical ou entalhamento do vale; “DH” dimensão interfluvial média ou dissecação horizontal; “R” a vulnerabilidade da Geomorfologia ou; “S” a vulnerabilidade dos solos; “Vg” a vulnerabilidade para o tema Vegetação; “C” a vulnerabilidade do clima.

Deste modo, as classes de cada mapa temático foram substituídas pelos valores de vulnerabilidade, em uma escala variando de 1 a 3, preestabelecidos no SIG. Em seguida, por meio das operações de álgebra de mapas utilizando a linguagem de programação do software Qgis versão 3.16.11, os atributos de cada mapa foram integrados, apresentando como resultado um mapa síntese com cinco classes temáticas (Tabela 1). As unidades mais estáveis apresentam valores próximos a 1,0, as intermediárias, próximos a 2,0 e as unidades mais vulneráveis, próximos a 3,0.

Tabela 1- Representação dos valores e das classes de estabilidade/vulnerabilidade/fragilidade das unidades de paisagem. As cores utilizadas na representação do Mapa Vulnerabilidade pertencem ao sistema RGB (red, green, blue).

UNIDADE	INTERVALO DE VALORES	VARIÁVEL VISUAL COR
Estável	1,0 a 1,3	R: 43 /G: 131 /B: 186
Moderadamente Estável	1,4 a 1,7	R: 171 /G: 221 /B: 164
Medianamente Estável/Vulnerável	1,8 a 2,2	R: 255 /G: 255 /B: 191
Moderadamente Vulnerável	2,3 a 2,6	R: 253 /G: 174 /B: 97
Vulnerável	2,7 a 3,0	R: 215 /G: 25 /B: 28

Fonte: Modificado de Crepani et al. (2001).

Resultados e discussão

O mapa geológico apresenta diferentes formações rochosas que constituem a crosta terrestre em camadas sobrepostas. Verifica-se a presença da Subprovinça Estrutural de Serra

Arqueada (98,82%) e três formações em destaque, tendo a formação Xingu como a mais representativa do território (40,13%), seguida pela Paraopeba (26,49%) e Águas Claras (12,64%). Na tabela 2 estão discriminados os litotipos e na Figura 2A destaca-se as vulnerabilidades das áreas na região.

Tabela 2-Valores de vulnerabilidade das classes Geológicas de Canaã dos Carajás – PA.

LITOTIPO	ÁREA (km ²)	PERCENTUAIS	VULNERABILIDADE
Álcali-feldspato granito pórfirítico, Granito pórfiro	115.03	3.66	1.5
Arenito, Conglomerado, Siltito, Pelito	397.62	12.64	2.7
Biotita-sericita milonito, Clorita xisto, Diorito, Hornblenda-biotita-escapolita hidrotermalito, Sericita xisto milonítico, Metarriolito	9.39	0.30	1.7
Charnockito, Diorito, Gnaiss, Granito, Granitóide, Granulito, Metamáfica	1262.65	40.13	1.2
Diabásio, Dunito, Gabro, Serpentinó, Piroxenito, Peridotito, Norito	17.35	0.55	1.8
Diorito, Granito	68.82	2.19	1.2
Formação ferrífera bandada, Jaspelito	71.54	2.27	1.8
Granito	62.65	1.99	1.1
Granulito enderbítico	133.96	4.25	1.2
Metabasalto, Metadacito, Metarriolito	833.54	26.49	1.3
Sienogranito, Granodiorito, Monzogranito	174.35	5.54	1.2

Fonte: IBGE, 2021.

As áreas de cobertura vegetal natural são compostas pela proeminente cobertura da floresta ombrófila (localizada na região da Floresta

Nacional de Carajás), com cerca de 51,57%, com vulnerabilidade variando de 1,00 a 2,00, área destinadas a pecuária com 48,40%, com

vulnerabilidade na ordem de 2,80, e pelas áreas de superfície aquática e úmidas com (0,03%). A Figura 2B apresenta a distribuição das classes de uso e ocupação.

De acordo com a carta pedológica (Figura 2C), foram identificados três tipos de solos no município de estudo, pertencentes às classes de Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, Neossolos Litólicos distróficos e Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos, na escala 1:250.000 fornecidos pelo sítio eletrônico do Banco de Dados de Informações Ambientais do IBGE (2021).

A classe de Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico é predominante no município, incidindo principalmente nas regiões menos acidentadas, presente em mais da metade do território, ocupando uma área de 1773,12 km² (56,34%), com vulnerabilidade igual a 2. O Neossolo Litólico distrófico, ocupa 41,89% do território, predominantemente nas regiões de relevos muito declivosos do município, cujo corresponde a alta vulnerabilidade (3), pois são solos normalmente com pequena profundidade e pedregosidade que dificultam a penetração e a exploração de água e nutrientes pelas raízes das plantas e são frequentemente utilizados para pastagens (Corado Neto, et al., 2015). Os Latossolos Vermelho-Amarelo distrófico, que são predominantemente hidromórficos, profundos, que em condições naturais apresentam boa resistência aos processos erosivos e estável, vulnerabilidade igual a 1, ocorrem em apenas 1,74% da área.

Os corpos d'água basicamente constituídos por represas de rejeito de mineração, reservatórios artificiais, como açudes, são utilizados para diversas finalidades, em desenvolvimento no município, visto que ela se constitui num incentivo aos agricultores, a fim de dinamizarem a produção na propriedade. Estas áreas foram consideradas vulneráveis por apresentarem significativos potenciais à perda de solo em relação às demais classes de uso.

O produto da interação chuva/solo é chamada de erosão. O poder da chuva em causar erosão é chamado erosividade e é função das características físicas da chuva. O valor da intensidade pluviométrica para a uma determinada área pode ser obtido dividindo-se o valor da pluviosidade média anual (em mm) pela duração do período chuvoso (em meses). No caso de Canaã dos Carajás, a média histórica de 1989 a 2021 aponta o período de novembro a abril como o mais chuvoso,

sendo março o mês com maior média histórica (351,44 mm), enquanto de maio a outubro compreende o período com menores precipitações, sendo o mês de julho o que apresenta menor média histórica (19,89 mm) (INMET, 2022). Na Figura 2D é apresentado o mapa de vulnerabilidade relacionado às precipitações no município.

Com relação à análise dos atributos geomorfológicos, quanto à declividade, as classes de vulnerabilidade acentuada ocorrem de forma mais expressiva na porção norte e sudeste do município onde predominam morros e serras (Figura 2E) e altitudes que alcançam 156,75 m.

Conforme Crepani, et al. (2001), declividades de terreno até 2% possuem vulnerabilidade com peso 1, de 2% a 6% possui peso 1,50, de 6% a 20% possui peso 2,00, de 20% a 50% possui peso 2,50, e acima de 50% possui peso 3,00.

De acordo com os dados processados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2011), o município de Canaã dos Carajás possui predominantemente declividades na ordem de 2 a 6%, representando 35,01% da área, seguida de declividades na ordem de 6% a 20%, representando 33,25% do município. Dessa forma, as áreas com declividade acima de 2% a 20% correspondem a 68,26% da área, com vulnerabilidade variando de 1,5 a 2. Destaca-se uma representativa parcela de relevo moderadamente vulnerável a vulnerável (2 a 3), equivalente a 22,96% da área total do terreno com inclinações acentuadas (acima de 20%), sobressaindo-se o valor máximo de declividade próximo de 137%.

Na área de estudo, a distribuição das classes de vulnerabilidade geomorfológica ocorre de forma moderadamente vulnerável (58,43%), vulnerável no domínio (40,94%) dos morros e serras da porção norte e sudeste da cidade e medianamente estável/vulnerável na porção central e sul (0,63%), conforme Figura 2F. Conforme observado na Figura 3, o cenário atual de uso e ocupação do solo no município demonstra que áreas antropizadas por pastagens, solo exposto e áreas urbanas, correspondem a cerca de 51,43% da área total, representando vulnerabilidades elevadas, da ordem 2,00 a 3,00, enquanto áreas de cobertura natural, representadas pela floresta e áreas de formação natural não florestal, perfazem 46,07% do território, que representa vulnerabilidades baixas, da ordem de 1,00 a 1,50.

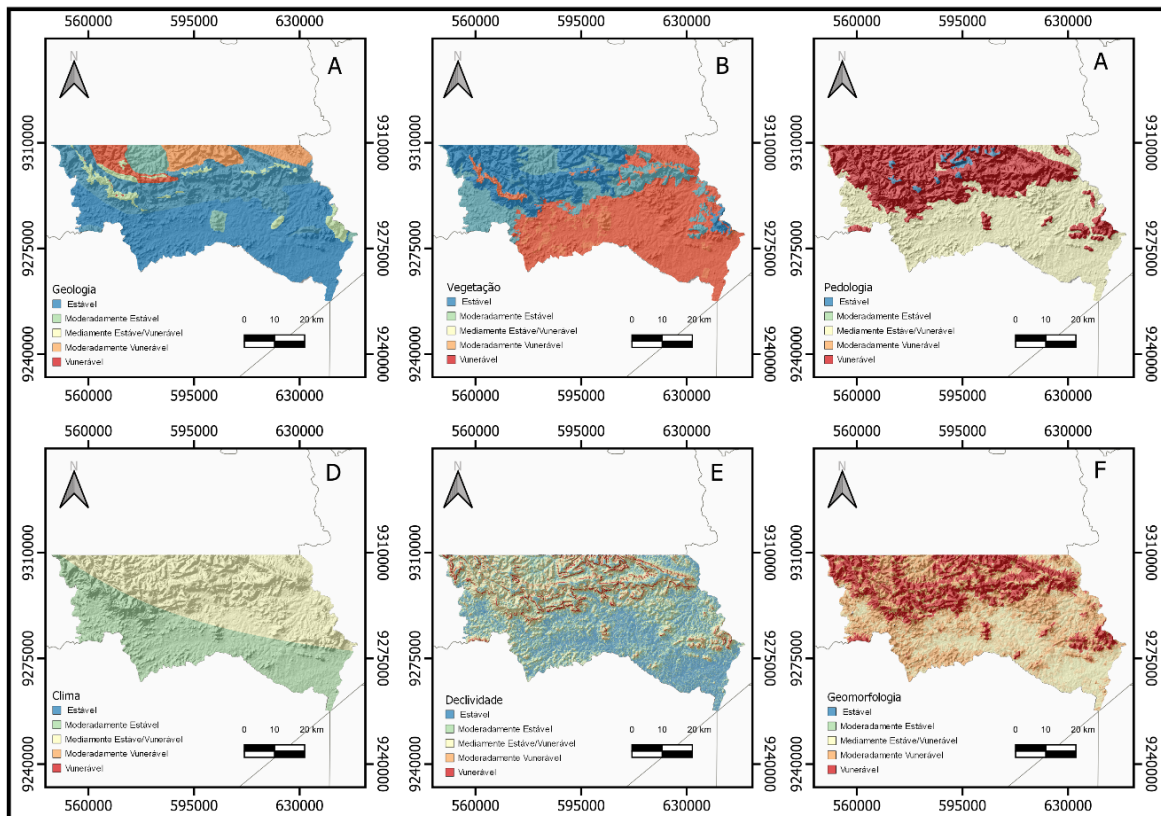


Figura 2-Parâmetros das vulnerabilidades dos atributos avaliados de acordo com Crepani et al. (2001): (A) Geologia; (B) Vegetação; (C) Pedologia; (D) Clima; (E) Declividade; e (F) Geomorfologia.

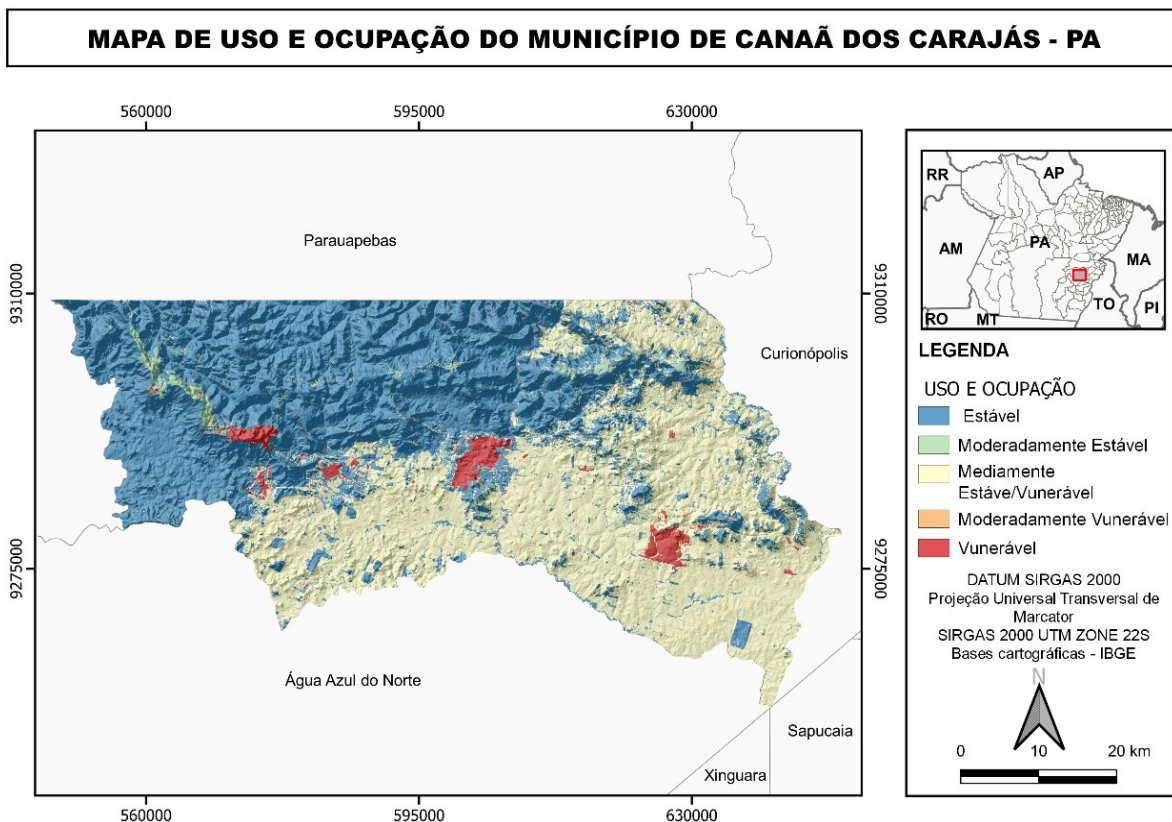


Figura 3-Mapa de uso e cobertura do solo do município de Canaã dos Carajás (PA).

A Tabela 3 apresenta as classes do IDR obtidos a partir dos cruzamentos definidos na Equação (1) sugerida por Ross (1994) e adaptado

por Guimarães et al. (2017). De acordo com os dados mapeados, 50,04% da área do município apresenta vulnerabilidade Fraca. Estas áreas e

bolsões associam-se em regiões preservadas e localizadas, principalmente, em áreas baixas em relação morros e serras na porção central e sul do

território. Por outro lado, é notório a vulnerabilidade Muito Forte nas regiões mais escarpadas com 41,42%, conforme a Figura 4.

Tabela 3- Valores de vulnerabilidade do Índice de Dissecção do Relevo de Canaã dos Carajás - PA

IDR	ÁREA (km²)	PERCENTUAIS	VULNERABILIDADE
Muito fraca	18.55	0.59	1.00
Fraca	1574.63	50.04	2.00
Moderada	117.37	3.73	3.00
Forte	132.87	4.22	4.00
Muito Forte	1303.48	41.42	5.00

Fonte: Autores, 2022.

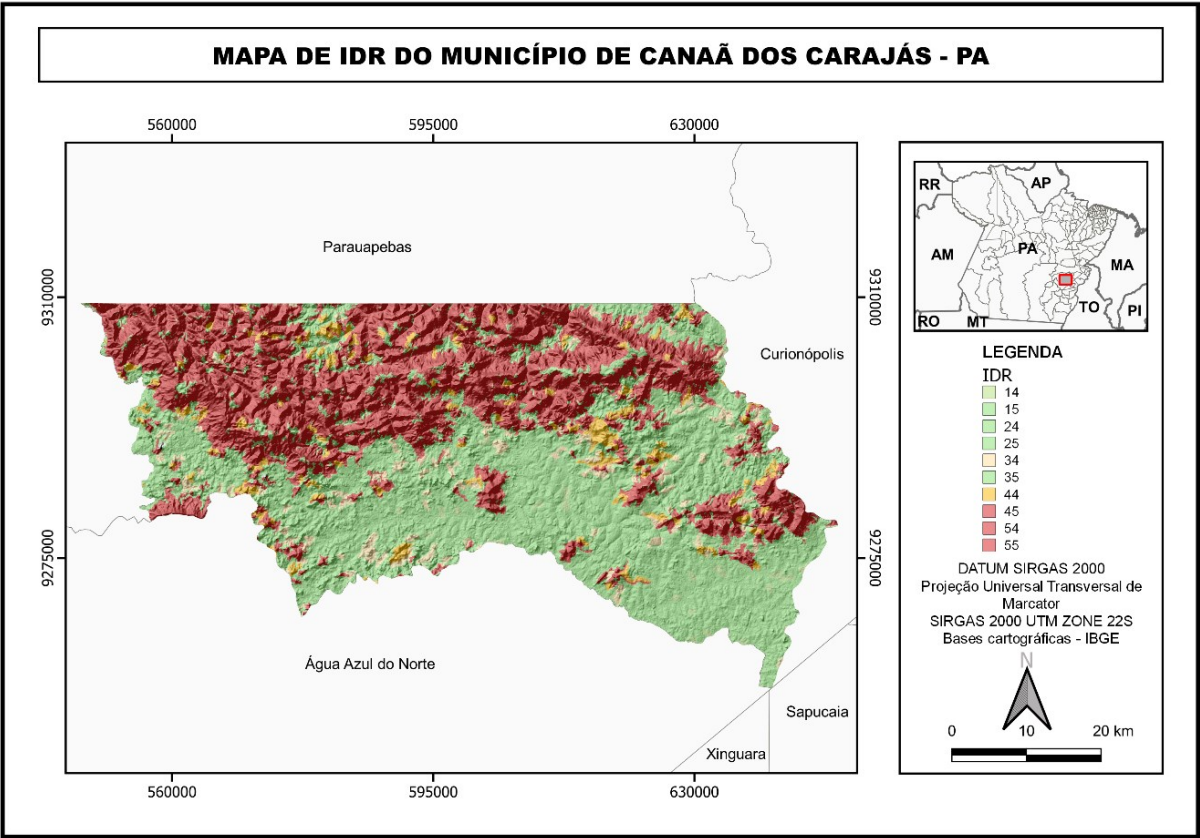


Figura 4-Mapa de IDR do município de Canaã dos Carajás (PA).

No método de Crepani et. al, 2001, o VNPS estável está associado as áreas mais aplainadas e de cobertura vegetal mais densa, podendo ser bolsões de mata ou trechos de cobertura vegetal plantada não natural. É representada nas áreas central, oeste e leste do município declividades menores que 20%, substrato rochoso cristalino, solos de comportamento laterítico e cobertura vegetal e pastagem em menor proporção (Figura 5).

Nota-se uma maior homogeneidade da classe de VNPS mediantemente estável/vulnerável,

com 75,31% de cobertura, associadas às pressões de ocupação por pastagens e outras atividades de agropecuária, e em função da baixa vulnerabilidade geológica e de declividade.

As classes moderadamente vulneráveis (14,08%) e vulneráveis (0,09%), distribuem-se na porção norte e sudeste, conforme exposto anteriormente, em função da baixa fragilidade do substrato rochoso e dos solos, declividades acentuadas, presença de vegetação de gramíneas,

igapós, açudes, manguezais e processo de ocupação em estágio de expansão.

As classes estável e moderadamente estável responderam por 10,52% da cobertura, com peso de vulnerabilidade igual a 1,00 e 1,50, respectivamente.

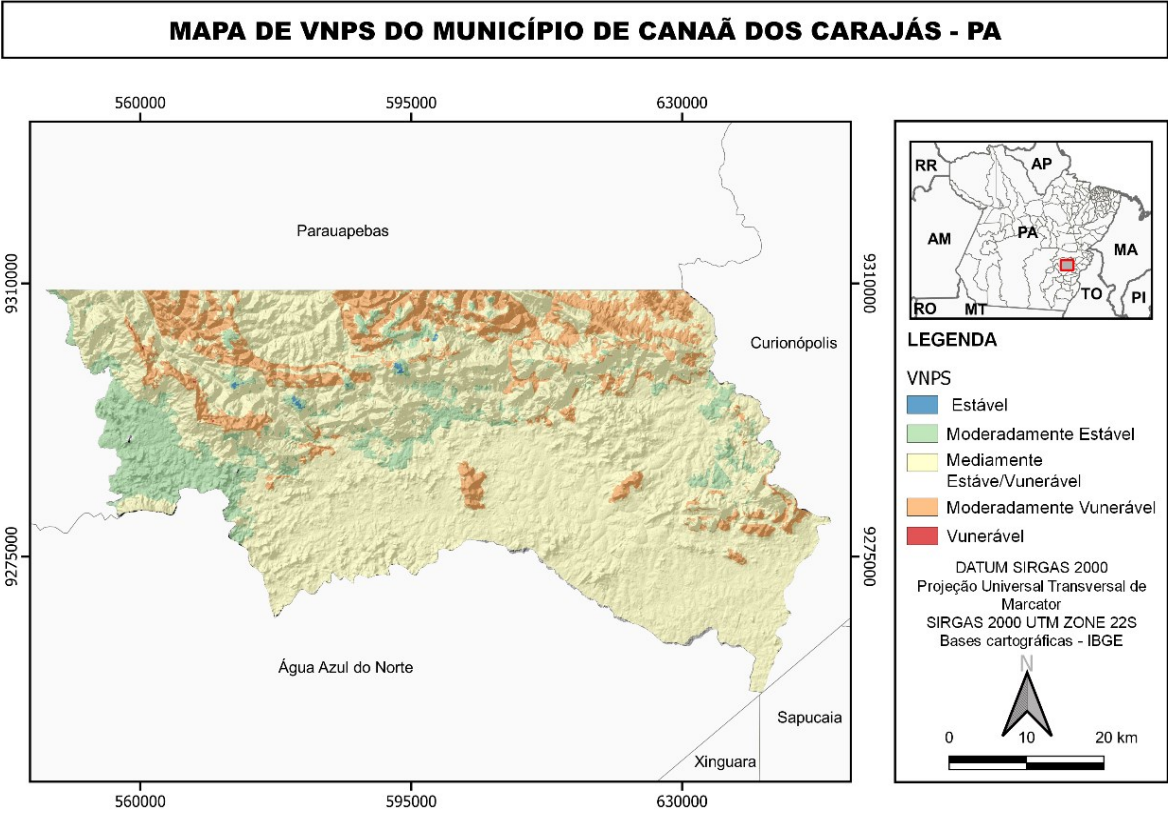


Figura 5-Mapa de VNPS do município de Canaã dos Carajás (PA).

A Figura 6 apresenta a fragilidade emergencial para Canaã dos Carajás, ou seja, o resultado do cruzamento entre a Vulnerabilidade Natural de Perda do Solo (Figura 5) e a vulnerabilidade das classes de uso e ocupação do solo (Figura 3) realizado de acordo com a Equação 4. De forma geral, a contribuição das características de vulnerabilidade das classes de uso e ocupação do solo na porção norte a noroeste do município, se dá no sentido de diminuição das fragilidades emergenciais em função da presença de áreas de floresta preservada, principalmente, as ocorrentes nos topos dos morros e serras.

Ao longo de todo o território nota-se a ocorrência de pequenas áreas de moderadamente frágil a frágil associadas a ocorrência de áreas úmidas ou degradadas por solo exposto. Em relação ao nível de Fragilidade Estável, abrange 0,11% da área, e Moderadamente Estável, representou 32,35% do território, estão associadas principalmente por áreas com predomínio de florestas não alteradas, ambientes com potencial erosivo naturalmente baixo. As classes de fragilidade emergencial são representadas na Tabela 4.

Tabela 4-Valores de Fragilidade Emergencial do Solo em Canaã dos Carajás – PA.

Fragilidade	ÁREA (km²)	PERCENTUAIS	VULNERABILIDADE
Estável	3.61	0.11	1.00
Moderadamente Estável	1018.15	32.35	1.50
Mediamente Estável/Frágil	1788.55	56.84	2.00
Moderadamente Frágil	311.44	9.90	2.50
Frágil	25.16	0.80	3.00

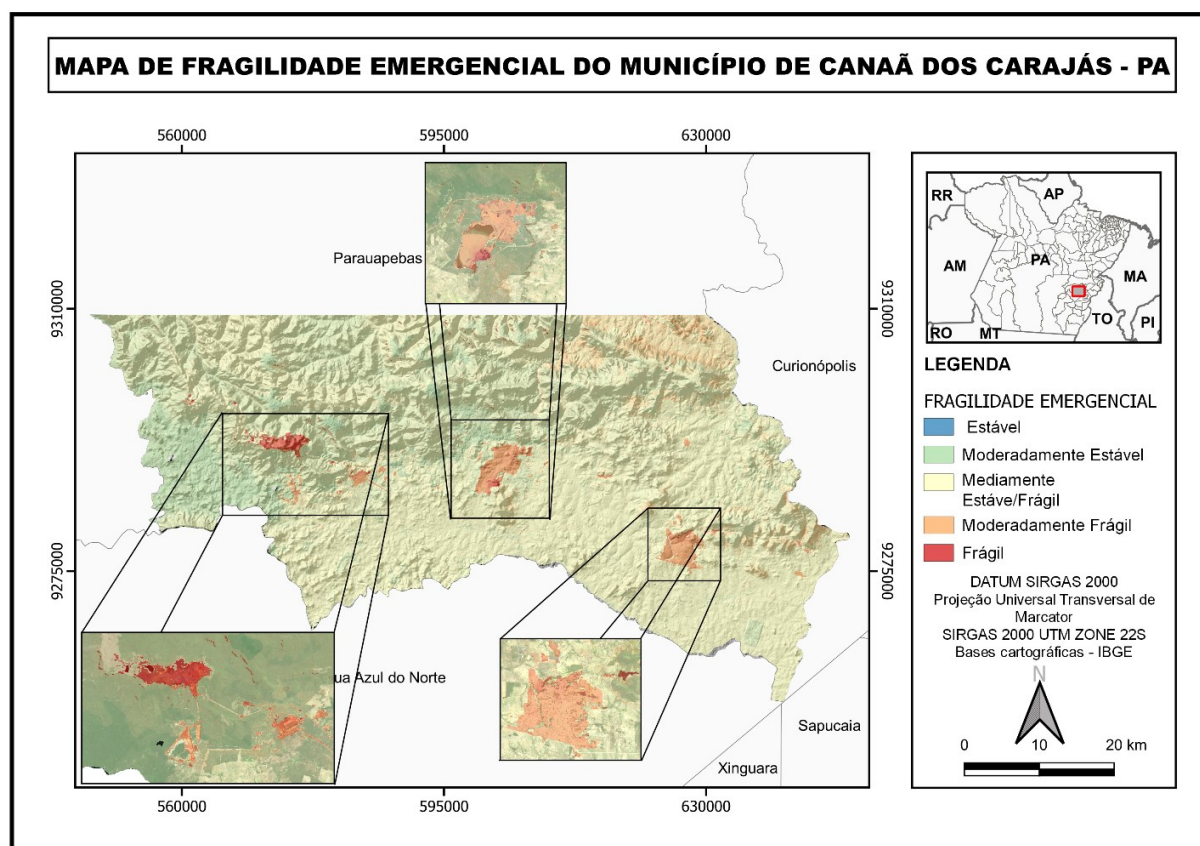


Figura 6- Mapa de Fragilidade Emergencial do município de Canaã dos Carajás (PA).

Avaliando-se a área total do município de Canaã dos Carajás, o índice de correlação entre os mapas de vulnerabilidade natural à perda do solo e fragilidade emergencial chega ao coeficiente de determinação de aproximadamente 80% ($R^2 = 0,8023$), representado pela expressão $y = 1,1588x - 99,943$. A porção norte do município caracterizada pela ocorrência de formas de relevo serrano (vulnerável/frágil) e alguns bolsões de área em estabilidade apresentaram uma boa aderência entre os respectivos mapas. Por outro lado, a área associada à planície costeira, moderadamente estável, possui uma menor correlação entre os mapas. Porém, quando analisados separadamente os diferentes parâmetros de morfogênese e pedogênese, nota-se clara variação nos valores de R^2 .

Conclusões

O cenário entre a distribuição da VNPS do solo e FE no município de Canaã dos Carajás remete concluir que: 1) As áreas de vulnerabilidade estável a moderadamente estável e as de fragilidade estável associam-se a fragmentos bem preservados de floresta localizados, principalmente, em áreas altas dos topos de morros e serras da porção norte e

noroeste do território. Na parte central da região associam-se às áreas mais aplainadas e de cobertura vegetal mais densa, podendo ser bolsões de mata ou trechos de formação natural mais densos. 2) De maneira geral, as áreas de média vulnerabilidade e média fragilidade emergencial são mais representativas nas áreas central até o leste do município que se caracterizam pelas áreas de declividades menores que 20%, substrato rochosos cristalino, solos de comportamento laterítico e cobertura vegetal predominantemente de floresta, além de pastagens em menor proporção. 3) Nota-se áreas bem definidas de classes moderadamente vulneráveis nos altos das serras, associadas às pressões de ocupação pela agropecuária, e em função da vulnerabilidade estável geomorfológico. 4) As classes vulneráveis e frágeis se aglutinam e distribuem-se em zonas bem distintas, principalmente em virtude do processo de ocupação por pastagens, pela presença de vegetação de gramíneas, manguezais, lagos e processo de ocupação em estágio de expansão, como atividades da mineração e o centro urbano.

Com relação à análise entre os mapas de vulnerabilidade e fragilidade, os valores de R^2 encontrados demonstram satisfatória correlação entre os dados que refletem, de forma coerente. Ressalta-se que não se propõe neste trabalho

especificar as potencialidades e limitações de cada método, porém procura contribuir com o conhecimento das fragilidades emergenciais e vulnerabilidades naturais ocorrentes no município no sentido de proporcionar ao Poder Público, empreendedores, ambientalistas e interessados em geral, informações úteis ao processo de gestão territorial, contribuindo, dessa forma, para uma ocupação planejada e sustentável.

Referências

- Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262, 101-111.
- Bailey, R. W., Becraft, R. J., & Forsling, C. L. (1934). *Floods and accelerated erosion in northern Utah*. US Government Printing Office.
- Cardoso, A. D., Cândido, L. S., & Melo, A. C. (2018). Canaã dos Carajás: um laboratório sobre as circunstâncias da urbanização, na periferia global e no alvorecer do século XXI. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, 20, 121-140.
- Corado Neto, F. C., Sampaio, F. M., Veloso, M. C., Matias, S. R., Andrade, F. R., & Lobato, M. R. (2015). Variabilidade espacial da resistência à penetração em Neossolo Litólico Degradado. *Revista brasileira de Ciência do Solo*, 39(5), 1353-1361.
- Crepani, E., Medeiros, J. D., Hernandez Filho, P., Florenzano, T. G., Duarte, V., & Barbosa, C. F. (2001). *Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial*. São José dos Campos: INPE.
- Daily, G. C., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (1997). Ecosystem services supplied by soil. Em *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems* (pp. 113-132).
- Gelagay, H. S., & Minale, A. S. (2016). Soil loss estimation using GIS and remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 126-136.
- Guerra, A. T. (1993). *Dicionário geológico-geomorfológico*. Rio de Janeiro: IBGE.
- Guimarães, F. S., Cordeiro, C. M., Bueno, G. T., Carvalho, V. M., & Nero, M. A. (2017). Uma proposta para automatização do índice de dissecação do relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 18(1), 155-167. doi:<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v18i1.1163>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2021). *Estimativas da população*. Brasília: IBGE.
- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio. (2017). *Plano de Pesquisa Geossistemas Ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás*. Brasília: ICMBio.
- Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. (2022). *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP*. Acesso em 15 de Fevereiro de 2022, disponível em Site do INMET: <https://dbmep.inmet.gov.br/>
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. (2011). *Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil*. Acesso em 16 de Fevereiro de 2022, disponível em TOPODATA: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>
- Lopes, R. R., Santos, M. M., & Cruz, T. M. (2018). Mineração e conflitos pela posse da terra em Canaã dos Carajás: O caso do acampamento Planalto Serra Dourada. *Revista do Programa de Pós-Graduação em Extensão Rural*, 7(2), 117-140.
- MAPBIOMAS. (2018). *Coleção 3 da série anual de mapas de cobertura e uso do solo do Brasil*. Acesso em 15 de Fevereiro de 2022, disponível em Site do MAPBIOMAS: <http://mapbiomas.org/>
- Parveen, R., Kumar, U., & Singh, V. K. (2012). Geomorphometric characterization of upper South Koel basin, Jharkhand: A remote sensing & GIS approach. *Journal of Water Resource and Protection*(4), 1042-1050.
- Prasannakumar, V., Shiny, R., Geetha, N., & Vijith, H. (2011). Spatial prediction of soil erosion risk by remote sensing, GIS and RUSLE approach: A case study of Siruvani river watershed in Attapady valley, Kerala, India. *Environmental Earth Sciences*, 64(4), 965-972.

Ross, J. L. (1994). Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia*, 8.

Tricart, J. (1977). *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN.