



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Vulnerabilidade Ambiental da Sub-Bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG

Ítalo Rafael Costa de Mira¹, Débora Silva Carvalho², Denise Silva Leão de Souza³, Márcio Luiz da Silva⁴

¹ Bolsista de Iniciação Científica PIBIC, IFSULDEMINAS/CNPq. Técnico em Agrimensura e Graduando em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS), *Campus Inconfidentes*. Diretor Técnico de Meio Ambiente da Empresa Junior IFEAC Agrimensura e Cartografia. Membro Titular do Conselho Municipal de Defesa e Conservação do Meio Ambiente do Município de Inconfidentes - CODEMA. Membro dos Grupos de Estudos “Solos, Paleossolos, Depósitos e Evolução das Paisagens” e “Geoprocessamento, Meio Ambiente, Direito e Planejamento Urbano”, coordenados pelo prof. Dr. Márcio Luiz da Silva. Tel.: (+55 35) 99969-0262, italo.mira14@gmail.com

² Graduanda em Engenharia Ambiental - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, *Campus Inconfidentes*. Discente de Iniciação Científica. Membro dos Grupos de Estudos “Solos, Paleossolos, Depósitos e Evolução das Paisagens” e “Geoprocessamento, Meio Ambiente, Direito e Planejamento Urbano” coordenados pelo Prof. Dr. Márcio Luiz da Silva, Tel.: (+55 35) 99886-5682, debora.carvalho515@gmail.com

³ Graduada em Gestão Ambiental - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, *Campus Inconfidentes*. Membro dos Grupos de Estudos “Solos, Paleossolos, Depósitos e Evolução das Paisagens” e “Geoprocessamento, Meio Ambiente, Direito e Planejamento Urbano” coordenados pelo Prof. Dr. Márcio Luiz da Silva. Mestranda em Geociências – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Tel.: (+55 35) 99929-8965, denisedink31@hotmail.com

⁴ Doutor em Geologia - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS), *Campus Inconfidentes*. Coordenador do Laboratório de Geologia e Pedologia (GEPE) E-mail para correspondência: marcgeo10@yahoo.com.br.

Artigo recebido em 29/11/2021 e aceito em 16/05/2022

RESUMO

O entendimento sobre a vulnerabilidade ambiental constitui meio extremamente importante para a instituição de políticas públicas de planejamento territorial e para a adoção de práticas de manejo para o correto uso e ocupação da terra, possibilitando a minimização dos impactos e desastres ambientais. Dessa forma, o objetivo desse artigo compreende o mapeamento da vulnerabilidade ambiental da Sub-bacia dos Rios Mogi Guaçu e Pardo, Sul de Minas Gerais. Os métodos utilizados abrangeram interpolações geoestatísticas, processamento digital de imagens e álgebra de mapas. A vulnerabilidade da unidade de paisagem (vulnerabilidade ambiental) foi obtida pela média das variáveis vulnerabilidade geológica, geomorfológica, pedológica, climatológica e de uso e ocupação da terra, segundo metodologia recomendada pela literatura especializada. A Sub-bacia dos Rios Mogi Guaçu e Pardo apresenta baixo grau de vulnerabilidade (grau 1,0) em praticamente metade do seu território (48%), indicando o predomínio dos processos pedogenéticos sobre os processos morfogenéticos (categoria morfodinâmica de estabilidade). Portanto, na busca por uma política preservacionista e conservacionista para a sub-bacia, necessário se faz adotar boas práticas de manejo, para que as áreas com grau 2,0 (equilíbrio entre pedogênese e morfogênese), correspondentes à maior parte do território (52%) não se tornem instáveis, com predomínio da morfogênese, prevalecente os processos erosivos.

Palavras-chave: Álgebra de mapas, desestabilização da paisagem, planejamento territorial, sistemas ambientais.

Environmental Vulnerability of the Sub-Basin of the Mogi Guaçu and Pardo Rivers - MG

ABSTRACT

Understanding environmental vulnerability is an extremely important means for the establishment of public policies for territorial planning and for the adoption of management practices for the correct use and occupation of land, enabling the minimization of environmental impacts and disasters. Thus, the objective of this article comprises the mapping of the environmental vulnerability of the Sub-basin of the Mogi Guaçu and Pardo Rivers, southern Minas Gerais. The methods used included geostatistical interpolations, digital image processing and map algebra. The vulnerability of the landscape unit (environmental vulnerability) was obtained by the average of the geological, geomorphological, pedological, climatological and land use and occupation vulnerability variables, according to the methodology recommended by the specialized literature. The Sub-basin of the Mogi Guaçu and Pardo Rivers presents a low degree of vulnerability (degree 1.0) in practically half of its territory (48%), indicating the predominance of pedogenetic processes over morphogenetic processes (morphodynamic stability category). Therefore, in the search for a preservation and conservation policy for the

sub-basin, it is necessary to adopt good management practices, so that areas with grade 2.0 (balance between pedogenesis and morphogenesis), corresponding to most of the territory (52 %) do not become unstable, with a predominance of morphogenesis, prevailing erosive processes.

Keywords: Map algebra, landscape destabilization, territorial planning, environmental systems.

Introdução

A degradação ambiental constitui um dos maiores problemas do século XXI, resultando em recorrentes desequilíbrios temporários ou permanentes e causando instabilidade no meio, o que ocasiona áreas cada vez mais vulneráveis e propiciam a geração de desastres naturais, com danos à saúde, bem-estar e segurança da população (Ross, 2012; Bandeira, Nunes e Lima, 2016; Sokoloski et al., 2019; Silva, Silva e Lima, 2020; Fiorese, 2020; Rosa e Ferreira, 2021). Desta forma, o entendimento da vulnerabilidade ambiental de uma paisagem compreende fator primordial para ocupá-la (a partir de empreendimentos urbanos ou rurais) ou explorá-la (extraíndo seus recursos minerais, hídricos ou vegetais) de forma sustentável.

Face ao exposto, a utilização de produtos de sensoriamento remoto e ferramentas de geoprocessamento, os sistemas de informações geográficas (SIG), possibilita uma análise integrada da paisagem, propiciando o processamento de variáveis ambientais e permitindo inúmeras aplicações tipológicas de modelagem ambiental (Nunes e Leite, 2017; Barbosa et al., 2020). Partindo desse pressuposto, a representação e delimitação da vulnerabilidade natural à perda do solo e alterações ambientais, se apresenta como uma relevante aplicação para compreensão de parâmetros geotécnicos e ambientais, fundamentais no processo de planejamento, execução, ocupação e gestão territorial de áreas urbanas brasileiras (Pavanin et al., 2016; Fiorese, 2020; Ferreira et al., 2020; Freitas et al., 2020; Belem e Cabral, 2021; Rosa e Ferreira, 2021).

Localizado na Mesorregião Sul de Minas Gerais e pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio Grande, a Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG possui uma população estimada de 378.631 mil habitantes e uma economia geral voltada para a cultura de morango, banana, café, bucha vegetal, feijão, batata, atividades agropastoris, artesanato e outros. Ademais, possuem vários pontos turísticos de beleza cênica como cachoeiras, pousadas, monumentos e atividades ecoturísticas.

Assim, o presente artigo tem como objetivo a determinação e análise do grau de vulnerabilidade ambiental da Bacia do Alto-Médio

Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG, com foco na relação entre morfogênese e pedogênese, por meio da integração entre os diagnósticos sobre geologia, geomorfologia, pedologia, climatologia e uso e ocupação da terra, de forma a subsidiar o planejamento e zoneamento ambiental e a gestão territorial.

Compreender as limitações e potencialidades dos complexos sistemas ambientais, a partir das categorias morfodinâmicas, possibilita a identificação e o mapeamento de diversas áreas estáveis e vulneráveis à degradação ambiental, fundamentais no processo de planejamento, zoneamento e gestão dos recursos naturais da Bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG.

Vulnerabilidade Ambiental

Ainda que tenha sido abordada em poucos estudos na década de 1970, a temática sobre diagnósticos relacionados à vulnerabilidade ambiental, dentro do âmbito das geotecnologias, começou a ganhar maior destaque no final dos anos de 1980 e início de 1990, sendo relativamente nova (Pavanin, Chuerubim e Lázaro, 2017). Atualmente, a ideia de vulnerabilidade é retratada em termos negativos, principalmente por não haver um consenso entre conceitos sobre risco e vulnerabilidade e em quais casos que se aplicam. Deste modo, de acordo com Aquino et al. (2017), ao passo que o termo risco ambiental está ligado à probabilidade de um evento de determinada magnitude ocorrer num sistema, perturbando assim o seu estado anterior, a vulnerabilidade ambiental corresponde ao grau em que um sistema natural é suscetível ou incapaz de suportar os efeitos das interações externas (antrópicas ou naturais). Nesse sentido, o termo vulnerabilidade corresponde ao “grau de suscetibilidade em que um componente do meio, de um conjunto de componentes ou de uma paisagem apresentam em resposta a uma ação, atividade ou fenômeno” (Santos, 2007, p. 179). Costa (2018) definiu vulnerabilidade ambiental como qualquer susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por qualquer tipo de uso antrópico. Ela está relacionada à susceptibilidade de uma área sofrer algum tipo de dano quando é submetida a uma ação, de forma que quanto maior o nível de vulnerabilidade, menor

será a chance de recuperação deste ambiente (Pagliarini, 2018).

Ressalta-se que, na geografia, os estudos de vulnerabilidade integram, na atualidade, abordagens quantitativas e qualitativas, baseadas em posturas analíticas (decompondo-se o sistema que está em tela e estimando-se seu potencial de sofrer danos) ou sistêmicas (avaliando-se a susceptibilidade de um sistema em seu conjunto) (Reis e Souza, 2019). Salienta-se, ainda, que a vulnerabilidade do solo à erosão pode ser indicada tanto por parâmetros físicos e químicos, como por processos biológicos e antropogênicos (Melo et al., 2019).

No que concerne ao sistema natural, Tricart (1977) define sistema como um conjunto de fenômenos que se processam mediante fluxos de matéria e energia. Esses fluxos originam relações de dependência mútua entre os fenômenos, originando uma entidade global nova, mas dinâmica (unidade ecodinâmica). Destarte, através dos conceitos da ecodinâmica, conseguiu-se elaborar cartas de vulnerabilidade natural à perda de solo, considerando as potencialidades dos estudos de campo, laboratoriais e do sensoriamento remoto (Crepani et al., 2001). Nesses estudos se faz necessário compreender as unidades territoriais básicas (UTB) que são células elementares de informação e análise para um zoneamento ecológico-econômico. Crepani et al. (2001) dividiram as unidades territoriais em unidades de paisagem natural e os polígonos de ação antrópica. As unidades de paisagem natural representam uma porção do terreno, no qual os eventos e interações visíveis e invisíveis se combinam e se fazem necessárias análises com objetivo de conhecer sua gênese, constituição física, estágio de evolução e cobertura vegetal sobre ela. Os polígonos de intervenção antrópica representam a atuação humana que modifica as condições naturais. Deste modo, as condições de equilíbrio do sistema representado pela unidade de paisagem natural se alteram numa escala variável, de acordo com a introdução de novas forças desenvolvidas no polígono de ação antrópica.

Logo, através da caracterização das unidades territoriais básicas, Crepani et al. (2001) estabeleceram três categorias de vulnerabilidade, com seus respectivos graus: estável (grau 1), intermediária (grau 2) e instável (grau 3). No grau 1, categoria morfodinâmica de estabilidade, há a predominância dos processos pedogenéticos sobre os morfogenéticos. No grau 2, categoria intermediária, ocorre um equilíbrio entre pedogênese e morfogênese e, no 3, correspondente

à categoria de instabilidade, prevalecendo os processos morfogenéticos.

Os mapas de vulnerabilidade natural à perda de solo são elementos primordiais não somente no processo de planejamento e gestão ambiental, mas também no zoneamento ecológico e econômico do território (Crepani et al., 2001). Acrescenta-se que o modelo de vulnerabilidade ambiental, serve como uma previsão das áreas mais ou menos suscetíveis aos impactos ambientais presentes na área, considerando o uso e ocupação da terra por determinada sociedade (Belem e Cabral, 2021).

Para a Sub-bacia do Alto Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG, os estudos de vulnerabilidade ambiental permitem avaliar o comportamento dos sistemas ambientais face às pressões oriundas de intervenções antrópicas e servem de base para tomadas de decisões quanto ao uso e ocupação da terra.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo, localizada no Sul de Minas Gerais e integrante da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG), abrange 21 municípios mineiros (Figura 1). Ela compreende uma área de drenagem de 35.742 quilômetros quadrados, sendo 17% em Minas Gerais e 83% em São Paulo. Seu clima é considerado úmido, com média de um a dois meses de seca por ano, e disponibilidade hídrica acima de 20 litros por segundo por quilômetro quadrado.

As paisagens naturais da Sub-bacia Hidrográfica do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG, herança de processos fisiográficos e biológicos pretéritos e importantes patrimônios coletivos difusos (Ab'Sáber, 2003), vêm se constituindo, *praemissa venia*, desde o final do Cretáceo, quando o território brasileiro experimentou longa estabilidade tectônica, permitindo o estabelecimento de vastas superfícies geomórficas e a consolidação dos sistemas hidrológicos, e propiciando condições ideais para as formações das primeiras classes pedológicas, datadas do Terciário. No entanto, estas paisagens, “heranças de processos de atuação antiga, remodelados e modificados por processos de atuação recente” (Ab’ Sáber, 2003, p. 9) vem se tornando cada vez mais vulneráveis, devido às ações antrópicas, com intervenções pouco planejadas no processo de uso e ocupação da bacia.

Referente à geologia, a Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo, na sua porção

mineira, possui litologias representadas em sua maior parte por rochas ígneas e metamórficas, com idades arqueanas, proterozóicas, mesozóicas e cenozóicas (Figura 2). A maior parte do território sul mineiro, região onde se situa a Bacia do Alto-Médio Rio Mogi Guaçu, se encontra em formações geológicas resultantes de dobramentos antigos ocorridos no Brasil. Contudo, as formas das estruturas geológicas são resultantes da atuação de agentes externos e mais recentes (Terciário e Quaternário).

A geomorfologia da bacia é constituída por domínios morfoesculturais de patamares, planícies, planaltos e serras, modeladas sobre unidades

morfoestruturais arqueanas e proterozóicas. Os planaltos e, sobretudo, a serras são constituídas pelos relevos de morros (Ab' Saber, 2003), compreendendo os mares de morros, morros paralelos e morros com serras restritas. Localmente, em nível de mesoforma ou morfológico, percebe-se que o relevo se constitui, de certa forma, pelas unidades de mares de morros, com modelado de vertentes côncavas e vales encaixados, intercalados com planícies fluviais (Souza e Silva, 2016), resultantes de processos de dissecação.

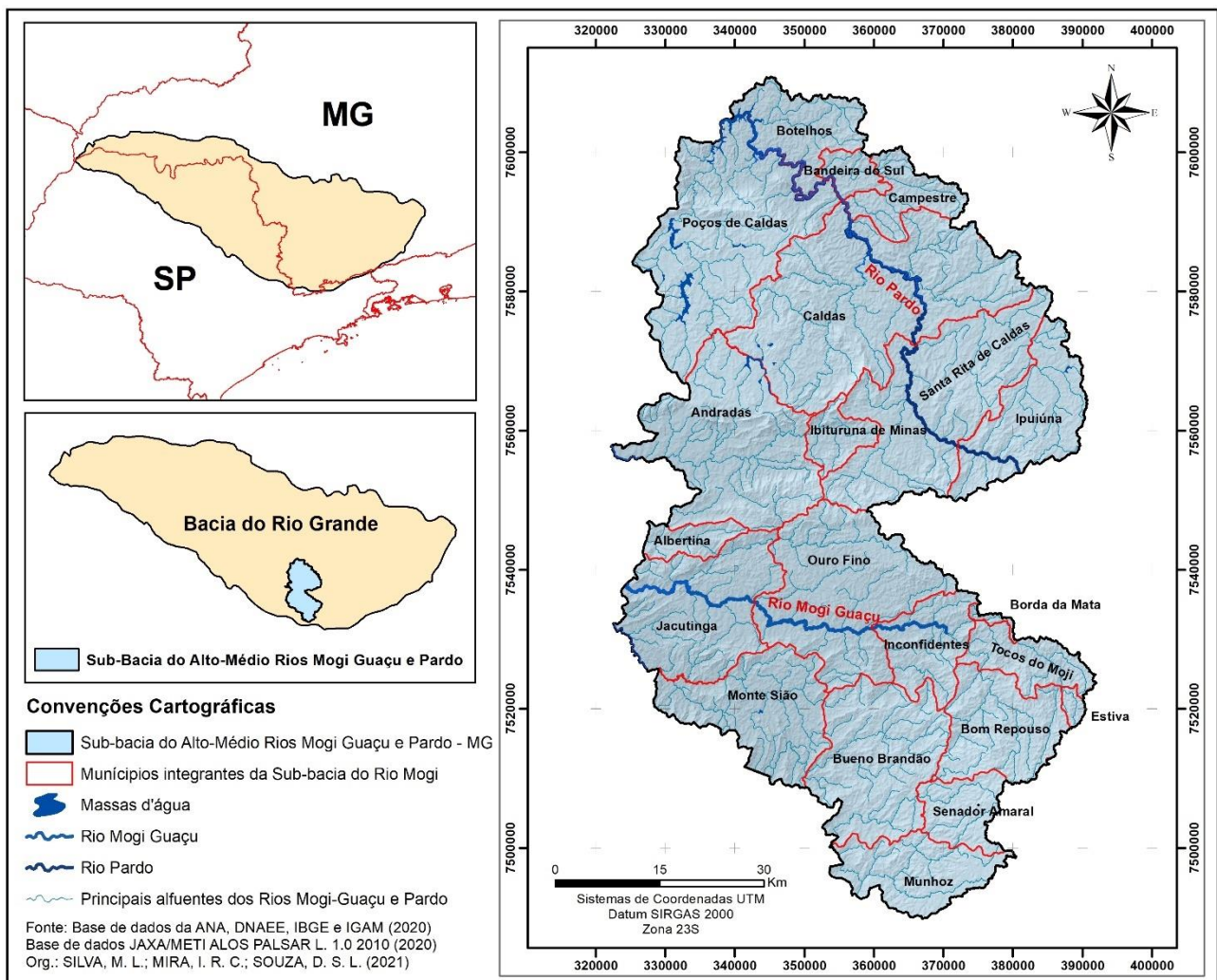


Figura 1. Municípios e rede de drenagem da Sub-bacia Hidrográfica do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG.

Os sistemas hidrológicos são representados por cursos d'água e rede de drenagem oriundos da Bacia do Rio Grande, que possui os rios Grande, Mogi Guaçu, Pardo, Sapucaí e Sapucaí-Mirim como os principais canais fluviais. A morfologia dos principais canais fluviais da Sub-bacia é retilínea a meandrante, com

porções anastomosadas, com padrão de drenagem predominante dendrítico (Figuras 1 e 3).

A maioria das coberturas superficiais são representadas pelos Latossolos, Cambissolos e Argissolos (Figura 7). Quanto aos Latossolos, que correspondem a 2.239,350 km² e representam 43% da bacia, há o predomínio dos Latossolos

Vermelhos e Vermelho-Amarelos, ambos distróficos (Figura 7).

Aquisição e tratamento de dados

Para elaboração dos mapas-base de vulnerabilidade ambiental foram utilizadas imagens de radar *Alos Palsar*, imagens do Satélite *Sentinel-2*, além da base de dados da ANA, IBGE, CODEMGE, CPRM, DNAEE, INMET, GMES e JAXA/METI, UFV.

Geologia

Na Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG, as unidades litoestratigráficas foram obtidas a partir do mapeamento geológico do Estado de Minas Gerais, em escala de 1:100.000, realizado em 2014 pela CODEMGE.

A definição dos graus de vulnerabilidade ambiental para as unidades litoestratigráficas seguiu à metodologia sugerida por Crepani et al. (2001), que determina graus variando de 1,0 a 3,0. Segundo Crepani et al. (2001) o grau de coesão litológica constitui informação fundamental, uma vez que em rochas pouco coesas podem prevalecer os processos erosivos, modificadores das formas de relevo (morfogênese), enquanto que nas rochas bastante coesas devem prevalecer os processos de intemperismo e formação de solos (pedogênese).

Geomorfologia

A definição da vulnerabilidade para a categoria geomorfologia seguiu a proposição de Crepani et al. (2001), que considera a média entre as variáveis declividade, amplitude altimétrica e grau de dissecação. Foi utilizado a álgebra de mapas (função *raster calculator*), após a definição dos pesos de cada categoria (função *reclassify*). Anteriormente a este procedimento, todos os arquivos no formato vetor foram convertidos em arquivos matricial ou raster (função de rasterização *feature to raster*). Dessa forma, a vulnerabilidade geomorfológica (R) foi calculada pela seguinte equação:

$$R = (D + A + I) / 3^{(1)}$$

Em que:

R = Vulnerabilidade geomorfológica;

D = Vulnerabilidade atribuída à declividade;

A = Vulnerabilidade atribuída à amplitude altimétrica (grau de entalhamento do vale ou aprofundamento da dissecação);

I = Vulnerabilidade atribuída ao grau de dissecação (dimensão interfluvial ou densidade de drenagem);

As classes de declividade (D), que se refere à inclinação do relevo em relação ao horizonte, com os respectivos graus de vulnerabilidade foram definidas de acordo com a metodologia proposta por Crepani et al. (2001), a partir de imagens de radar *Alos Palsar*, banda L, modo FBS, polarização HH, órbita 27350 e quadro 28, com resolução espacial de 12,7 metros, de 2010, adquirida da base de dados *ASF Data Search*. As imagens de radar também serviram de base para determinação da hipsometria. Para a determinação das classes clinográficas foi utilizada a função *slope* da aba *Surface* do *ArcGIS*. Posteriormente, foi aplicado o método de reamostragem convolução cúbica para os pixels.

O índice de dissecação do relevo, que define a amplitude altimétrica (A) e os graus de dissecação (I), foi determinado segundo a metodologia preconizada por Ross (2012) e Guimarães et al. (2017), utilizando, conjuntamente, os softwares *ArcGIS* e *QGIS*. A amplitude altimétrica (ou grau de entalhamento do vale) pode ser obtida pelo cálculo da diferença entre as cotas máxima e mínima contidas na unidade de paisagem natural. Contudo, em imagens de radar, o grau de entalhamento de cada pixel é a diferença altimétrica entre a superfície de referência e o valor de cada pixel (Guimarães et al., 2017). A dimensão interfluvial média (graus de dissecação ou densidade de drenagem) de cada bacia, de acordo com Guimarães et al. (2017), é calculada a partir da distância euclidiana média entre seus divisores de água.

Pedologia

O mapa pedológico e as devidas análises químicas e granulométricas dos horizontes de solos foram obtidos a partir de Souza e Silva (2016), considerando a metodologia de Santos et al. (2015).

A definição dos graus de vulnerabilidade para o mapa pedológico baseou-se na metodologia prescrita por Crepani et al. (2001).

Climatologia

As séries históricas empregadas foram obtidas a partir da base de dados do INMET e CPRM, gerenciadas pela ANA. Para as interpolações geoestatísticas foram consideradas as taxas de precipitação média anual das normais climatológicas, com séries históricas superiores ao recomendado pela Organização Meteorológica Mundial.

A interpolação geoestatística para a estimativa das taxas de precipitação média anual

foi realizada através do *ArcGIS*, pelo método de ponderação do inverso da distância (IDW).

Os graus de vulnerabilidade ambiental da variável precipitação pluviométrica se basearam no método preconizado por Crepani et al. (2001).

Uso e ocupação da terra

A elaboração do mapa de uso e ocupação da terra se deu pela utilização de imagens ortorretificadas e com correção no topo da atmosfera do Satélite *Sentinel-2* no nível 1C, com resolução espacial de 20 metros e temporal de 5 dias, adquiridas em 5 de janeiro de 2021 (L1C T23KLS N0209 20200913T164156 e L1C T23KLR N0209 20200913T164156). As imagens são produtos do programa *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) ou programa de monitoramento global da segurança ambiental, uma iniciativa conjunta da Comissão Europeia (CE) e da Agência Espacial Europeia (ESA).

Posteriormente às correções, elaborou-se a composição das bandas B11 (*SWIR 1*), B8A (*Red Edge 4*) e B04 (*Red*), para análise de vegetação. A opção pela composição de análise de vegetação se justifica pelo fato de atender aos objetivos de processamento digital de imagens, que reside na identificação e quantificação das áreas urbanas e com solo exposto, vegetação nativa e plantada, culturas diversas, pastagens, gramíneas e recurso hídricos.

Destarte, definiu-se 5 classes: áreas urbanas com solo exposto (classe 1), gramíneas e pastagens (classe 2), vegetação nativa (classe 3), culturas diversas (classe 4) e recursos hídricos (classe 5).

As amostragens realizadas foram realizadas por regiões e por pixels: 25 amostras para classe 1, 27 para a classe 2, 23 para a classe 3, 27 para a classe 4 e 11 para a classe 5.

Utilizou-se a técnica estatística multivariada *Maxver* (máxima verossimilhança ou *Maximum Likelihood*) para classificação supervisionada, através da *Spatial Analyst Tools* do *ArcGIS*, com uma rejeição de frações de 0,9.

Além da verificação em campo, a classificação passou pelo filtro majoritário do *ArcGIS*, através da *Spatial Analyst Tools*, com

kernel de 8 vizinhos (criando uma matriz 3x3) e considerando metade das células com o mesmo valor de pixel.

As cinco classes de uso e ocupação da terra foram vetorizadas e individualizadas a partir da opção *Convert Tools* do *ArcGIS*.

A definição dos graus de vulnerabilidade para o uso e ocupação da terra se fundamentou na metodologia recomendada por Crepani et al. (2001).

Vulnerabilidade Ambiental

Para o cálculo da vulnerabilidade ambiental (V) também foi utilizado a álgebra de mapas (função *raster calculator*), após a definição dos pesos de cada categoria (função *reclassify*), segundo a metodologia de Crepani et al. (2001). Os autores utilizam as variáveis geologia, geomorfologia, solos, clima, vegetação e uso da terra (uso e ocupação da terra) para definição da unidade de paisagem ou unidade territorial básica (UTB) na escala de vulnerabilidade à perda de solo. Seguindo a metodologia proposta, a vulnerabilidade ambiental foi determinada pela seguinte equação, em que o mapa de vulnerabilidade à perda de solo das unidades de paisagem é gerado pela média aritmética dos valores individuais de cada tema ou variável:

$$V = (G + R + P + C + UO) / 5^{(2)}$$

Em que:

V = Vulnerabilidade da unidade de paisagem

G = Vulnerabilidade geológica

R = Vulnerabilidade geomorfológica

P = Vulnerabilidade pedológica

C = Vulnerabilidade climatológica

UO = Vulnerabilidade para o uso e ocupação da terra

Dentro da escala de vulnerabilidade as unidades apresentam valores de 1,0 a 3,0 (Tabela 1): valores próximos a 1,0 representam as unidades com maior estabilidade, valores ao redor de 2,0 representam unidade com estabilidade intermediária e próximos a 3,0 indicam unidades territoriais básicas (UTB) mais vulneráveis.

Tabela 1. Avaliação da estabilidade das categorias morfodinâmicas

Categoria Morfodinâmica	Relação Morfogênese-Pedogênese	Valor
Estável	Prevalece a pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio pedogênese/morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a morfogênese	3,0

Fonte: Tricart (1977) e Crepani et al. (2001).

Portanto, a avaliação do modelo, de forma relativa e empírica, do estágio de evolução morfodinâmica da unidade de paisagem, dá-se pelas categorias estável, intermediária e instável (Crepani et al., 2001). Essas categorias morfodinâmicas foram estabelecidas por Tricart (1977): nos meios estáveis prevalecem cobertura vegetal densa, dissecação moderada e ausência de manifestações vulcânicas; nos meio integrados (intermediários) ocorrem um equilíbrio entre as interferências morfogenéticas e pedogenéticas; e nos meio fortemente instáveis se identificam condições bioclimáticas agressivas (com ocorrências de variações fortes e irregulares de ventos e chuvas), relevo com vigorosa dissecação, presença de solos rasos, inexistência de cobertura vegetal densa, planícies e fundos de vales sujeitos a inundações e geodinâmica interna intensa.

Resultados e discussão

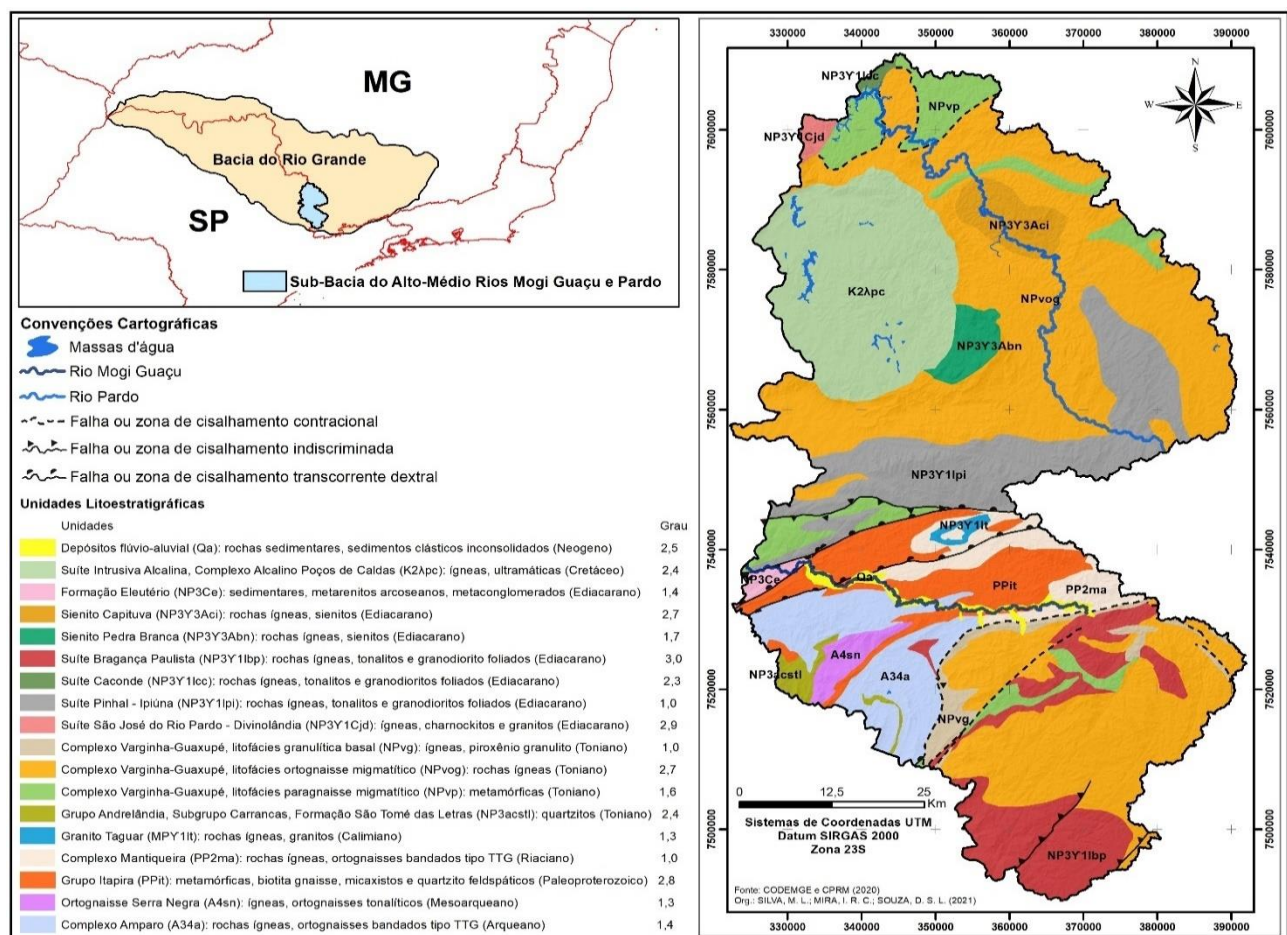


Figura 2. Vulnerabilidade ambiental para as unidades geológicas.

Os Depósitos flúvio-aluviais, única unidade do Neógeno, abrange rochas sedimentares e sedimentos clásticos inconsolidados.

Vulnerabilidade geológica

Na Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG, foram identificadas 18 unidades litoestratigráficas (Figura 2, Tabela 2). O Complexo Amparo (Arqueano) e o Complexo da Mantiqueira (Riaciano) apresentam rochas ígneas e ortogneisses bandados tipo TTG. O Ortogneisse Serra Negra (datado do Mesoarqueano) apresenta rochas ígneas e ortogneisses tonalíticos. O Grupo Itapira (Paleoproterozoico) possui rochas metamórficas, biotita gnaiss, micaxistos e quartzito feldspáticos. O Granito Taguar (datado do Calimiano), contém rochas ígneas e granitos. O Grupo Andrelândia (Toniano), possuem quartzitos como principais litotipos. Identificou-se três unidades do Complexo Varginha Guaxupé, todos datados do Toniano e unidades de Suites. A Formação Eleutério (Ediacarano) possui rochas sedimentares, metarenitos arcoseanos e metaconglomerados.

(Tabela 2). Os Depósitos flúvio-aluvial apresentou grau 2,5. As Suítes em suas variedades apresentaram graus 2,4 (K2λpc), 3,0 (NP3Y1lbp), 2,3 (NP3Y1lcc), 1,0 (NP3Y1lpi) e 2,9 (NP3Y1Cjd). A Formação Eleutério apresentou grau 1,4. Os Sienitos em suas variedades apresentaram graus 2,7 (NP3Y3Aci) e 1,7 (NP3Y3Abn). Os complexos em sua pluralidade apresentaram os seguintes graus 1,0 (NPvg), 2,7 (NPvog), 1,6 (NPvp), 1,0 (PP2ma) e 1,4 (A34a). Os Grupos Andreândia e Itapira apresentaram, respectivamente, graus 2,4 e 2,8. O Granito Taguar e o Ortognaisse Serra Negra apresentaram graus 1,3.

Aproximadamente 30% das unidades geológicas foram classificadas, quanto à categoria, como estáveis. Porém, 70% se apresentaram como vulneráveis. Deste modo, como o complexo Varginha-Guaxupé (NPvog) representa a maior parte da Sub-bacia, é uma variável extremamente importante na definição da vulnerabilidade ambiental da Sub-bacia, principalmente por ser classificada como vulnerável de acordo com a metodologia proposta (Crepani et al., 2001).

Os dados geológicos, sobretudo, a composição, a textura e estruturas litológicas, são fundamentais para se entender a dinâmica dos sistemas ambientais, pois facultam o melhor entendimento da relação entre rocha, relevo, solo e clima, elementos integrantes da metodologia de vulnerabilidade natural. Rochas muito coesas e resistentes ao intemperismo e aos processos erosivos são mais estáveis, o que confere maior equilíbrio aos sistemas naturais. Segundo Crepani et al. (2001) a contribuição da geologia para a análise e definição da categoria morfodinâmica da unidade de paisagem natural (UTB) compreende as informações relativas à história da evolução geológica do ambiente onde a unidade se encontra e as informações relativas ao grau de coesão das rochas que a compõem. “Por grau de coesão das rochas entende-se a intensidade da ligação entre os minerais ou partículas que as constituem” (Crepani et al., 2001, p. 32). Em rochas bastante coesas prevalecem os processos de intemperismo e formação de solos (pedogênese), ao passo que rochas pouco coesas a morfogênese possui primazia (Crepani et al., 2001).

Tabela 2. Vulnerabilidade das unidades litoestratigráficas da Sub-bacia do Alto Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG

Unidade Litoestratigráfica	Sigla	Vulnerabilidade
Depósitos flúvio-aluvial	Qa	2,5
Suíte Intrusiva Alcalina	K2λpc	2,4
Formação Eleutério	NP3Ce	1,4
Sienito Capituva	NP3Y3Aci	2,7
Sienito Pedra Branca	NP3Y3Abn	1,7
Suíte Bragança Paulista	NP3Y1lbp	3,0
Suíte Caconde	NP3Y1lcc	2,3
Suíte Pinhal	NP3Y1lpi	1,0
Suíte São José do Rio Pardo	NP3Y1Cjd	2,9
Complexo Varginha-Guaxupé	NPvg	1,0
Complexo Varginha-Guaxupé	NPvog	2,7
Complexo Varginha-Guaxupé	NPvp	1,6
Grupo Andreândia	NP3acstl	2,4
Granito Taguar	MPY1lt	1,3
Complexo Mantiqueira	PP2ma	1,0
Grupo Itapira	PPit	2,8
Ortognaisse Serra Negra	A4sn	1,3
Complexo Amparo	A34a	1,4

Fonte: adaptado de Crepani et al. (2001) e Guirra (2017).

Vulnerabilidade geomorfológica

Uma importante variável geomorfológica para a determinação da vulnerabilidade ambiental é a declividade (Figura 3). As maiores porções da

Sub-bacia do Alto Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo, em Minas Gerais, apresentaram graus de vulnerabilidade variando entre 1,0 e 2,0 (Figura 3).

Segundo Crepani et al. (2001) a declividade está relacionada, diretamente, com a transformação de energia potencial em energia cinética, resultando em escoamento superficiais (“*runoff*”) ou enxurradas. “Quanto maior a declividade mais rapidamente a energia potencial das águas pluviais transforma-se em energia cinética e maior é, também, a velocidade das massas de água e sua capacidade de transporte, responsáveis pela erosão que esculpe as formas de relevo, prevalecendo a morfogênese” (Crepani et al., 2001, p.75).

Não obstante, a vulnerabilidade geomorfológica, segundo a metodologia preconizada por Crepani et al. (2001), corresponde a uma resultante entre a declividade (Figura 3), a dimensão interfluvial (Figura 4) e o grau de entalhamento do vale (Figura 5). Para isso, foi necessária uma reclassificação das classes de declividade, para atender às exigências metodológicas proposta por Crepani et al. (2001) (Figura 3).

O mapa de vulnerabilidade atribuída à amplitude altimétrica, grau de entalhamento do vale ou aprofundamento da dissecação apresentou graus entre 1,0 a 2,5 (Figura 4). A amplitude altimétrica, relacionada com o aprofundamento da dissecação, se define como um indicador da energia potencial disponível para o *runoff* (Crepani et al., 2001).

O mapa de vulnerabilidade do grau de dissecação (dimensão interfluvial ou densidade de drenagem) apresentou grau variando entre 1,0 a 2,8 (Figura 5). De acordo com Crepani et al. (2001) a intensidade de dissecação do relevo pela drenagem está diretamente relacionada à permeabilidade do solo e da rocha.

Em se tratando da vulnerabilidade geomorfológica da Sub-bacia, a maior parte do território apresentou grau 1,0 (estável), havendo predomínio de processos pedogenéticos sobre os processos morfogenéticos (Figura 6). Contudo, as porções simultaneamente mais íngremes e altas, apresentaram grau 3,0 (indicativo de instabilidade da paisagem).

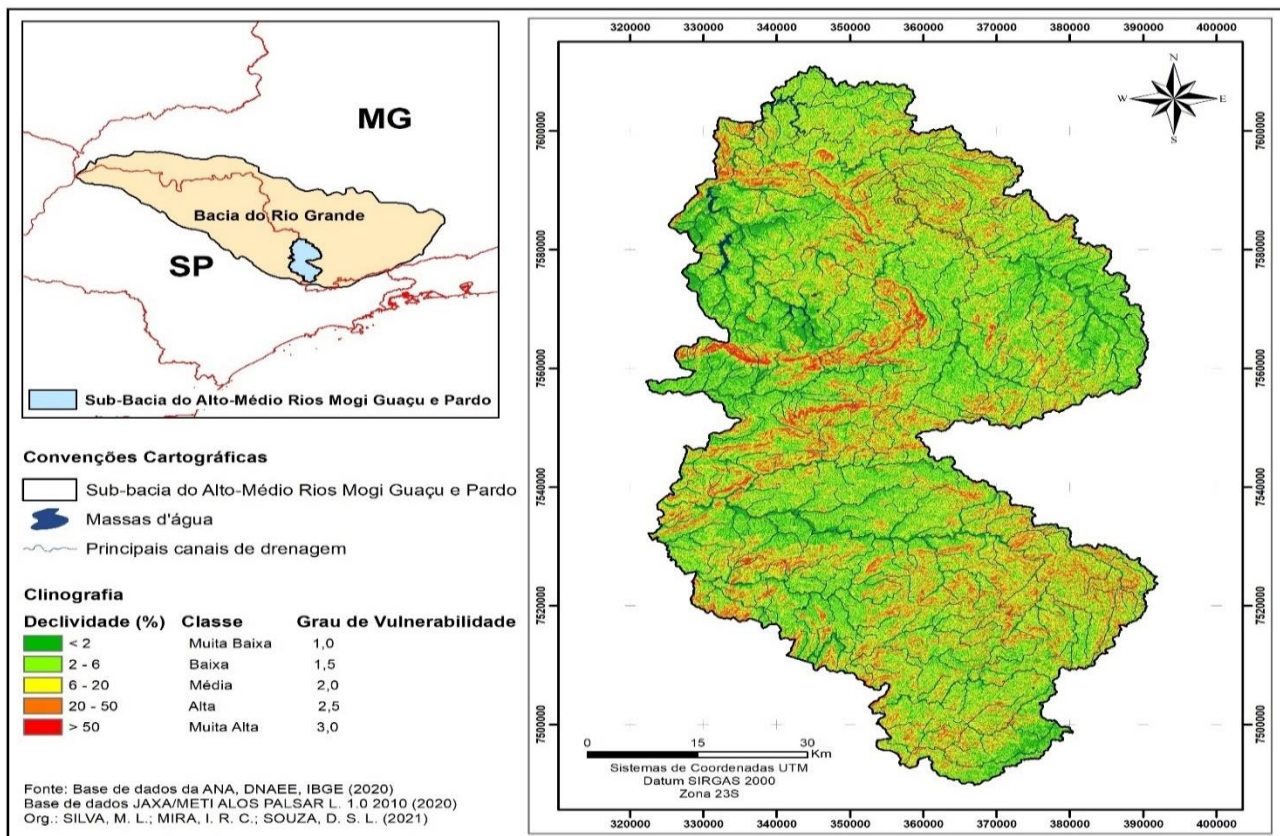


Figura 3. Vulnerabilidade ambiental para as classes de declividade.

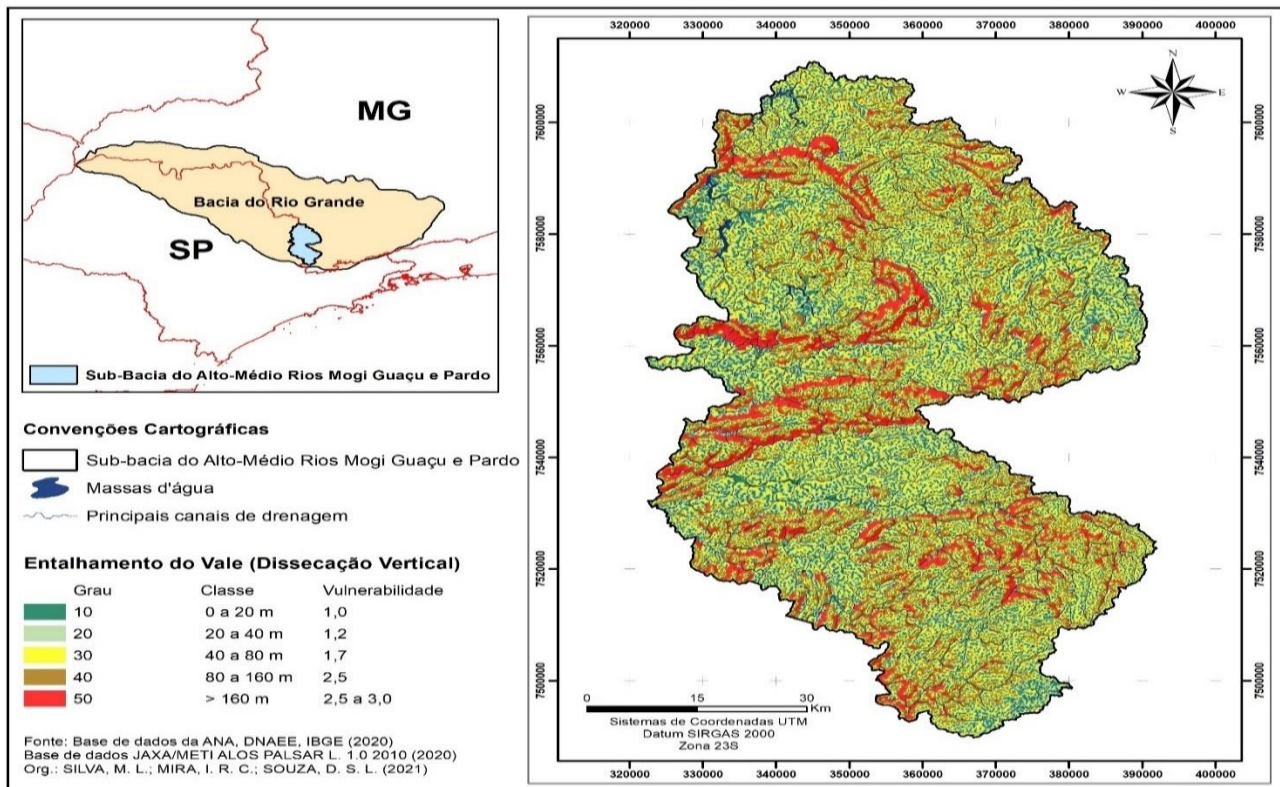


Figura 4. Mapa do grau de entalhamento do vale (amplitude altimétrica).

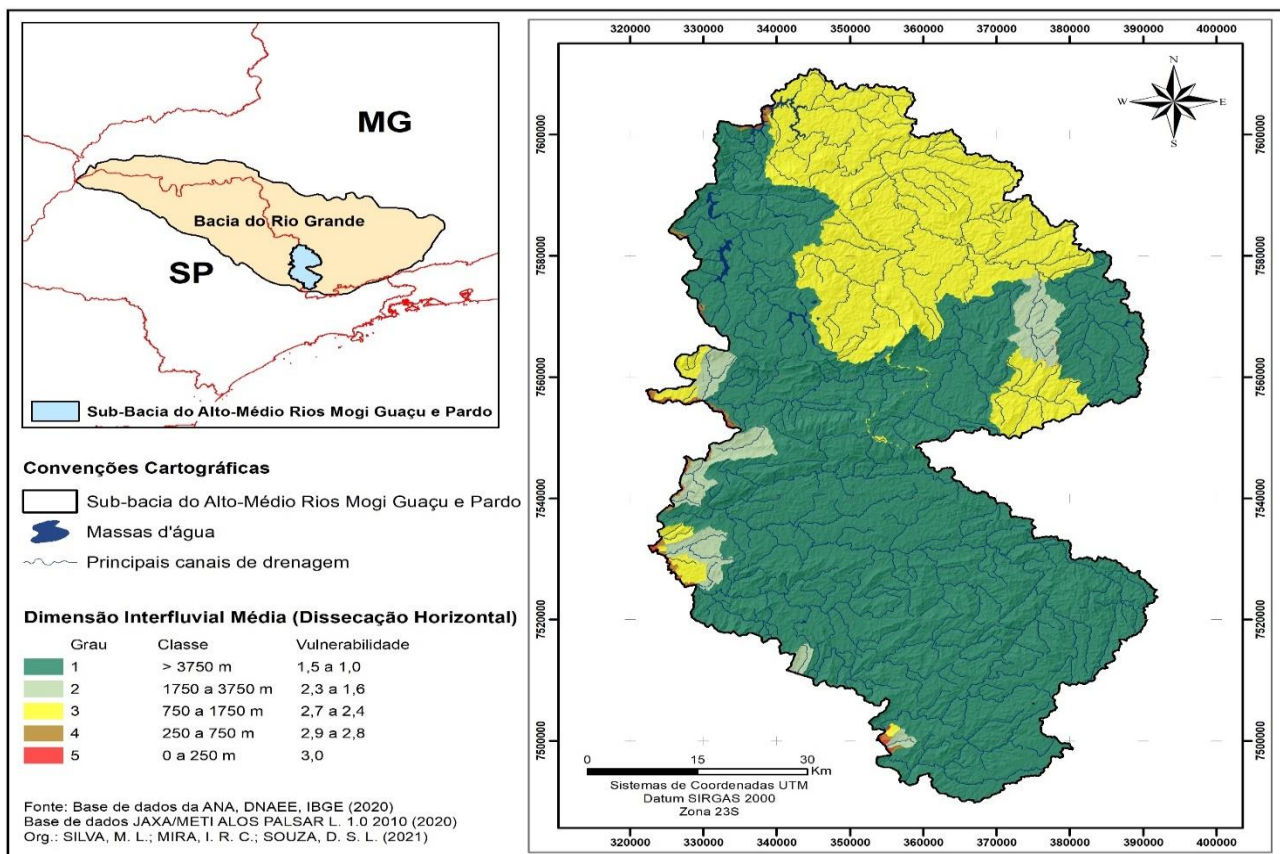


Figura 5. Mapa da dimensão interfluvial média (densidade de drenagem).

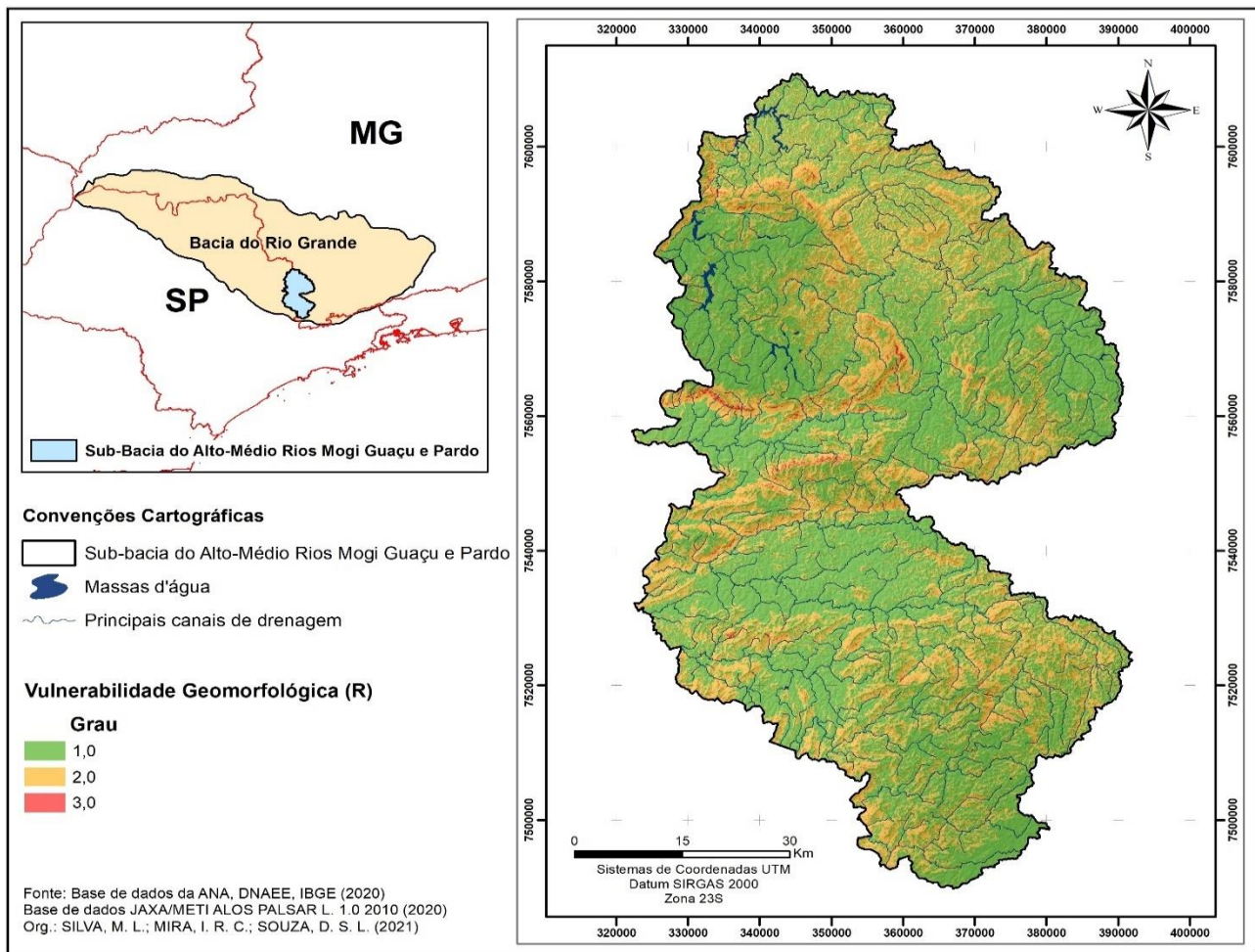


Figura 6. Vulnerabilidade geomorfológica.

Vulnerabilidade pedológica

Em relação à pedologia, a Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo apresenta-se com 9 classes de solos (Figura 7): Cambissolos Húmidos distróficos (CHd), Cambissolos Háplicos distróficos (CXbd), Latossolos Vermelho-Amarelo distróficos (LVAd), Latossolos Vermelhos distróficos (LVd), Nitossolos Háplicos distrófico (NXd), Argissolos Vermelho-Amarelo distróficos

(PVAd), Argissolos Vermelhos distróficos (PVd) e Neossolos Litólicos distróficos (RLd).

As classes de Cambissolos apresentaram grau 2,5, as de Latossolos, grau 1,0 e as de Nitossolos e Argissolos, 2,0 (Tabela 3). Os Neossolos Litólicos distróficos (RLd) apresentou grau 3,0, sendo considerada a classe mais instável (vulnerável). As ordens de Latossolos, que cobrem a maior porção da sub-bacia, foram as que apresentaram maior estabilidade.

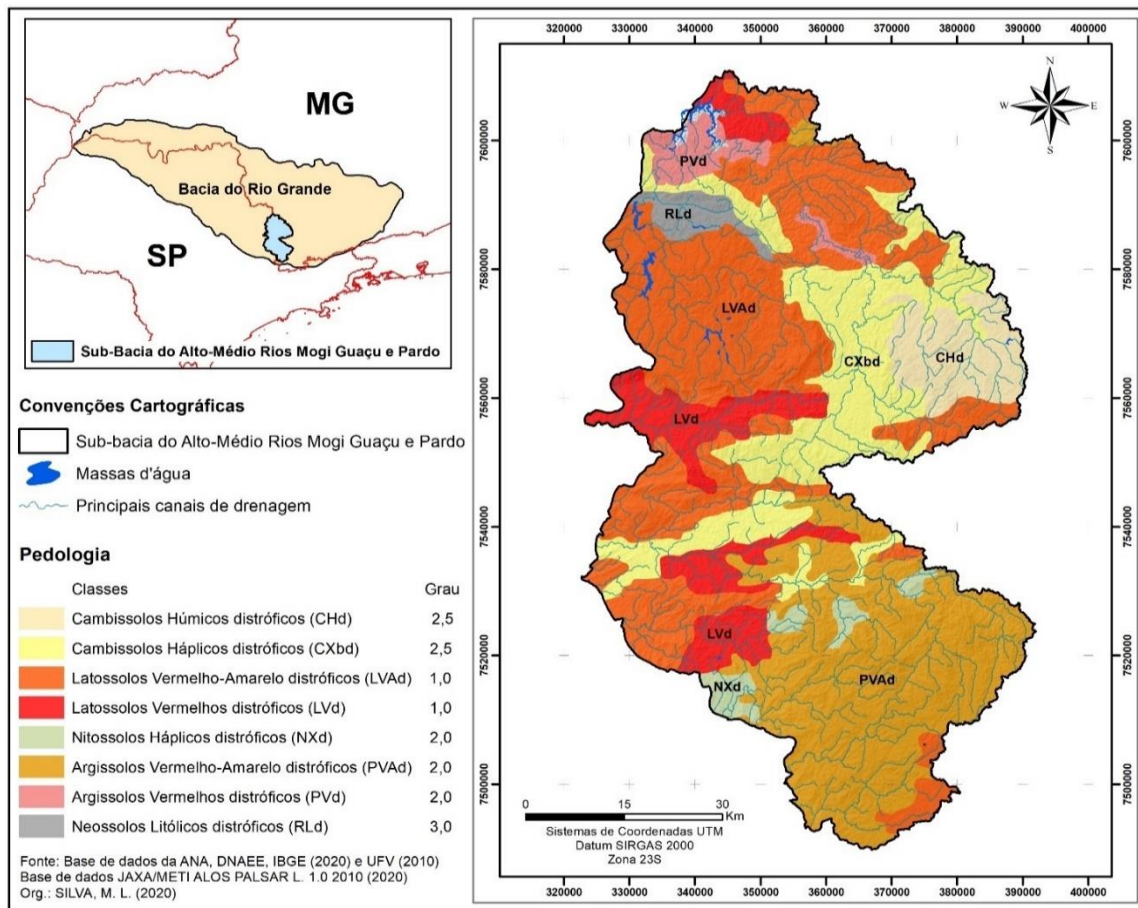


Figura 7. Principais classes de solos da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG.

Tabela 3. Vulnerabilidade das classes pedológicas da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG

Solos	Sigla	GV
Cambissolos Húmicos distróficos	CHd	2,5
Cambissolos Háplicos distróficos	CXbd	2,5
Latosolos Vermelho-Amarelo distróficos	LVAd	1,0
Latosolos Vermelhos distróficos	LVd	1,0
Nitossolos Háplicos distróficos	NXd	2,0
Argissolos Vermelho-Amarelo distróficos	PVAd	2,0
Argissolos Vermelhos distróficos	PVd	2,0
Neossolos Litólicos distróficos	RLd	3,0

GV: Grau de Vulnerabilidade

Fonte: adaptado de Crepani et al. (2001)

Os solos, como sistemas abertos e reflexos das interações entre os elementos do meio, além de propiciar o desenvolvimento das atividades produtivas, são excelentes indicadores da instabilidade ou estabilidade dos sistemas ambientais. Considerado passivo em relação ao fator climático, a categoria constitui importante variável na definição dos graus de vulnerabilidade e estabilidade dos sistemas ambientais (Crepani et

al., 2001; Rovani et al., 2015; Lima e Silva, 2018; Santos e Martins, 2018; Leal et al., 2019).

Vulnerabilidade climatológica

O mapa pluviométrico (Figura 8) foi desenvolvido através da análise de parâmetros coletados em bases de órgãos públicos e estações pluviométricas situadas nos 20 principais municípios da Sub-bacia (Figura 8, Tabela 4). Utilizou-se de interpolações geoestatísticas tendo

como base a taxa de precipitação média anual das normais climatológicas e suas respectivas séries históricas de cada município.

Os fatores climáticos, para vulnerabilidade ambiental, representam o potencial da chuva em remover o solo pela erosão hídrica, ou seja, a intensidade pluviométrica (Lima e Silva, 2018).

Segundo Lima e Silva (2018) o fator climático considerado para a vulnerabilidade natural representa o potencial da chuva em remover o solo pela erosão hídrica, ou seja, a intensidade pluviométrica. Dessa forma, ela representa uma relação entre o quanto choveu e quando choveu (Lima e Silva, 2018). O impacto direto das gotas e o escoamento superficial do excesso de água da chuva (*runoff*) constituem os agentes ativos da erosão hídrica, ao passo que o solo corresponde ao agente passivo (Crepani et al., 2001; Lima e Silva,

2018). O impacto direto das gotas e o escoamento superficial do excesso de água da chuva (*runoff*) constituem os agentes ativos da erosão hídrica, ao passo que o solo corresponde ao agente passivo (Crepani et al., 2001; Lima e Silva, 2018).

A precipitação média anual, para o período de 1961 a 2010, foi de 1.475 mm/ano (Tabela 4) que, segundo a classificação preconizada por Crepani et al. (2001), possui classe estável, com grau 1,3 de vulnerabilidade, típica de ambientes sob clima tropical, com estações chuvosas bem definidas.

As precipitações médias anuais de cada município, para o período de 1961 a 2010 (Tabela 4), foram classificadas através de parâmetros estabelecidos por Crepani et al. (2001), possuindo classe estável em todos os municípios da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG.

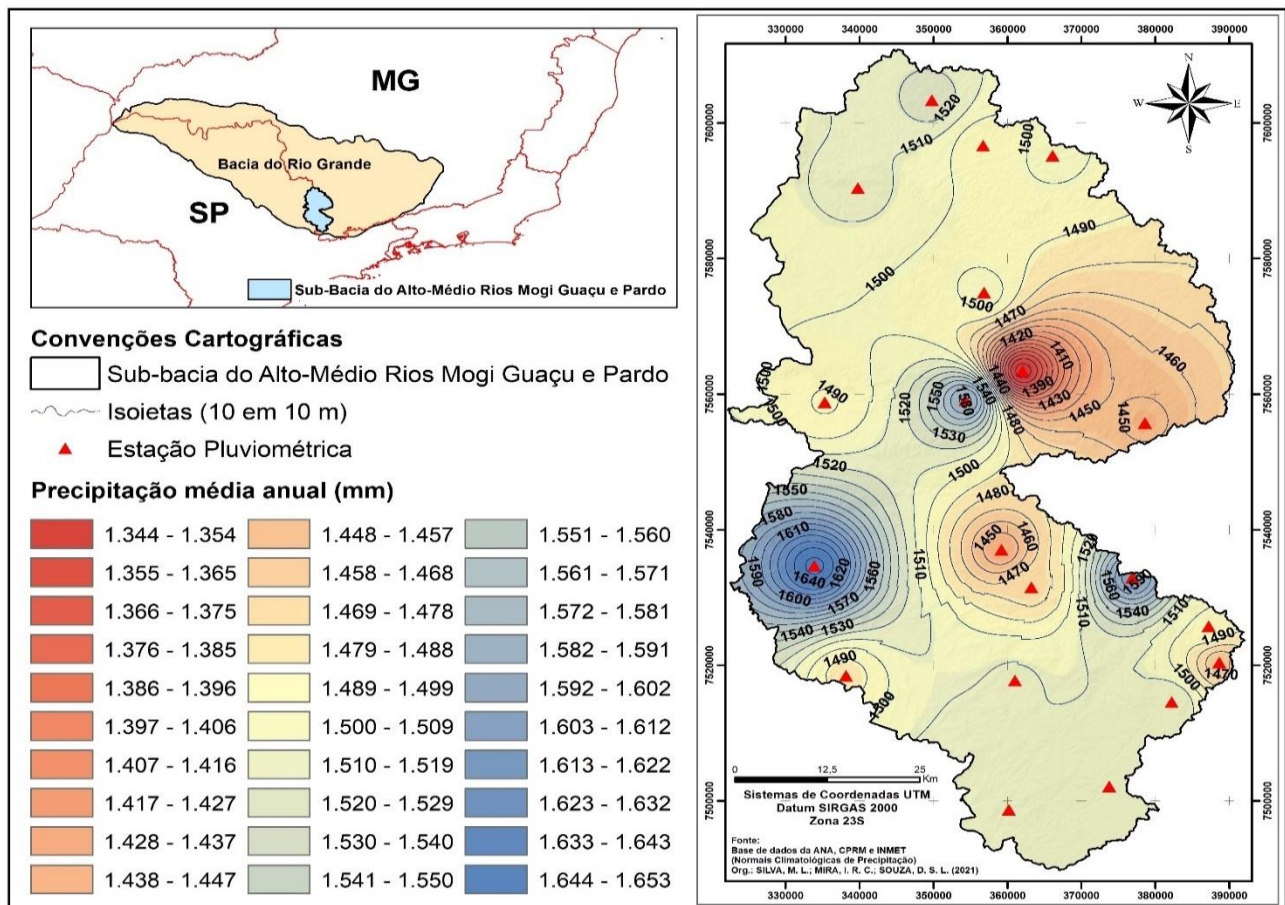


Figura 8. Mapa de precipitação média anual e de isoietas.

Tabela 4. Vulnerabilidade para a precipitação pluviométrica dos principais municípios integrantes da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG

Municípios	Precipitação (mm/ano)	Classe de Vulnerabilidade	Grau de Vulnerabilidade
Andradas	1489	Estável	1,3
Bandeira do Sul	1492,5	Estável	1,3

Bom Repouso	1518,1	Estável	1,4
Borda da Mata	1597,1	Estável	1,4
Botelhos	1526,5	Estável	1,4
Bueno Brandao	1511,6	Estável	1,4
Caldas	1505,1	Estável	1,4
Campestre	1502,3	Estável	1,4
Estiva	1461,6	Estável	1,4
Ibituruna de Minas	1582,6	Estável	1,4
Inconfidentes	1474,7	Estável	1,3
Ipuina	1445,9	Estável	1,3
Jacutinga	1653	Estável	1,4
Monte Sião	1484,8	Estável	1,3
Munhoz	1514,2	Estável	1,4
Ouro Fino	1440,4	Estável	1,3
Poços de Caldas	1513,6	Estável	1,4
Santa Rita de Caldas	1344,2	Estável	1,3
Senador Amaral	1518	Estável	1,4
Tocos do Moji	1499,2	Estável	1,3

Fonte: adaptado de Crepani et al. (2001)

Em regra, a disponibilidade hídrica na Sub-bacia é alta, com maiores volumes de chuva nos períodos de verão.

Vulnerabilidade do uso e ocupação da terra

Definiu-se 5 classes de uso e ocupação da terra e cobertura vegetal para a Sub-bacia do Alto Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG (Figura 9). A maior parte do território da sub-bacia é ocupado por culturas diversas (30,6% do território total), seguido por áreas urbanas e com solo exposto (29,6%) (Tabela 5). Isso reflete o crescente aumento da expansão urbana e a demanda, cada vez maior, por áreas agricultáveis na sub-bacia. O uso e ocupação da terra para empreendimentos de natureza agrícola e urbana, que conjuntamente correspondem a praticamente 60% do território, traz à tona a necessidade urgente e emergente no sentido de adoção de boas práticas de manejo e conservação, visando ao planejamento e gestão da Sub-bacia do Alto-Médios Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG, num viés preservacionista, que queira conciliar o desenvolvimento e o meio ambiente.

Os graus de vulnerabilidade das classes de uso e ocupação da terra variaram entre 2,2 e 3,0 (Tabela 5). Para as classes gramíneas e pastagens e áreas urbanizadas com solo exposto foi determinado grau 3,0 de vulnerabilidade. Fazendo referência à metodologia definida por Crepani et al. (2001), ressalta-se que essas áreas são de altas

instabilidades ou vulnerabilidades para usos e ocupações. A classe culturas diversas obteve grau 2,7 de vulnerabilidade, indicando sérias tendências a processos de desestabilizações ambientais.

Lopes e Saldanha (2016) salienta que a identificação de áreas de uso e ocupação da terra constitui ação extremamente importante, pois uma análise detalhada da vulnerabilidade natural à erosão se relaciona conjuntamente com a estabilidade que a cobertura vegetal garante ao solo. Kreitlow et al. (2016) asseveram que, diferentemente das ravinas e voçorocas, a erosão laminar está fortemente ligada à atividade antrópica através das formas de ocupação da terra. Crepani et al. (2001) salientaram que a densidade da cobertura vegetal é um parâmetro a ser obtido, principalmente por se tratar de um fato de proteção do sistema natural, responsável por atenuar a ação da morfogênese, traduzidos na forma de erosão.

Face ao exposto, destaca-se a necessidade de adoção de práticas que visem a sustentabilidade, manutenção e recuperação do solo, uma vez que grande parte do território da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo, em Minas Gerais, possui usos vinculados às práticas de culturas diversas e pecuária. Por possuir um alto grau de vulnerabilidade ambiental, deve-se planejar e aplicar práticas preservacionistas para garantir o equilíbrio entre meio ambiente e desenvolvimento, sempre numa perspectiva conservacionista e preservacionista.

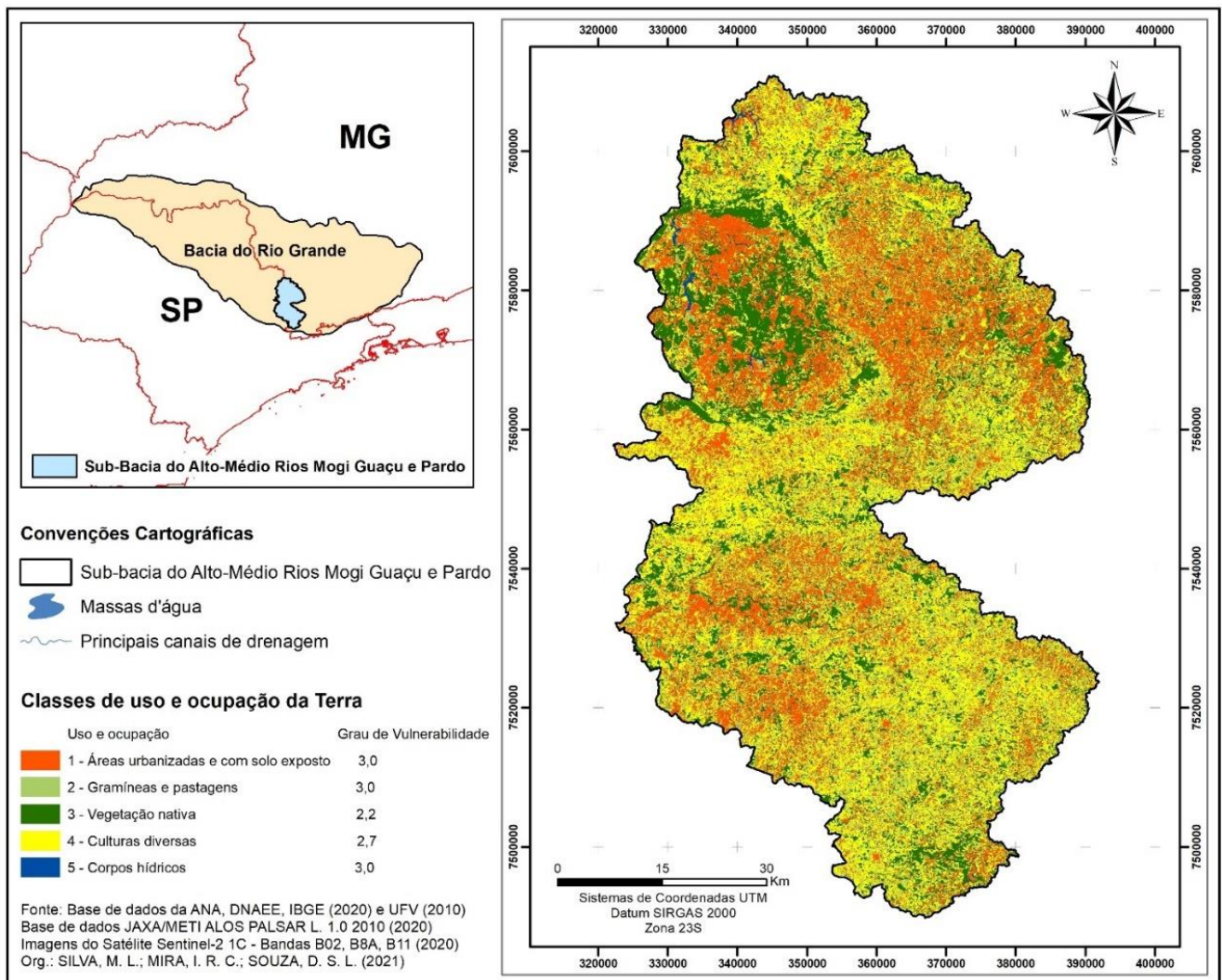


Figura 9. Mapa de classes de uso e ocupação da terra da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG.

Tabela 5. Vulnerabilidade das classes de uso e ocupação da terra da Sub-bacia dos Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG

Uso e Ocupação	Porcentagem (%)	Vulnerabilidade
Áreas urbanizadas e solo exposto	29,6%	3,0
Gramíneas e pastagens	26,7%	3,0
Vegetação nativa	12,3%	2,2
Culturas diversas	30,6%	2,7
Corpos Hídricos	0,8%	3,0

Fonte: adaptado de Crepani et al. (2001)

Estudos sobre uso e ocupação da terra, além de identificar usos conflitantes, ocupações irregulares e estados de degradação do meio (Nunes e Roig, 2015; Silveira et al., 2015; Souza, 2015; Brito et al., 2016; Machado et al., 2017; Cobra et al., 2019), têm demonstrado uma correlação direta da urbanização com a degradação ambiental (Mesquita, Silvestre e Steinke, 2017). Vulnerabilidade natural à erosão

No mapeamento da vulnerabilidade natural à erosão, resultante da média aritmética das variáveis geológicas, geomorfológicas, pedológicas, climáticas e de uso e ocupação da terra, foram identificadas duas categorias morfodinâmicas para a Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG: unidade territorial estável (grau 1,0) e intermediária ou *intergrades* (grau 2,0) (Figura 10, Tabela 6).

Praticamente a metade do território da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo, em Minas Gerais (48%), possui grau 1,0 (Figura 10), o

Considerando o solo como um sistema aberto e resultante da atuação do clima e da biota sobre o material parental, durante certo tempo e controlado pelo relevo, deve-se ressaltar que as áreas com primazia da pedogênese tendem a evoluir em equilíbrio com os sistemas naturais (Tricart, 1977; Crepani et al., 2001, Bastos,

qual representa áreas estáveis com predominância da pedogênese segundo Tricart (1977).

Maniese e Gomes, 2015; Lopes e Saldanha, 2016; Guirra, 2017; Lima e Silva, 2018; Araújo et al., 2019; Leal et al., 2019; Melo et al., 2019; Sokoloski et al., 2019; Silva, Silva e Lima, 2020; Belem e Cabral, 2021; Fiorese, 2020; Rosa e Ferreira, 2021).

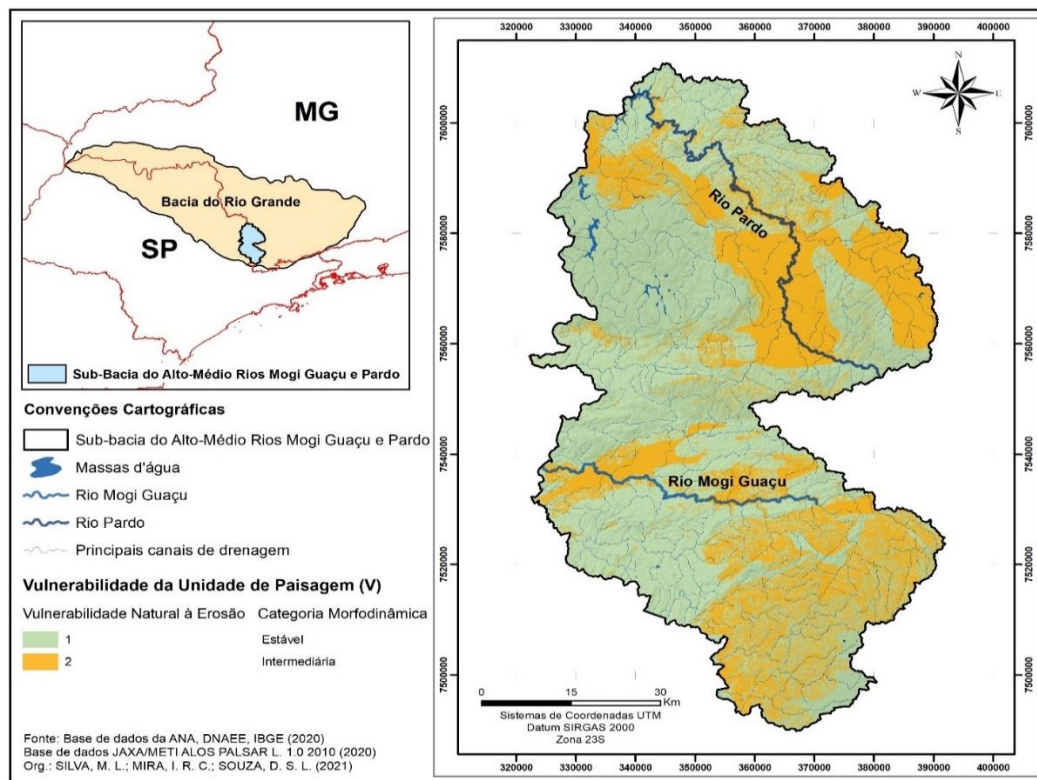


Figura 10. Vulnerabilidade ambiental da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG.

As outras áreas possuem grau 2,0 (equilíbrio entre pedogênese e morfogênese), equivalente a 52% da área total da sub-bacia (2.709,62 quilômetros quadrados). Não foi identificado grau 3,0 (predomínio da morfogênese) na sub-bacia. Contudo, quaisquer alterações nas áreas *intergrades* (grau 2,0) que não levem em

consideração o planejamento, gestão e manejo adequado, poderão resultar em instabilidade do meio, com predomínio da morfogênese (grau 3,0). Assim, nas áreas intermediárias com grau 2,0 (Figura 10), ações de preservação e conservação se fazem extremamente necessárias para manter o equilíbrio dinâmico do meio.

Tabela 6. Classes e graus de vulnerabilidade ambiental na Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG

Categoria Morfodinâmica	Relação Morfogênese-Pedogênese	Grau de Vulnerabilidade
Estável	Prevalece a pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio pedogênese-morfogênese	2,0

Fonte: adaptado de Crepani et al. (2001)

Comparando o mapa de vulnerabilidade natural (Figura 10) ao de uso e ocupação da terra (Figura 9) infere-se que as áreas mais

vulneráveis (grau 2,0) possuem uma correlação com as classes de áreas urbanizadas e com solo exposto e de culturas diversas. Em vista disto, essas

porções da sub-bacia necessitam de maior atenção quanto ao uso do solo para que se aplique padrões de manejo mais sustentáveis.

Nesse sentido, medidas conservacionistas são fundamentais para a preservação dessas porções mais a montante da bacia, ou seja, o alto e médio curso da Sub-bacia dos Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG. Em estudos da Sub-bacia do Rio Piracicaba, em Minas Gerais, Sokoloski et al. (2019) concluíram que as áreas com maior vulnerabilidade natural também correspondem ao lato curso do rio, indicando que a área deve ser prioritária para conservação. Barbosa et al. (2020) ressaltaram a importância do controle da expansão das atividades antrópicas, retirada da vegetação primária e respeito aos preceitos legais para as áreas mais vulneráveis, como forma de preservação da Sub-bacia do Rio Guamá, no Estado do Pará. Medidas semelhantes foram indicadas por Melo et al. (2019) e Reis e Souza (2019). Fiorese (2020) assinalou, como meio de se evitar a instabilidade do Ribeirão Floresta – ES, a necessidade de um melhor planejamento de ocupação da terra através da integração de comitês e gestores públicos com os moradores da sub-bacia.

Conclusão

A partir do mapeamento das unidades territoriais básicas (UTB) constatou-se que praticamente a metade do território da Sub-bacia Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo, em Minas Gerais (48%, correspondente a 2.460 quilômetros quadrados), se encontra na categoria morfodinâmica estável, com baixo grau de vulnerabilidade (grau 1,0) e predomínio dos processos pedogenéticos sobre os processos morfogenéticos. Na busca por uma política preservacionista e conservacionista para a sub-bacia, necessário se faz adotar boas práticas de manejo, para que as áreas com grau 2,0 (equilíbrio entre pedogênese e morfogênese), correspondentes à maior parte do território (52%, correspondente a 2.709 quilômetros quadrados) não se tornem instáveis, com predomínio da morfogênese, prevalecente os processos erosivos.

Esse mapeamento das unidades estáveis e intermediárias constituem importantes ferramentas no processo de planejamento, gestão ambiental e adoção de políticas públicas que visem à conservação de unidade territorial.

Para um ordenamento territorial mais adequado do ambiente, tendo em vista a recuperação e manutenção dos recursos hídricos de forma a assegurar a utilização sustentável deste recurso e a prevenção do ecossistema, recomenda-

se uma maior fiscalização e monitoramento ambiental, intensificando políticas públicas específicas para estes objetivos, visando a evitar um desgaste prematura do solo e desestabilização da paisagem natural. De forma conjugada e ratificada, deve-se adotar práticas conservacionistas e que visem à manutenção e recuperação dos solos, devido à intensa atividade agropecuária praticada na região.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Núcleo Institucional de Pesquisa e Extensão do IFSULDEMINAS – *Campus* Inconfidentes (NIPE), ao IFSULDEMINAS e ao CNPq pela contribuição e apoio financeiro, e ao IGE-UNICAMP pela parceria.

Referências

- Ab' Sáber, A. N., 2003. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. 3. ed. Ateliê Editorial, São Paulo.
- Aquino, A. R.; Paletta, F. C.; Alemida, J. R., 2017. Vulnerabilidade ambiental. Blücher, São Paulo.
- Araújo, I. R. G., Gomes, E. R., Gonçalves, R. M., Queiroz, H. A. A., 2019. Estimativa do índice de vulnerabilidade à erosão costeira (IVC) para o litoral do Piauí, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 20, 105-118. Doi: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1260>
- Bandeira, A. P. N., Nunes, P. H. S., Lima, M. G. S., 2016. Gerenciamento de riscos ambientais em municípios da região metropolitana do Cariri (Ceará). *Ambiente & Sociedade* 19, 81-100. Doi: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0003r1v1942016>
- Barbosa, I. C. C., Souza, A. M. L., Silva, E. R. M., Silva, H. J. F., Vitorino, M. I., Costa, L. G. S., 2020. Variáveis físico-geográficas e as implicações sobre vulnerabilidade ambiental na sub-bacia do Rio Guamá, Pará, Brasil. *RICA - Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais* 11, 264-291. Doi: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.003.0022>
- Bastos, A. S., Maniese, V., Gomes, F. B., 2015. Vulnerabilidade natural à erosão no sudoeste da Amazônia associada aos seus modos de ocupação – O caso do entorno da terra indígena Uru Eu Wau Wau. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 16, 271-282. Doi: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v16i2.386>
- Belem, F. L., Cabral, J. B. P., 2021. Estudo de vulnerabilidade ambiental da bacia do

- reservatório da Usina Hidrelétrica de Ferreira Gomes (AP). *Revista Geoaraguaia* 11, 307-337.
- Brito, E. M., Mello, K., Costa, D. R., Faria, L. C., Valente, R. A., 2016. Geotecnologias aplicadas ao estudo do conflito de uso do solo visando o planejamento ambiental. *Revista Irriga* 21, 577-590. Doi: <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v21n3p577-590>
- Cobra, R. L., Silva, R. C., Oliveira, G. F. A. D., Miranda, D. L., 2019. Geoprocessamento aplicado ao levantamento e avaliação de solos: proposta de avaliação de terras para fins agrícolas no Município de Inconfidentes – MG. *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 397-411. Doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.2.p397-411>
- Costa, F.R., 2018. Análise da vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (RN). Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.
- Crepani, E., Medeiros, J.D., Hernandez Filho, P., Florenzano, T.G., Duarte, V., Barbosa, C.C.F., 2001. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. INPE, São José dos Campos.
- Ferreira, A. M., Silva, A. M., Menezes, P. H. B. J., Valentino, C. H., Passos, C. A., Purcino, M. D., 2020. Vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na Sub-bacia do Ribeirão do Cipó – Poços de Caldas/MG. *Acta Ambiental Catarinense* 17, 133-147. Doi: <http://dx.doi.org/10.24021/raac.v17i1.5016>
- Freitas, S. J. N., Silva, M. A., Sodré, G. R. C., Santos, M. R. S., 2020. Vulnerabilidade aos processos erosivos relacionada com a sazonalidade no município de Barcarena, Pará. *RICA - Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais* 11, 448-462. Doi: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.007.0036>
- Fiorese, C. H. U., 2020. Vulnerabilidade atual e natural à erosão do solo na Sub-bacia Hidrográfica do Ribeirão Floresta, no município de Cachoeiro de Itapemirim, Espírito Santo, Brasil. *Labor & Engenho* 14, 1-13. Doi: <http://doi.org/10.20396/labore.v14i0.8659873>
- Guimarães, F. S., Cordeiro, C. M., Bueno, G. T., Carvalho, V. L. M., Nero, M. A., 2017. Uma proposta para automatização do índice de dissecação do relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 18, 155-167. Doi: <http://dx.doi.org/10.20502/rbgf.v18i1.1163>
- Guirra, A. P. M., 2017. Novas contribuições ao modelo de fragilidade ambiental à processos erosivos: estudo de caso aplicado ao perímetro urbano de Rondonópolis, Mato Grosso. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis, MT, Brasil.
- Kreitlow, J. P., Silva, J. S. V., Neves, S. M. A. S., Neves, R. J., Neves, L. F. S., 2016. Vulnerabilidade ambiental e conflito no uso da terra no Município de Mirassol D'Oeste, Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia* 68, 1917-1936.
- Leal, J. M., Aquino, C. M. S., Aquino, R. P., Valladares, G. S., 2019. Vulnerabilidade ambiental no Município de São Miguel do Tapuio, Piauí: bases para o ordenamento territorial. *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 608-621. Doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.2.p608-621>
- Lima, M. M. P., Silva, L., 2018. Análise da vulnerabilidade natural da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, com apoio de geotecnologia. *Revista Brasileira de Geografia Física* 11, 1442-1457. Doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.4.p1442-1457>
- Lopes, M. S., Saldanha, D. L., 2016. Análise de vulnerabilidade natural à erosão como subsídio ao planejamento ambiental do oeste da Bacia Hidrográfica do Camaquã – RS. *Revista Brasileira de Cartografia* 68, 1689-1708.
- Machado, T. C. E., Campos, M. C. C., Paganini, C. H. P., Maurício, J. C., Soares, M. D. R., 2017. Avaliação do uso e ocupação das áreas de preservação permanente nos anos de 2008 e 2013 na zona urbana de Humaitá, Amazonas. *Revista Universidade Vale do Rio Verde* 15, 744-750. Doi: <http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v15i2.3017>
- Melo, E. Z., Sousa, Y. C. B., Marrama, T. M., Carvalho, H. P., 2019. Índice de vulnerabilidade do solo na Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras - MG. *RG&SA - Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental* 8, 563-581. Doi: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v8e12019563-581>
- Mesquita, F. N., Silvestre, K. S., Steinke, V. A., 2017. Urbanização e degradação ambiental: análise da ocupação irregular em áreas de proteção permanente na região administrativa de Vicente Pires, DF, utilizando imagens aéreas do ano de 2016. *Revista Brasileira de Geografia Física* 10, 722-734. Doi: <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20170047>

- Nunes, A. B., Leite, E. F., 2017. Geoprocessamento aplicado ao estudo de caracterização física e ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Areias no Estado do Tocantins, Brasil. Espaço em Revista 19, 104-127. Doi: <https://doi.org/10.5216/er.v19i2.49600>
- Nunes, J. F., Roig, H. L., 2015. Análise do uso e ocupação do solo da Bacia do Alto do Descoberto DF/GO através de uma classificação automática baseada em lógica nebulosa. Revista Árvore 39, 25-36. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000100003>
- Pagliarini, M. V. Mapeamento da vulnerabilidade ambiental da Bacia do Rio Siemens, Região Sudoeste - PR. 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2018.
- Pavanin, E. V., Chuerubim, M. L., Lázaro, B. de O., 2017. Geoprocessamento aplicado ao estudo de vulnerabilidade do solo da Bacia Hidrográfica do Córrego Guaribas em Uberlândia-MG. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil 13, 17-31. Doi: <https://doi.org/10.5216/reec.v13i2.42460>
- Pavanin, E. V., Chuerubim, M. L., Lázaro, B. O., Nishiyama L., 2016. Geoprocessamento aplicado ao diagnóstico de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Córrego Guaribas em Uberlândia – MG. Revista de Engenharia Civil IMED 3, 24-38. Doi: <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v3n2p24-38>
- Reis, F. S., Souza, S. O., 2019. Vulnerabilidade ambiental do município de Senhor do Bonfim (BA) enquanto subsídio ao ordenamento ambiental. Revista Geotemas 9, 7-29. Doi: <http://doi.org/10.33237/geotemas.v9i2.3503>
- Rosa, R. M., Ferreira, V. O., 2021. Vulnerabilidade natural à perda de solos na unidade de panejamento e gestão dos recursos hídricos afluentes mineiros do baixo Paranaíba – MG. Revista Geoaraguaia 11, 107-131.
- Ross, J. L. S., 2012. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. Revista do Departamento de Geografia – USP, volume especial de 30 anos, 38-51. Doi: <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0112.0003>
- Rovani, F. F. M., Cassol, R., Wollmann, C. A., Simioni, J. P., 2015. Análise da vulnerabilidade natural à perda de solo de Barão de Cotegipe, RS. Revista do Departamento de Geografia – USP 29, 262-278. Doi: <https://doi.org/10.11606/rdg.v29i0.102085>
- Santos, J. O., 2015. Relações entre fragilidade ambiental e vulnerabilidade social na susceptibilidade aos riscos. Mercator 14, 75-90. Doi: <https://doi.org/10.4215/RM2015.1402.0005>
- Santos, P., Martins, A., 2018. Análise da vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Claro (GO) utilizando geotecnologias. Revista do Departamento de Geografia - USP 36, 155-170. Doi: <https://doi.org/10.11606/rdg.v36i0.143665>
- Santos, R. D., Lemos, R. C., Santos, H. G., Ker, J. C., Anjos, L. H. C., 2015. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 7. ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa.
- Santos, R. F. (Org.), 2007. Vulnerabilidade ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos. MMA, Brasília.
- Silva, M. V. S., Silva, B. C. S., Lima, I. F., 2020. Análise de vulnerabilidade ambiental do município São João da Ponta, Pará: O uso do geoprocessamento na gestão de unidades de conservação. Revista Cerrados 18, 159-188. Doi: <https://doi.org/10.22238/rc2448269220201801159188>
- Silva, P. J., 2015. Uso e ocupação do solo urbano: uma análise dos impactos ambientais nas áreas de dunas no bairro de Felipe Camarão/Natal - RN. Holos 5, 91-103. Doi: <https://doi.org/10.15628/holos.2015.2350>
- Silveira, G. R. P., Campos, S., Gonçalves, A. K., Barros, Z. X., Pollo, R. A., 2015. Geoprocessamento aplicado na espacialização da capacidade de uso do solo em uma área de importância agrícola. Energia na Agricultura 30, 363-371. Doi: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n4p363-371>
- Sokoloski, L. J. F., Ferreira, M. R. A., Viterbo, G. A., Belotti, F. M., Vieira, E. M., 2019. Estudo da vulnerabilidade natural da sub-bacia do Rio Piracicaba/MG utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG). RICA - Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais 10, 211-222. Doi: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.002.0018>
- Souza, A. C. C., Silva, M. L., 2016. Geoprocessamento aplicado ao levantamento de solos no Município de Inconfidentes - MG. Revista Brasileira de Geografia Física 9, 200-

214.

Doi:

<https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p200-214>

Souza, S. O., 2015. Geotecnologias aplicadas à análise espaço-temporal do uso e da ocupação da terra na planície costeira de Caravelas (BA).

Boletim Goiano de Geografia 35, 71-79. Doi:

<https://doi.org/10.5216/bgg.v35i1.35485>

Tricart, J., 1977. Ecodinâmica. IBGE, Rio de Janeiro.