

## A VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA DO RIO PIRACICABA/MG: UMA ABORDAGEM GEOGRÁFICA MULTICRITERIAL

*THE ENVIRONMENTAL VULNERABILITY OF THE PIRACICABA RIVER BASIN IN MINAS GERAIS:  
A MULTICRITERIAL GEOGRAPHIC APPROACH*

### RESUMO

A bacia do Rio Piracicaba, localizada na região central-leste de Minas Gerais, possui um dos maiores e mais importantes remanescentes do bioma Mata Atlântica do Estado. Não obstante, observam-se pressões ambientais oriundas de diversas atividades econômicas, dentre as quais destaca-se a mineração. Compreender as especificidades da dinâmica ambiental regional, acredita-se, poderá subsidiar a criação de políticas públicas de maior eficácia para sua conservação. O objetivo geral deste estudo foi identificar áreas de vulnerabilidade ambiental à perda de solos na bacia do Rio Piracicaba, com o intuito de subsidiar ações para a mitigação de impactos e outros processos sócio-ambientais. São objetivos específicos: analisar a contribuição de cada variável ambiental na geração do mapa de vulnerabilidade; integrar as bases cartográficas em ambiente de geoprocessamento, mais especificamente em Sistema de Informação Geográfica, com atributos do meio físico que influenciam diretamente na perda de solos, sendo elas: clima, geologia, solos, geomorfologia e uso e ocupação. Para a integração dessas variáveis utilizou-se o modelo da vulnerabilidade ambiental das unidades territoriais básicas proposto por Crepani et al. (2001). A partir dos resultados obtidos no modelo pôde-se perceber que na região meridional da bacia do Rio Piracicaba, localizada às bordas do Quadrilátero Ferrífero, encontram-se as áreas com maior vulnerabilidade à perda de solos. Percebeu-se também que as áreas mais estáveis estão localizadas na região noroeste da bacia.

**Palavras-chave:** Geomorfologia; Solos; Vulnerabilidade.

### ABSTRACT

Piracicaba river basin, located in the central-eastern region of Minas Gerais, owns one of the largest and most important remnants of Atlantic Forest biome in this State. Despite that, environmental pressures created by several economic activities, specially mining, are observed. To understand specificities of regional environmental dynamics could support the creation of more effective public policies for its conservation challenges. The main goal of this study is to identify vulnerable areas to soil loss in Piracicaba river basin, in order to support actions to mitigate environmental impacts and other socio-environmental processes. Specific goals are: to analyze the role of every environmental component in the vulnerability generated map; to integrate the variables of the physical environment which directly influences the soil loss: climate, geology, soils, geomorphology and use and occupation. The integration of those variables was done by using the environmental vulnerability model of the basic territorial units proposed by Crepani et al. (2001). The results obtained in the model shows that, the southern region of the Piracicaba River basin, located in the edge of Quadrilátero Ferrífero, is more vulnerable to soil loss. The most stable areas are located in the northwest region of the basin

**Keywords:** Geomorphology; Soil; Vulnerability.

 Ewerton Ferreira Cruz <sup>a</sup>

 Alecir Antônio Maciel Moreira <sup>b</sup>

<sup>a, b</sup> Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

DOI: 10.12957/geouerj.2022.52633

**Correspondência:**

ewertonengambiental@yahoo.com.br  
alecirmoreira@hotmail.com

**Recebido em:** 24 mar. 2021

**Revisado em:** 12 abr. 2021

**Aceito em:** 30 mai. 2022



## Introdução

A Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba (BHRP) constitui um importante microcosmo do território de Minas Gerais. Com uma área de aproximadamente 5.706 km<sup>2</sup>, a bacia está localizada em duas mesorregiões: a Metropolitana de Belo Horizonte e Vale do Rio Doce (IGAM, 2010). O principal rio da bacia é o Piracicaba, com extensão de 241 km. Ele tem suas nascentes localizadas no município de Ouro Preto e foz no Rio Doce, na divisa dos municípios de Ipatinga e Timóteo (IGAM, 2010). A BHRP abrange total ou parcialmente 20 municípios mineiros.

Percorrida por bandeirantes desde o início da conquista do território mineiro, a bacia do rio Piracicaba abriga um dos rios mais degradados da bacia do rio Doce. Nela estão inseridas diversas mineradoras, lavras de minério de ferro, lavras de materiais preciosos, bem como siderúrgicas. A bacia possui algumas das maiores reservas de minério de ferro do país, entre outros minerais. Como subsídio energético a essa atividade, a silvicultura do eucalipto ocupa largas extensões do território da bacia. Esses tipos de atividades industriais têm grande potencial para degradar a vegetação nativa remanescente. Deve-se ainda ressaltar que a ocupação da bacia está diretamente relacionada com as atividades econômicas nela exercidas, ou seja, com a exploração de recursos naturais (CRUZ, 2009).

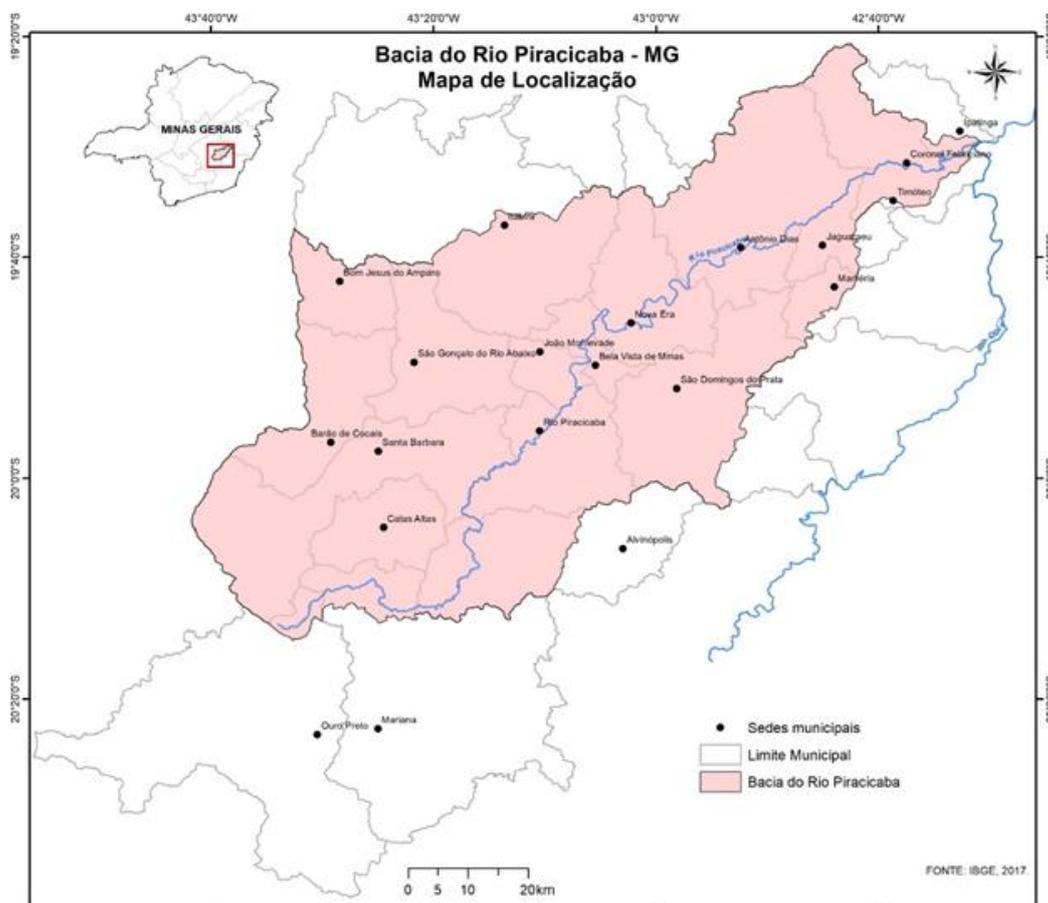
Para tornar ainda mais complexa a situação da bacia, no ano de 2015, a bacia do rio Doce foi fortemente impactada por um desastre ambiental decorrente da atividade minerária de uma empresa de grande porte, que afetou, a jusante, larga porção do território mineiro: o desastre do rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG). Entre os impactos do desastre incluem-se a morte de milhares de peixes e animais, a poluição de águas e o assoreamento de cursos d'água, a supressão de vegetação ciliar e a contaminação de solos.

A Bacia do Rio Piracicaba está localizada na região central-leste de Minas Gerais e está inserida, parcialmente, na Mesorregião Região Metropolitana de Belo Horizonte e na Mesorregião do Vale do Rio Doce. Mais especificamente, o território da bacia está inserido em maior porcentagem na Microrregião de Itabira, Microrregião de Ipatinga na porção norte, e na Microrregião de Ouro Preto na parte sul (Figura 1).

A bacia possui vinte municípios em sua extensão, sendo eles Ouro Preto, Mariana, Alvinópolis, Catas Altas, Santa Bárbara, Barão de Cocais, São Gonçalo do Rio Abaixo, Bom Jesus do Amparo, Rio Piracicaba, João Monlevade, São Domingos do Prata, Bela Vista de Minas, Nova Era, Itabira, Marliéria, Antônio Dias, Jaguaráçu, Timóteo, Coronel Fabriciano e Ipatinga.

A foz do rio Piracicaba situa-se no município de Ipatinga e em seu trajeto corta outros nove municípios (Mariana, Alvinópolis, Rio Piracicaba, João Monlevade, Bela Vista de Minas, Nova Era, Antônio Dias, Coronel Fabriciano, Jaguaráçu e Timóteo) até desaguar no Rio Doce. O Rio Piracicaba provê recursos hídricos utilizados para diversos fins, como abastecimento urbano e irrigação, principalmente para os municípios por onde ele percorre.

Figura 1. Mapa de localização da bacia do Rio Piracicaba



Fonte: IBGE, 2016.

A erosão é um problema ambiental facilmente identificável na bacia. Ela é evidenciada pela extensiva presença de feições erosivas, tais como ravinhas e voçorocas, bem como cicatrizes de antigos movimentos de massa com solo exposto à erosão. Esses processos provêm farto material sedimentar para os leitos fluviais. Para além dos processos erosivos, destaque-se que a bacia do Piracicaba posiciona-se sobre rico substrato férreo e atrai intensa atividade minerária que, por seu turno, contribui para a geração de farto material sedimentar. Sedimentos provenientes dos processos erosivos e da ação antrópica são carregados para os leitos dos rios, diminuindo a profundidade dos talwegues e, como corolário do processo, intensificam o processo de assoreamento.

Para analisar o potencial de risco ambiental faz-se necessária a sintetização de dados para facilitação da leitura das diversas variáveis utilizadas. É por esse motivo que a abordagem sistêmica é comumente utilizada na Geografia, principalmente quando os estudos são relacionados ao meio ambiente. A abordagem sistêmica é o estudo dos fenômenos ou objetos e, principalmente, os "seus termos relacionais que implicam noções básicas de causa e efeito" (FACHIN, 2003, p. 11). Gomes (1996) afirma que a abordagem sistêmica possui como principal vantagem a ligação dos fenômenos às suas estruturas e suas relações, podendo visualizar as partes



separadamente a partir da utilização de subsistemas. Nesse sentido o presente estudo utilizou Sistemas de Informação Geográfica para execução de análises multicriteriais do funcionamento do ambiente.

A modelagem ambiental é um recurso matemático utilizado pela Geografia e outras ciências afins para prever comportamentos. Ela é sustentada teórica e metodologicamente pelo sistemismo. A partir do conhecimento do funcionamento do sistema ambiental procura-se definir as variáveis mais importantes para o processo em questão e gera-se uma álgebra que expresse a sua interação. Trata-se, contudo, como em todo modelo, de uma simplificação da realidade a partir da experiência e percepção ambiental do pesquisador, o que torna o modelo gerado algo subjetivo (CHRISTOFOLETTI, 1999).

O objetivo geral deste estudo foi identificar áreas de vulnerabilidade ambiental da bacia do Rio Piracicaba, tendo como objetivos específicos:

- Analisar a vulnerabilidade ambiental à perda de solos;
- Analisar a contribuição de cada variável na composição do mapa de vulnerabilidade ambiental;

A relevância da pesquisa repousa na possibilidade de identificação de áreas que são mais susceptíveis à perda de solo com o intuito de gerar subsídios para o manejo e gestão do território e, de forma subsequente, a criação de políticas públicas para a minimização dos processos erosivos e do assoreamento da rede fluvial.

Para responder as indagações colocadas fez-se necessária a utilização de uma abordagem sistêmica através do uso de variáveis relacionadas ao meio físico por meio do modelo de vulnerabilidade ambiental à perda de solos (CREPANI *et al.*, 2001).

## **Materiais e método**

Para a definição da vulnerabilidade ambiental da bacia do Rio Piracicaba foi adotado o modelo proposto por Crepani *et al.* (2001) no qual, pode-se inferir, que fez o uso da abordagem sistêmica. Um sistema pode ser definido como "um conjunto de fenômenos que se processam mediante de fluxos de matéria e energia. Esses fluxos condicionam relações de dependência mútua entre os fenômenos" (TRICART, 1977, p. 19). O referido autor acrescenta que o sistema possui propriedades que lhes são próprias "e diferem da soma da propriedade de seus componentes. Uma delas é ter dinâmica própria, específica do sistema" (TRICART, 1977, p. 19).

Para avaliar o sistema da bacia em estudo foi necessário identificar os fenômenos ou elementos e suas relações, ou seja, entender "as partes" para entender "o todo". Partindo dessa premissa, os elementos utilizados foram os dados geológicos, climatológicos, geomorfológicos, pedológicos, de cobertura do solo e socioeconômicos, com isso foi possível analisar as suas relações por meio dos mapas de vulnerabilidade ambiental, vulnerabilidade de infraestrutura de saneamento e meio ambiente e qualidade de fragmentos de vegetação.

O modelo de vulnerabilidade das unidades territoriais básicas desenvolvido por Crepani *et al.* (2001) foi elaborado a partir dos princípios da Ecodinâmica de Tricart (1977), e tem como foco a vulnerabilidade natural do meio à perda de solos. Crepani *et al.* (2001, p. 21) afirmam que "os critérios desenvolvidos a partir desses



princípios permitiram a criação de um modelo onde se buscou a avaliação, *de forma relativa e empírica*, do estágio de evolução morfodinâmica das unidades territoriais básicas, atribuindo valores de estabilidade às categorias".

O modelo de vulnerabilidade ambiental é aplicado para situações morfodinâmicas que ocorrem naturalmente, ou seja, sem influência antrópica. A partir desta premissa, o modelo analisa individualmente cinco variáveis distintas (geologia, geomorfologia, solos, vegetação e clima), sendo atribuídos valores que variam de 1 (meio estável) a 3 (meio vulnerável). Ao final é obtida a Vulnerabilidade Ambiental através da média aritmética das cinco variáveis analisadas, como demonstrado na equação (CREPANI *et al.*, 2001):

$$V = \frac{(G + R + S + V + C)}{5}$$

Onde: V = Vulnerabilidade à perda de solos; G = Vulnerabilidade geológica; R = Vulnerabilidade geomorfológica; S = Vulnerabilidade pedológica; V = Vulnerabilidade da cobertura vegetal; C = Vulnerabilidade climática

A partir do resultado da equação foi possível definir o estado de vulnerabilidade ambiental através da representação cartográfica das unidades territoriais básicas através da escala de vulnerabilidade natural à perda de solos, como demonstrado no Quadro 1.

**Quadro 1.** Escala de vulnerabilidade das unidades territoriais básicas.

Média	Grau de Vulnerabilidade
2,7-3,0	Vulnerável
2,3-2,6	Moderadamente vulnerável
1,8-2,2	Medianamente estável/vulnerável
1,4-1,7	Moderadamente estável
1,0-1,3	Estável

Fonte: Crepani *et al.* (2001) adaptado pelo autor.

O entendimento da evolução geológica do ambiente explica o grau de coesão das rochas e ajuda a compreender a dinâmica da evolução da paisagem. Segundo Crepani *et al.* (2001, p.32), grau de coesão das rochas é "a intensidade da ligação entre os minerais ou partículas que as constituem", sendo que nas rochas menos coesas há predominância de processos erosivos, e rochas muito coesas prevalece a pedogênese. De fato, este é um princípio pertinente e permitiu a criação da escala de vulnerabilidade definida pelos autores. Não obstante, cabe afirmar que se trata de apenas um dos elementos que a definirão. A composição química das rochas, sua gênese (resfriamento em superfície ou profundidade) e os diferentes processos de metamorfismo, temperatura, tensões, migração de fluidos são elementos que afetarão a resistência das rochas ao intemperismo. Cabe ainda mencionar a posição das rochas em uma vertente, para não se esquecer de mencionar a



importância da condição geomorfológica. No entanto, deve-se esclarecer que se trata de um modelo de entendimento da composição da vulnerabilidade e, portanto, sujeito a simplificações. Não se esgotará aqui essa discussão.

A partir dessas premissas, os autores construíram a escala de vulnerabilidade geológica à perda de solos, conforme indicado no Quadro 2.

**Quadro 2.** Escala de vulnerabilidade geológica.

Geologia	Escala	Geologia	Escala
Quartzitos ou metaquartzitos	1,0	Estauroлита xisto, Xistos granatíferos	2,0
Riólito, Granito, Dacito	1,1	Filito, Metassilito	2,1
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos	1,2	Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	2,4
Migmatitos, Gnaisses	1,3	Conglomerados, Subgrauvacas	2,5
Andesito, Diorito, Basalto	1,5	Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	2,9
Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto	1,7	Sedimentos inconsolidados: Aluviões, Colúvios, etc.	3,0
Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto	1,9		

Fonte: Crepani *et al.* (2001, p. 74).

As condições climáticas das unidades de paisagens naturais influem diretamente o intemperismo das rochas. O clima possui múltiplas variáveis, porém a variável adotada pelo método de Crepani *et al.* (2001) foi a precipitação pluviométrica, pois o impacto da chuva e o escoamento superficial no terreno causam a remoção do solo através da erosão hídrica. Para ser inserido no modelo, foi criada a escala de vulnerabilidade ambiental em relação à pluviosidade (CREPANI *et al.*, 2001), descrita na Tabela 1.

**Tabela 1.** Escala de vulnerabilidade para clima.

Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade
<50	1,0	200-225	1,7	375-400	2,4
50-75	1,1	225-250	1,8	400-425	2,5
75-100	1,2	250-275	1,9	425-450	2,6
100-125	1,3	275-300	2,0	450-475	2,7
125-150	1,4	300-325	2,1	475-500	2,8
150-175	1,5	325-350	2,2	500-525	2,9
175-200	1,6	350-375	2,3	>525	3,0

Fonte: Crepani *et al.* (2001, p. 98).

A principal causa da erosão hídrica está relacionada com a ação das chuvas no solo. Para entender o funcionamento do processo erosivo é necessário, portanto, conhecer o comportamento do solo, a sua composição (mineralógica e granulométrica), a sua estrutura e a estabilidade de seus agregados. Nesta perspectiva, a maturidade dos solos está diretamente relacionada com as variáveis fundamentais para entender a



potencialidade do solo de sofrer erosão (CREPANI *et al.*, 2001). A escala do grau de vulnerabilidade do solo à erosão está detalhada no Quadro 3.

**Quadro 3.** Escala de vulnerabilidade para solos.

Classe de Solo	Legenda	Vulnerabilidade
Latossolo Amarelo	LA	1,0
Latossolo Vermelho-amarelo	LV	
Latossolo Vermelho-escuro	LE	
Podzólico Vermelho-amarelo	PV	2,0
Podzólico Vermelho-escuro	PE	
Planossolo	PL	
Cambissolos	C	2,5
Solos Litolíticos	R	3,0
Afloramento Rochoso	AR	

Fonte: Crepani *et al.* (2001, p. 86).

Os Latossolos são classificados como estáveis por serem bem desenvolvidos, possuírem grande profundidade, serem porosos, friáveis e de baixa plasticidade. Esses solos quase não apresentam minerais de fácil intemperização devido ao intenso processo de intemperismo e lixiviação pelo qual foram submetidos

Já os solos Podzólicos, classificados como solos de vulnerabilidade medianamente estável/vulnerável, são solos que apresentam menor profundidade, são menos estáveis e intemperizados e ocorrem em topografias um pouco mais movimentadas quando comparados com os Latossolos. Em relação a estrutura dos solos Podzólicos, “a diferença de textura entre os horizontes A e B (ocasionada pelo acúmulo de argila no horizonte B) dificulta a infiltração de água no perfil, o que favorece os processos erosivos” (CREPANI *et al.*, 2001, p. 85).

Os cambissolos são solos que possuem grande variação de profundidade, sendo encontrados desde em solos rasos a profundos e são compostos “por material mineral, com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial” (EMBRAPA, 2006, p. 71). Esse tipo de solo pode possuir granulometrias diferentes, todavia, muitas vezes é possível observar a existência de pedregulhos, cascalhos e até mesmo rochas (IBGE, 2015). Os Cambissolos possuem “pedogênese pouco avançada evidenciada pelo desenvolvimento da estrutura do solo, alteração do material de origem expressa pela quase ausência da estrutura da rocha ou da estratificação dos sedimentos” (EMBRAPA, 2006, p. 66).

Já os solos classificados como vulneráveis (peso 3) tem-se os Neossolos. Eles são solos compostos por materiais minerais ou orgânicos de pouca espessura (menor que 30 cm) e não apresentam o horizonte B diagnóstico. Outra característica importante é que este tipo de solo é pouco evoluído, ou seja, sofreu pouca atuação dos processos pedogenéticos (EMBRAPA, 2006). Por ter sofrido pouca atuação de processos pedogenéticos, esses solos não apresentam expressivas alterações em relação ao seu material originário. Deve-se ainda



destacar que os Afloramentos Rochosos também são classificados como vulneráveis por ainda não apresentarem uma camada de solo, estando, portanto, em fase de transformação.

A geomorfologia é fundamental para a definição da vulnerabilidade ambiental à perda de solos, pois a forma da unidade territorial pode provocar ou dificultar a ação dos processos erosivos. Crepani *et al.* (2001) faz o uso dos índices morfométricos do terreno através de três variáveis: grau de dissecação do relevo, amplitude altimétrica e declividade (Tabela 2).

**Tabela 2.** Escala de vulnerabilidade de acordo com o grau de dissecação do relevo, amplitude altimétrica e declividade.

Amplitude do Interflúvio (m)	Amplitude altimétrica (m)	Declividade (%)	Vulnerabilidade
>5000	<20	<3,5	1,0
4750-5000	20-29,5	3,5-5,8	1,1
4500-4750	29,5-39	5,8-8,2	1,2
4250-4500	39-48,5	8,2-10,3	1,3
4000-4250	48,5-58	10,3-12,9	1,4
3750-4000	58-67,5	12,9-15,1	1,5
3500-3750	67,5-77	15,1-17,4	1,6
3250-3500	77-84,5	17,4-19,8	1,7
3000-3250	84,5-94	19,8-22,2	1,8
2750-3000	94-103,5	22,2-24,5	1,9
2500-2750	103,5-113	24,5-27,2	2,0
2250-2500	113-122,5	27,2-29,6	2,1
2000-2250	122,5-132	29,6-32,1	2,2
1750-2000	132-141,5	32,1-34,6	2,3
1500-1750	141,5-151	34,6-37,2	2,4
1250-1500	151-160,5	37,2-39,8	2,5
1000-1250	160,5-170	39,8-42,4	2,6
750-1000	170-179,5	42,4-45,3	2,7
500-750	179,5-189	45,3-48,1	2,8
250-500	189-200	48,1-50	2,9
<250	>200	>50	3,0

Fonte: Crepani *et al.* (2001, p. 80 e 81).

O grau de dissecação do relevo, segundo Crepani *et al.* (2001) está relacionado com a permeabilidade do terreno (solo e rocha) (Tabela 2); A amplitude altimétrica é o indicador de energia potencial da água pluvial no escoamento superficial. Segundo Crepani *et al.* (2011) a amplitude altimétrica está diretamente relacionada com o aprofundamento da dissecação (Tabela 2); a declividade está relacionada com a transformação da energia potencial em energia cinética, ou seja, quanto maior a inclinação, maior será a velocidade de transformação da energia potencial em energia cinética (Tabela 2).

Ao final, ao obter o grau de vulnerabilidade parcial das variáveis referente à geomorfologia do local é feita a média aritmética dos pesos atribuídos conforme disposto na equação abaixo.

$$R = \frac{(G + A + D)}{3}$$

Onde: R = Vulnerabilidade para o tema Geomorfologia; G = Vulnerabilidade atribuída ao Grau de Dissecação; A = Vulnerabilidade atribuída à Amplitude Altimétrica; D = Vulnerabilidade atribuída à Declividade.



Por fim, para a produção do mapa de vulnerabilidade ambiental de cobertura vegetal foi realizada uma adaptação do método proposto por Crepani *et al* (2001). A adaptação foi realizada pela falta de dados com a precisão a qual o modelo requer, com tipos de vegetação, por esse motivo, a variável cobertura vegetal foi substituída pela variável denominada uso do solo, considerando também as classes de cobertura provenientes da antropização. Os dados de uso do solo foram disponibilizados pelo IBGE através mapeamento realizado em 2010. Os pesos atribuídos para o uso e cobertura do solo, definidos para esse trabalho, estão especificados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Escala de vulnerabilidade para uso do solo.

Classe	Peso
Matas e/ou florestas naturais ou plantadas	1,0
Pastagens + matas e/ou florestas	2,0
Pastagens naturais e plantadas	2,5
Lavouras + pastagens	2,5
Área <10% de ocupação por estabelecimentos agropecuários	2,0
Área entre 10-25% de ocupação por estabelecimentos agropecuários	2,5
Área entre 25-50% de ocupação por estabelecimentos agropecuários	3,0
Usos diversificados e outras coberturas e usos	3,0
Área Urbanizada	3,0

Fonte: Do autor.

A escolha dos pesos ocorreu de forma analítica em relação ao tipo de cobertura do solo. As matas e/ou florestas fazem com que as águas das chuvas sejam amortizadas antes de tocarem ao solo, diminuindo o potencial erosivo da mesma. Outra característica importante que foi levada em consideração é em relação à estabilidade do solo que as raízes da vegetação proporcionam ao solo, evitando também a sua descompactação e posteriormente o seu carreamento, por esse motivo o peso atribuído a esse tipo de cobertura foi 1. Já em relação às pastagens e lavouras, apesar de amortizarem o impacto das gotas da chuva no solo, essa amortização é menor se comparada à realizada pelas vegetações arbustivas, o mesmo pode ser observado em relação à estabilidade das raízes desse tipo de vegetação, por esse motivo, foi ponderado com peso 2,5. Já as áreas onde possuem pastagens concomitantemente com matas e/ou florestas, foi atribuído peso 2 por este tipo de cobertura possuir características das duas já descritas anteriormente.

As áreas de ocupação por estabelecimentos agropecuários possuem uma característica importante em relação à vulnerabilidade à perda de solos. Para que ocorra algum tipo de atividade agropecuária é necessário o plantio. Para que ocorra o plantio é necessário, na maior parte das vezes, o revolvimento do solo, o tornando mais vulnerável à erosão. Por esse motivo, a adoção dos pesos entre 2,0 e 3,0 foi embasada nessa percepção. É necessário ressaltar que, quanto maior a porcentagem de ocupação por estabelecimentos agropecuários, maior é a probabilidade de ocorrer esse revolvimento no solo, portanto, maior será a vulnerabilidade a perda de solos.



Em relação às áreas urbanizadas, o peso atribuído a esse tipo de uso foi 3,0. Essa ponderação foi baseada no argumento de que quando uma área é urbanizada há um aumento significativo da velocidade do escoamento superficial. Esse fato ocorre porque o atrito entre a água e o solo é diminuído de acordo com a rugosidade do terreno. Outra característica importante que foi levada em consideração é em relação ao acúmulo do escoamento superficial. Com a urbanização há a diminuição da permeabilidade do solo, ou seja, a pavimentação faz com que a área fique impermeabilizada, fazendo com que as águas pluviais não consigam adentrar no solo e o único sentido que elas podem ter é o escoamento. O aumento do escoamento irá aumentar também a força dessa água, que possui um poder destrutivo, ou seja, de erodir o solo à uma taxa expressiva.

Para a aplicação do modelo e análise dos resultados obtidos, foram utilizados dados secundários de instituições governamentais. Os dados utilizados, com as suas respectivas fontes, escalas e anos em que foram gerados, podem ser observados no Quadro 4.

**Quadro 4.** Dados utilizados na pesquisa

Material	Fonte	Escala	Ano
Bacias	IGAM	1:1.000.000	2009
Municípios	IBGE	1:250.000	2015
Uso e Ocupação do Solo	IBGE	1:1.000.000	2010
Relevo	IBGE	1:1.000.000	2010
Geologia	CPRM	1:1.000.000	2004
Pedologia	UFV	1:600.000	2011
Cursos d'água	IEDE-Sisema	1:1.000.000	2016
Drenagem	Instituto Pristino	1:1.000.000	2016
Sedes municipais	Instituto Pristino	1:1.000.000	2016
Modelo Digital de Elevação	INPE	30 m	2010
Pluviosidade	INMET	1961-1990	1992

Fonte: Organizado pelos autores

Para o processamento e geração de mapas foi utilizado o *software* ArcGis na versão 10.3 da empresa ESRI no laboratório de Cartografia do Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

### Caracterização da área de estudo

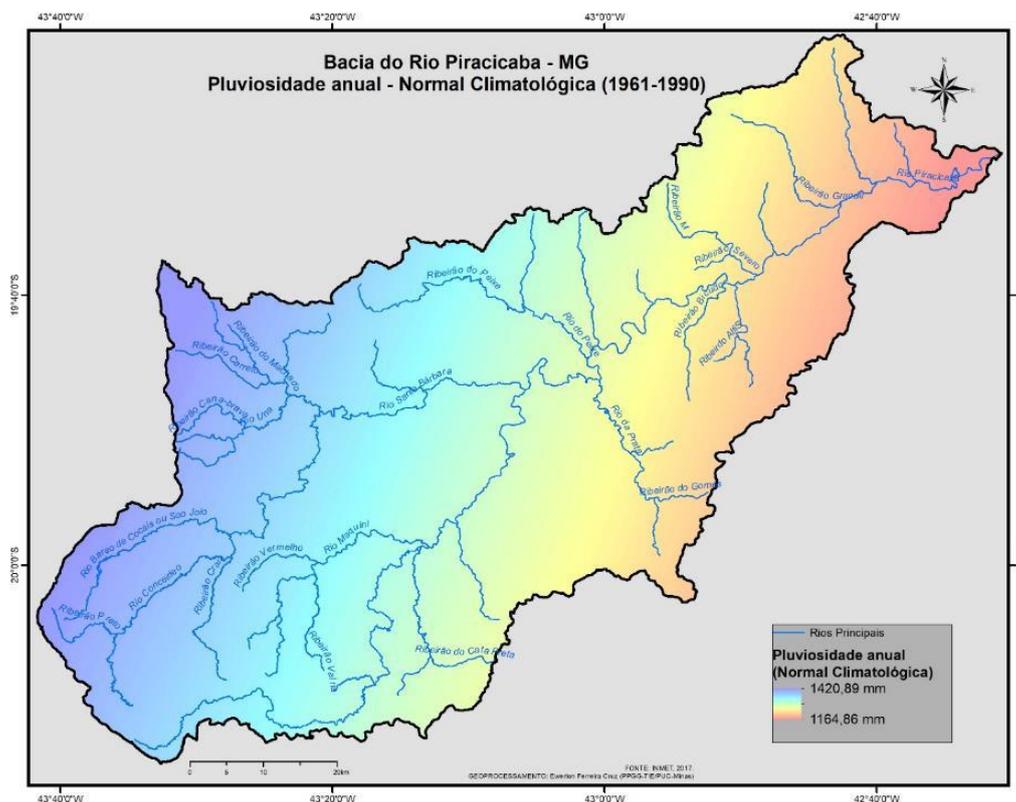
Para identificar a vulnerabilidade ambiental à perda de solos da bacia do rio Piracicaba foi necessário entender as características físicas da bacia anteriormente. Nessa perspectiva, o presente item tem como objetivo a caracterização do meio, sendo eles o clima, geologia, solos, geomorfologia e o uso e ocupação da bacia.



A pluviosidade média anual da Bacia do Rio do Rio Piracicaba de acordo com as Normais Climatológicas do período compreendido entre 1961 e 1990 disponibilizadas pelo INPE varia entre 1164,86 mm a 1420,89 mm anuais (

Figura 2). As regiões sudoeste e oeste da bacia possuem as maiores médias pluviométricas anuais decrescendo no sentido nordeste até atingir seus menores índices da região nordeste, 1164,89 mm anuais.

Figura 2. Mapa de pluviosidade média anual (1961-1990) da bacia do Rio Piracicaba.



De acordo com Silva (2010), a geologia da bacia do Rio Piracicaba pode ser dividida em duas partes distintas. A primeira, localizada na região meridional da bacia, é influenciada pela litologia do Quadrilátero Ferrífero. Já na segunda, na porção setentrional, estão localizadas principalmente as rochas graníticas da Província Mantiqueira.

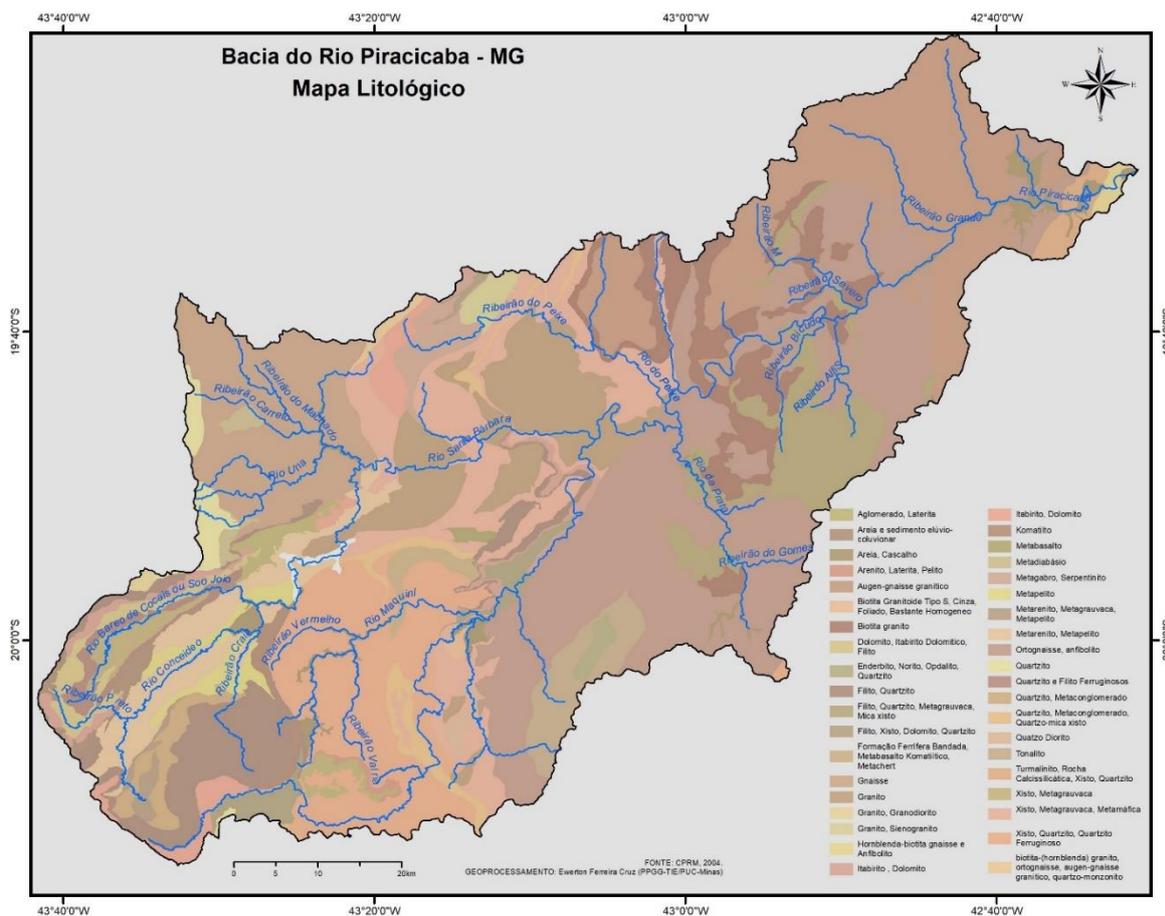
Conforme aborda Uhlein e Oliveira (2000), cerca de 95% do Quadrilátero Ferrífero é composto por estruturas do Arqueano ou Proterozóico e são agrupadas em três formações distintas: Complexo Granito-Gnaísico (embasamento) de idade arqueana; Supergrupo Rio das Velhas, o qual é um *Greenstone Belt* arqueano onde foram encontradas as minas de ouro do Quadrilátero Ferrífero; e o Supergrupo Minas+Grupo Itacolomi de idade proterozóica, uma das maiores fontes de minério de ferro do Estado de Minas Gerais (Figura 3).

Já em relação à região setentrional, a “Província Mantiqueira desenvolveu-se durante a Orogenia Neoproterozóica Brasileiro-Pan Africana a qual resultou na amalgamação do Paleocóntinente Gondwana Ocidental” (HEILBRON et al., 2004, p. 203). Na bacia do Rio Piracicaba, na região pertencente à Província Mantiqueira,



destaca-se o Grupo Rio Doce. O Grupo Rio Doce, de acordo com Heilbron (2004, p. 210), pode ser “caracterizado por sedimentação turbidítica de mar profundo (metagrauvaca, micaxisto e gnaiss, bandados)”, além disso, o rio ainda é considerado como representante da margem passiva oriental da bacia neoproterozóica, pois está localizado na região oriental da zona de sutura. Estudos ainda indicam que a idade da sedimentação é maior que 600 Ma. (op. cit.).

Figura 3. Mapa geológico da bacia do Rio Piracicaba



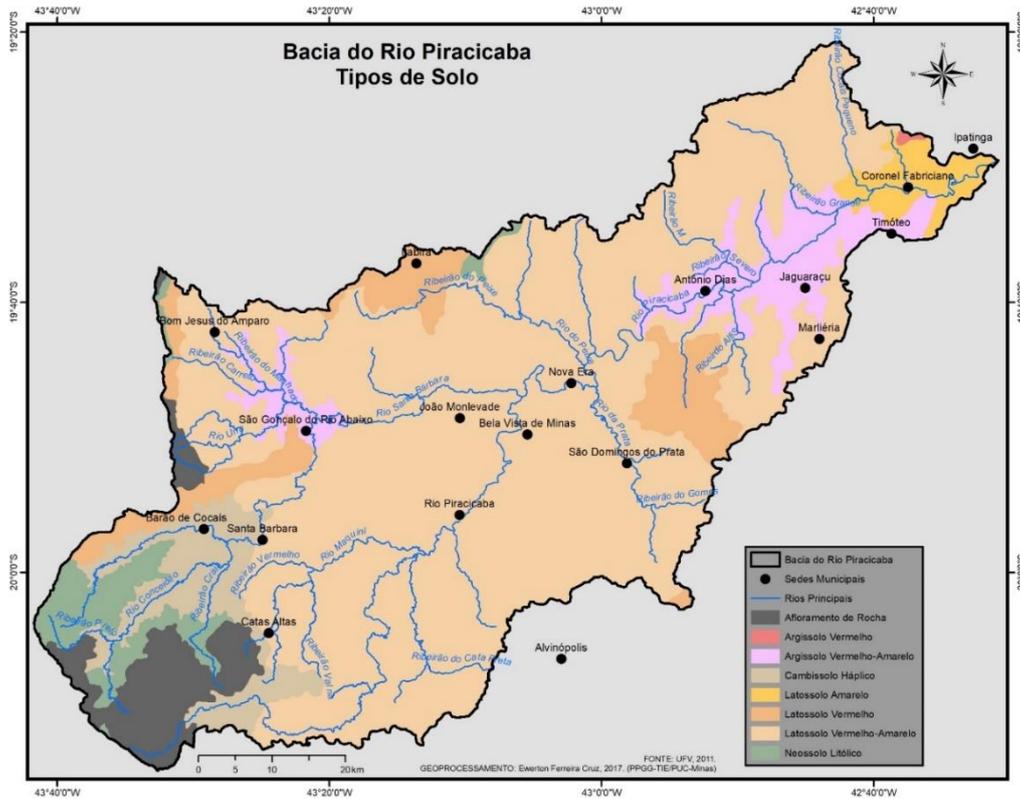
Fonte: CPRM, 2004

De acordo com o mapeamento realizado pela UFV em 2011 na escala de 1:600.000, a bacia do Rio Piracicaba possui sete tipos diferentes de solos (Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho-amarelo, Cambissolo Háplico, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-amarelo e Neossolo Litólico) e afloramentos rochosos (Figura 4).

Grande parte da bacia, cerca de 75% do seu território, possui solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo. Na região sul da bacia, onde está localizada a nascente do Rio Piracicaba, há predomínio afloramentos rochosos e solo classificado como Neossolo Litólico. Outra característica importante a ser observada é que na foz do Rio Piracicaba, porção norte da bacia, o solo é classificado como Latossolo Amarelo (Figura 4).

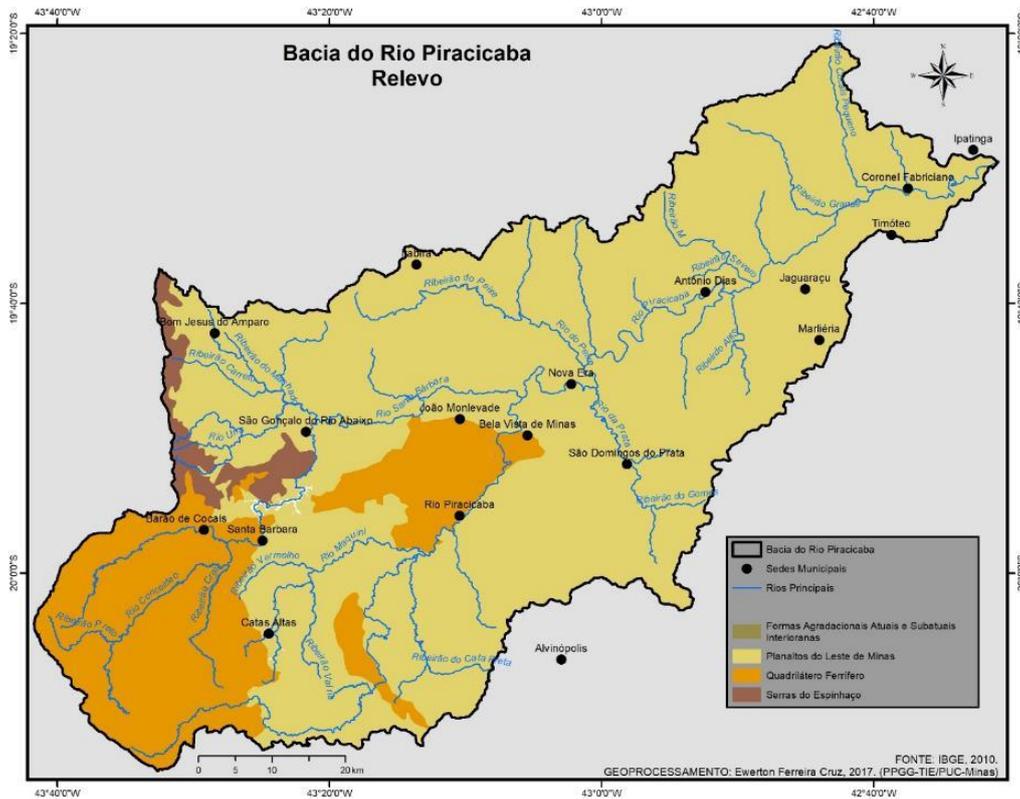


Figura 4. Mapa pedológico da bacia do Rio Piracicaba.



Fonte: UFV (2011).

Figura 5. Relevo da bacia do Rio Piracicaba.

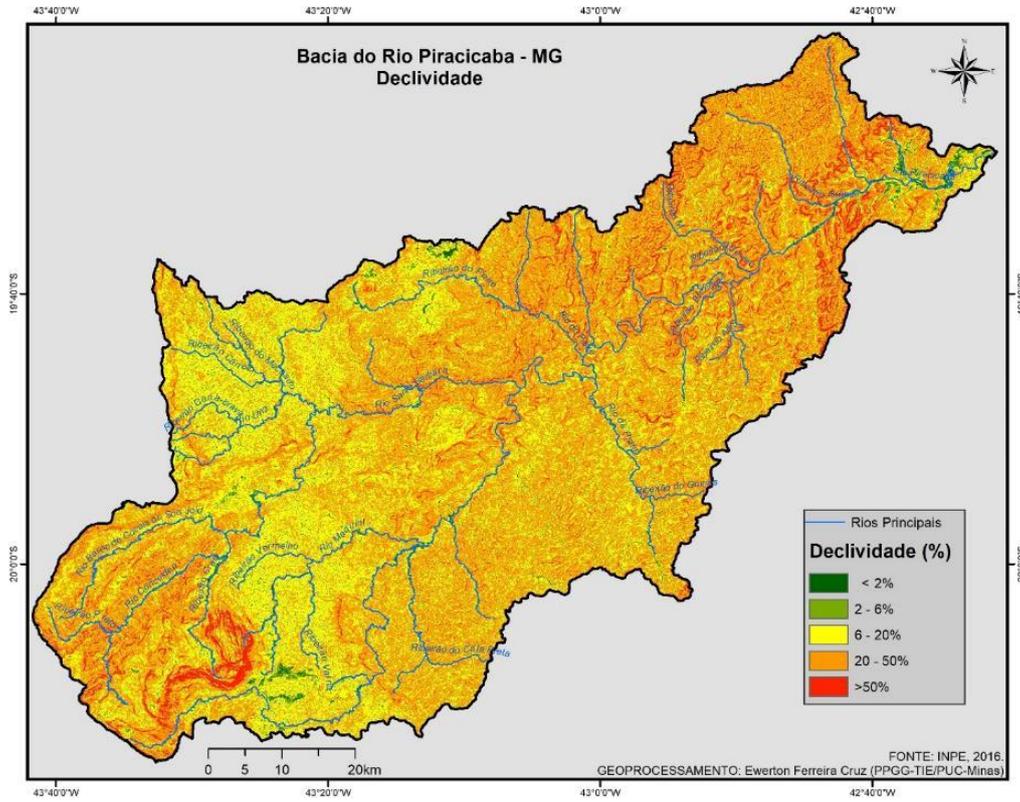


Fonte: IBGE (2010).



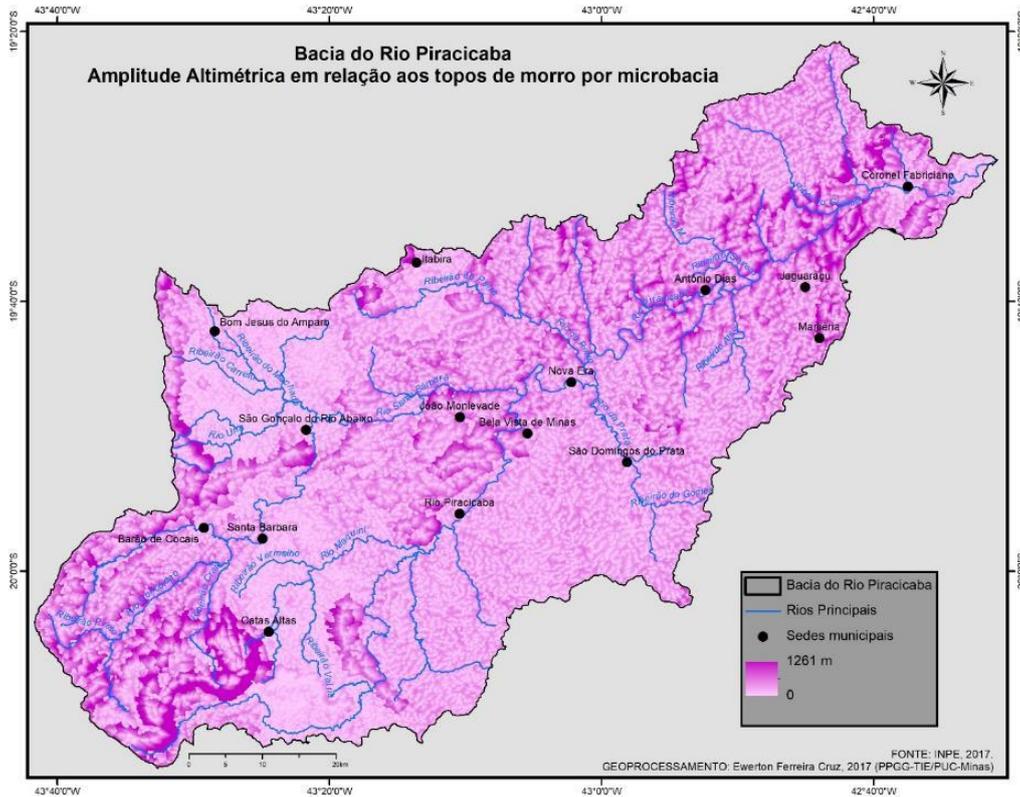


Figura 7. Mapa de declividade da bacia do Rio Piracicaba.



Fonte: INPE (2016).

Figura 8. Mapa de amplitude altimétrica em relação aos topos de morro por microbacia pertencente à bacia do Rio Piracicaba.



Fonte: Do autor



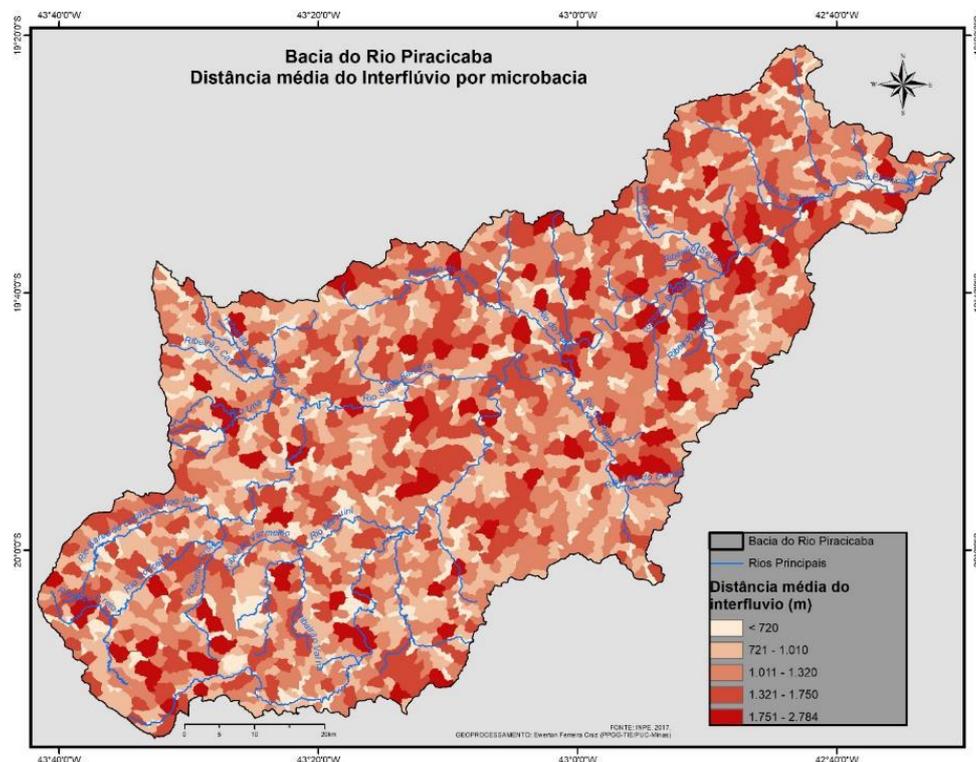
Já em relação à amplitude altimétrica (Figura 8), as maiores diferenças são observadas na região meridional da bacia, nas linhas de crista da Serra do Caraça, bem como nas bordas do Quadrilátero Ferrífero. Na região meridional da bacia, nas imediações da cabeceira do rio principal, existem áreas de elevado desnível altimétrico.

Em relação à distância média do interflúvio pode-se notar que nas sub-bacias da bacia do Rio Piracicaba a distância média do interflúvio é dispersa, ou seja, não há concentração de sub-bacias com características semelhantes, como ilustrado na Figura 9.

A bacia do Rio Piracicaba possui grande diversidade na ocupação do seu território, desde áreas nativas, de lavouras, pastagens e áreas urbanizadas (Figura 10). As áreas que possuem matas e florestas naturais ou plantadas estão distribuídas ao longo de toda a área da bacia, sendo mais expressivas nas regiões norte, centro-norte, oeste e sudoeste. As pastagens podem ser observadas na região oeste, região central, região centro-norte e região centro-sul da bacia.

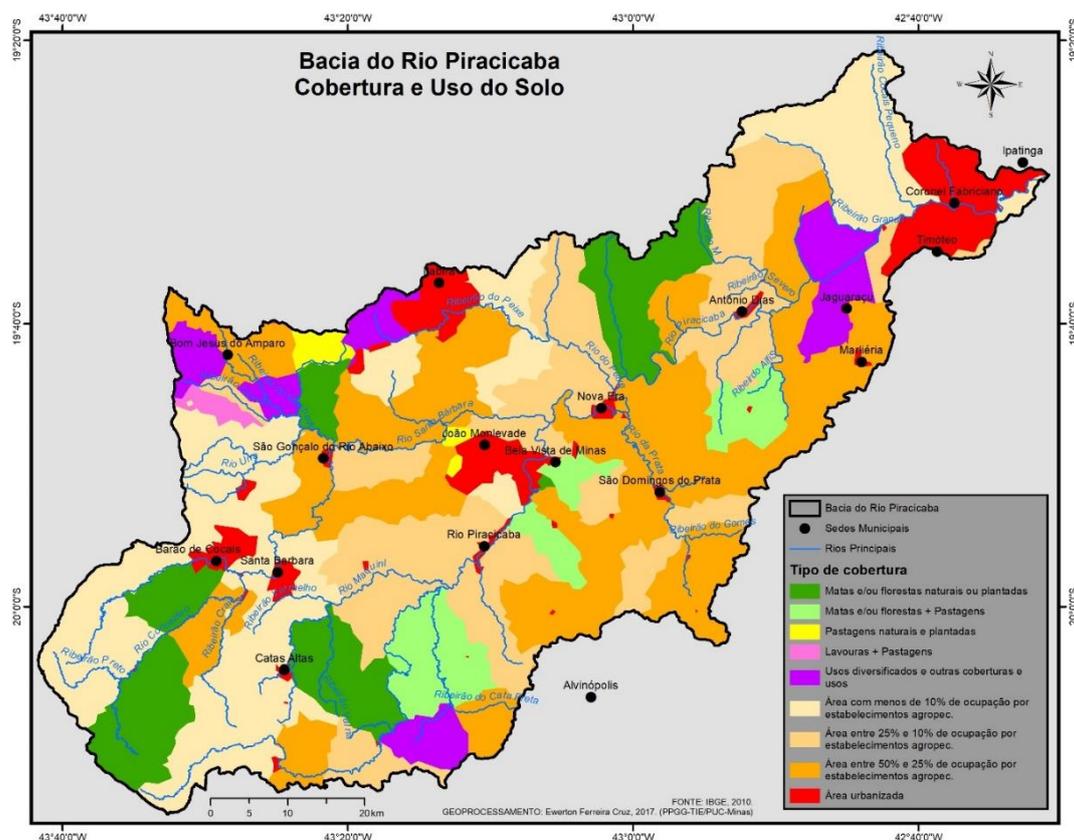
Já as áreas urbanizadas estão restritas à região central, região centro-oeste, centro-norte, e a maior área no extremo-sul da bacia, no município de Coronel Fabriciano, Timóteo e Ipatinga. A maior parte da bacia é ocupada por estabelecimentos agropecuários, com destaque para as áreas de 25 a 50% de ocupação por esses estabelecimentos, localizados principalmente nas regiões centro-oeste e centro-leste da bacia.

**Figura 9.** Mapa da distância média do interflúvio por microbacia inserida na bacia do Rio Piracicaba.



Fonte: Do autor

Figura 10. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Rio Piracicaba.



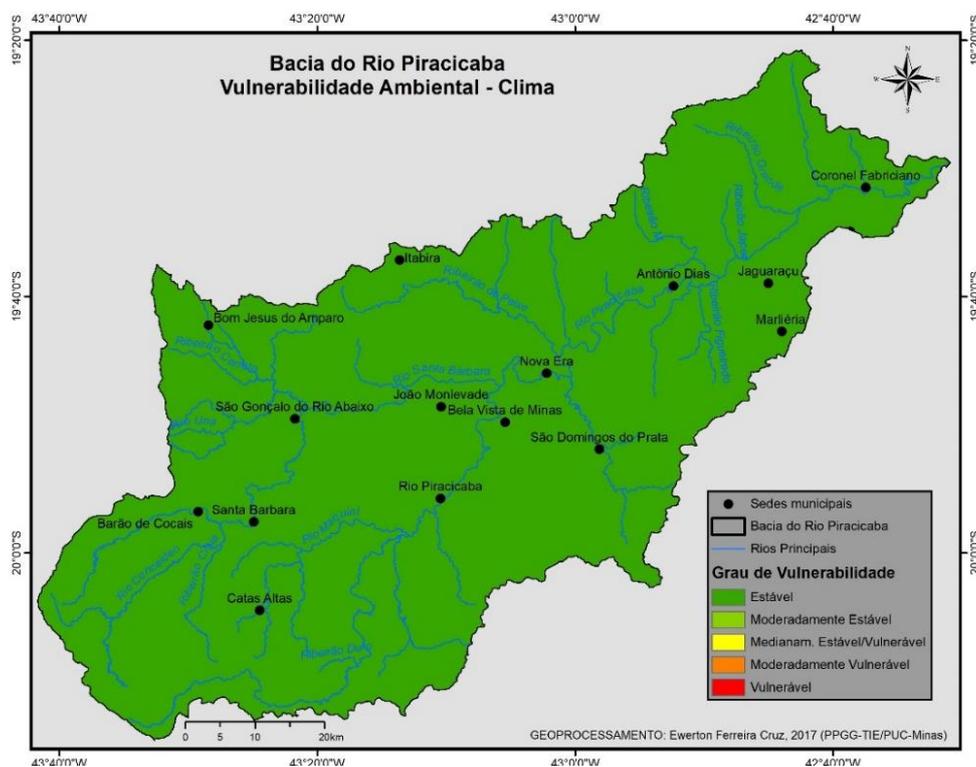
## Resultados e discussões

Antes apresentar a vulnerabilidade à perda de solos da Bacia do Rio Piracicaba é necessário apresentar os resultados intermediários: as vulnerabilidades ambientais em relação ao clima, à geologia, à geomorfologia, à pedologia e à cobertura do solo. É importante ressaltar que houve uma generalização da variável clima. Foi utilizada, para fins de caracterização, apenas a pluviosidade média anual, pois existem poucas estações meteorológicas na bacia. Estações próximas podem não representar sua dinâmica climática. Por esse motivo, para a variável clima, a bacia foi caracterizada como estável (Figura 11).

Deve-se esclarecer que o detalhamento das condições climáticas e a análise combinada de variáveis como temperatura, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica, por exemplo, poderia trazer maiores esclarecimentos sobre a dinâmica ambiental local e formação da suscetibilidade à perda de solos. Estudos climatológicos em escala de maior detalhamento (MOREIRA, 2002; FERNANDES, 2021) mostraram, entre outras coisas, a potencialização da precipitação em áreas de exposição à circulação predominante (vertentes de barlavento) e/ou decréscimo em vertentes de sotavento. Além disso, espera-se prováveis modificações dos

efeitos do intemperismo físico pelas variações de temperatura. Todos estes fatores, em projeção sobre a superfície, poderão interferir na vulnerabilidade à perda de solos, mas, deverão ser objeto de novos estudos e a proposição de modelos de maior acurácia.

Figura 11. Mapa de vulnerabilidade ambiental da Bacia do Rio Piracicaba em relação ao Clima.



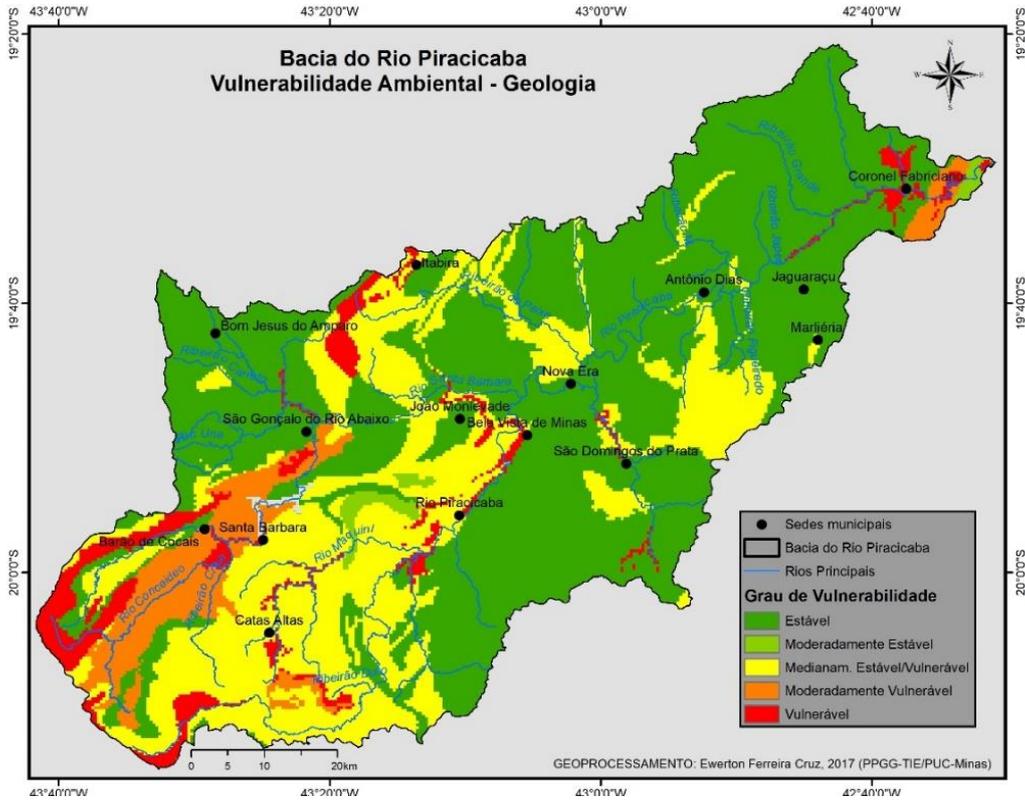
Fonte: Dos autores

Em relação à vulnerabilidade ambiental em relação à geologia (Figura 12), percebe-se que na região sul da bacia estão localizadas as áreas mais vulneráveis. A vulnerabilidade dessa região está associada ao dolomito e à sedimentos inconsolidados que são classificadas como vulnerável; arenitos que são classificadas como moderadamente vulneráveis e; filitos e xistos classificados como medianamente estável/vulnerável. A região central e norte da bacia é classificada como estável por possuir gnaisses. Percebe-se ainda que na porção noroeste é possível identificar áreas vulneráveis e medianamente vulneráveis por causa da presença de areias e cascalhos.

Em relação à vulnerabilidade ambiental em relação ao tipo de solo (Figura 13), percebe-se que na região sul da bacia estão localizadas as áreas mais vulneráveis. O grau de vulnerabilidade está associado à presença de neossolos litólicos e afloramento rochosos (classificados como vulneráveis) e cambissolos (classificados como moderadamente vulneráveis). Em praticamente todo o território da bacia há presença de latossolos, por esse motivo, a maior parte da bacia [é classificada como estável. Já na porção noroeste percebe-se uma área classificada como medianamente estável/moderado. Essa classificação está associada à presença de argissolos.

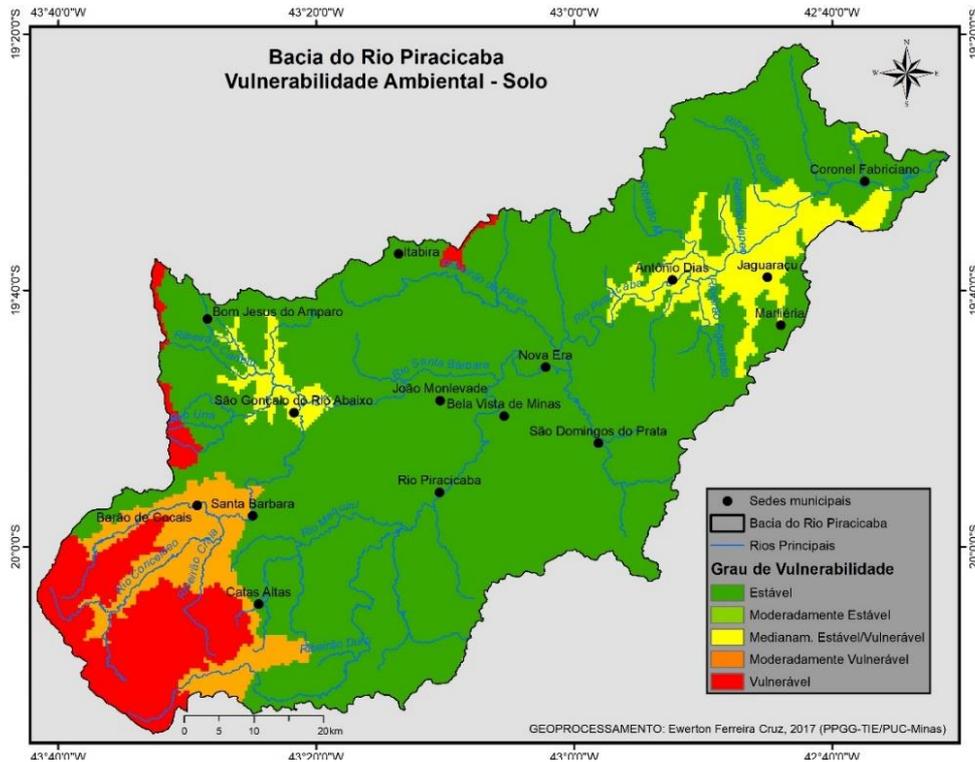


Figura 12. Mapa de vulnerabilidade ambiental solos da Bacia do Rio Piracicaba em relação à Geologia.



Fonte: Dos autores

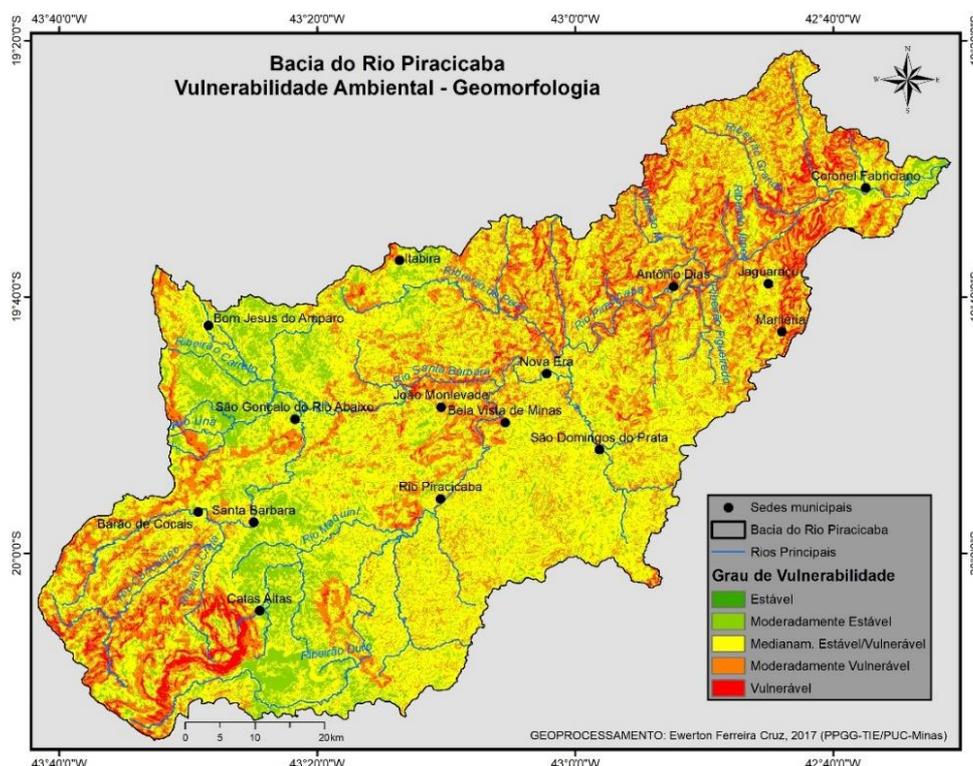
Figura 13. Mapa de vulnerabilidade ambiental da Bacia do Rio Piracicaba em relação ao tipo de solo



Fonte: Dos autores

Já a vulnerabilidade ambiental em relação à geomorfologia (Figura 14), percebe-se que na região sul e norte da bacia estão localizadas as áreas mais vulneráveis. O grau de vulnerabilidade está associado à alta declividade e amplitude altimétrica dessas regiões. Em praticamente todo o território da bacia a declividade varia entre 6 a 50%. Essa característica, juntamente com a amplitude altimétrica e a distância média do interflúvio, faz com que a maior parte da bacia seja classificada como medianamente estável/vulnerável com pequenas áreas classificadas como moderadamente vulnerável em razão da distância média do interflúvio.

Figura 14. Mapa de vulnerabilidade ambiental da Bacia do Rio Piracicaba à Geomorfologia



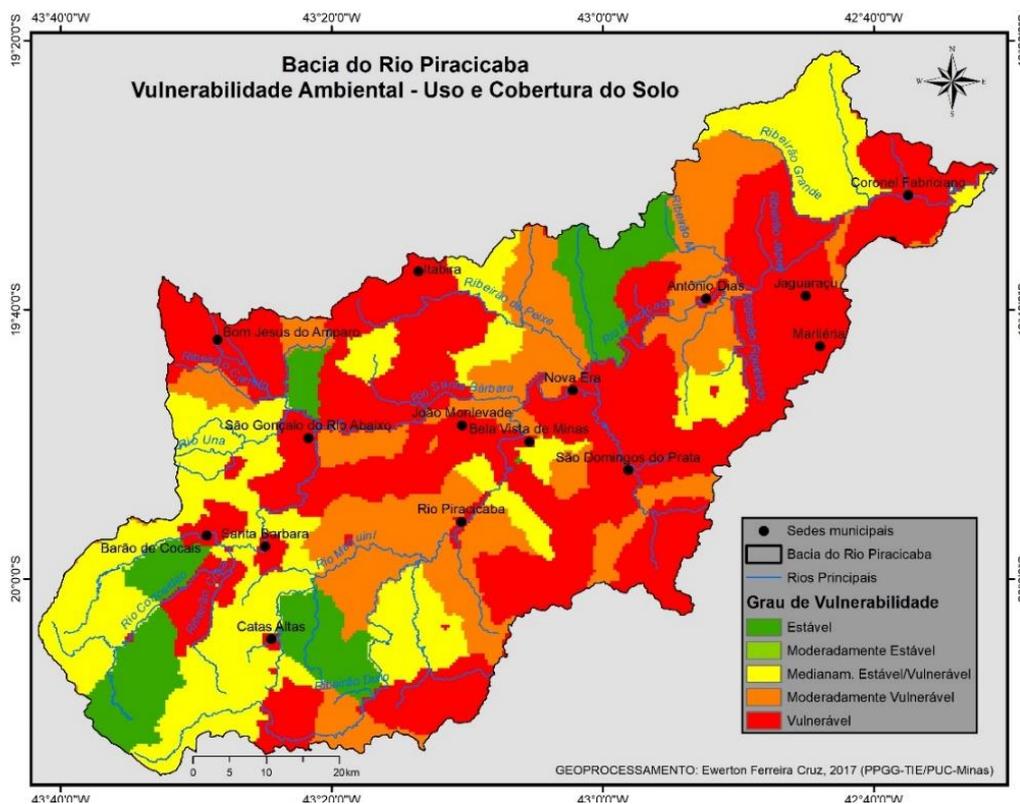
Fonte: Dos autores

Por fim, a variável uso e cobertura do solo apresentou, em grande parte da bacia, áreas consideradas como vulneráveis (Figura 15). Essa classificação está associada a presença de estabelecimentos agropecuários (de 25 a 50% da área) bem como áreas urbanas. Deve-se ainda destacar que, em relação à cobertura do solo, é possível identificar áreas estáveis em decorrência da presença de matas e/ou florestas naturais ou plantadas. Destaca-se ainda que, essas áreas estáveis estão localizadas na porção mais meridional da bacia, onde estão as principais nascentes.

Os resultados deste estudo indicaram que a bacia apresenta áreas estáveis a moderadamente vulneráveis (Figura 16). Percebe-se, através da Figura 16, que, ao sul da bacia, estão localizadas as áreas classificadas como moderadamente vulneráveis. Essa característica decorre dos litotipos que compõem essa região: meta-renitos e metapelitos, pois são classificados como moderadamente vulneráveis (Figura 12). Entende-se que o

metamorfismo torna as rochas a ele expostas tendam a ser mais resistentes que suas contrapartes sedimentares. Melhor subsídio para essa discussão poderá ser apontado a partir da compreensão das especificidades locais dos processos de metamorfização ao qual as rochas foram submetidas (um evento apenas, em pulsos, etc.).

Figura 15. Mapa de vulnerabilidade ambiental da Bacia do Rio Piracicaba em relação ao Uso e Cobertura do Solo

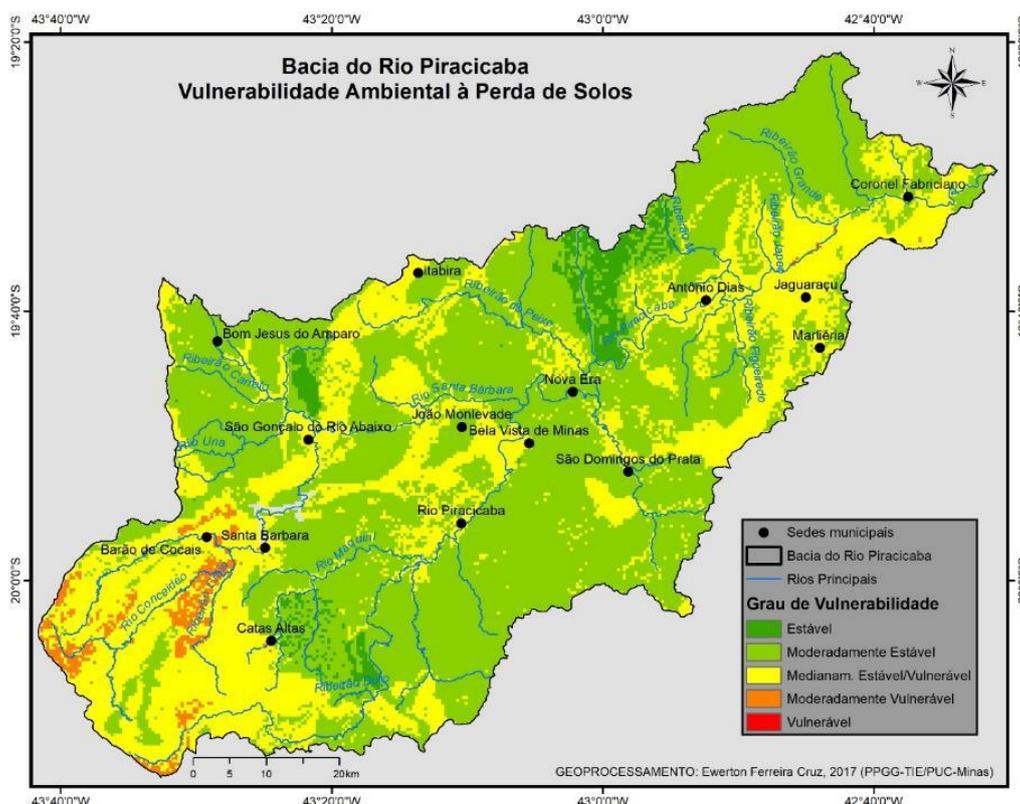


Fonte: Dos autores

O tipo de solo também influencia a classificação final (Figura 13). Do ponto de vista pedológico, a porção meridional possui solos classificados como neossolos litólicos, que são classificados como moderadamente vulneráveis (Figura 2) por serem pouco evoluídos e possuem a camada orgânica de pouca espessura e horizonte B diagnóstico. Outra característica importante a ser considerada é geomorfologia (Figura 14), principalmente em relação à declividade, a porção sul, em grande parte, é classificada como moderadamente vulnerável, possuindo declividade compreendida entre 20 e 50%.

A porção central da bacia foi caracterizada como moderadamente estável e medianamente estável/vulnerável à perda de solos (Figura 16). Pode-se perceber que esta classificação é principalmente decorrente dos litotipos que ali estão localizados, e do tipo predominante de solo (Latosolo vermelho-amarelo). Todavia, em relação ao tipo de uso e cobertura, a parte central é classificada como vulnerável, por possuir áreas urbanizadas ou com alto índice (25 a 50%) de ocupação por estabelecimentos agropecuários (Figura 15).

Figura 16. Mapa de vulnerabilidade ambiental à perda de solos Bacia do Rio Piracicaba



Fonte: Dos autores

No centro-oeste da bacia é caracterizada como estável e medianamente estável/vulnerável, pois possui grande diversidade dos aspectos físicos. Todavia, como se pode notar através das figuras 12, 13 e 14, predominam aí: geologia (litologia: gnaiss granítico e biotita granito); tipo de solo (latossolo vermelho-amarelo) e geomorfologia caracterizados como estáveis. Todavia, em relação ao uso e cobertura do solo (Figura 15), a porção centro-oeste possui áreas urbanizadas e outras classificadas como vulneráveis e parte de matas e/ou florestas que são classificadas como estáveis.

### Considerações Finais

A principal contribuição deste estudo foi a geração do mapa de vulnerabilidade ambiental, que poderá ser utilizado como subsídio para a gestão da bacia do Rio Piracicaba. Além disso, deve-se ressaltar que a metodologia de vulnerabilidade ambiental à perda de solos integra de diferentes características do meio físico, ajudando no processo de tomada de decisão. A integração de diferentes variáveis para a descrição da paisagem ou da região se remete às bases da Geografia, principalmente da escola da Geografia Clássica, através do conceito de paisagem. Essa característica é fundamental para a realização de estudos verdadeiramente geográficos. Assim como pontua Moreira (2015), através de uma abordagem sistêmica, foi possível articular elementos diversos, principalmente através da utilização de modelos computacionais.



O método utilizado para identificação das áreas-fonte de material sedimentar da bacia do Rio Piracicaba foi o modelo adaptado de vulnerabilidade ambiental à perda de solos. A adaptação consistiu na substituição das características da cobertura florestal pelos tipos de uso e cobertura do solo. Essa troca se justificou pela forte antropização da bacia, o que dificultava a aplicação do modelo original utilizado por Crepani *et al.* (2001). Os resultados evidenciaram que, assim como o modelo original, o modelo adaptado pode ser utilizado como instrumento de planejamento territorial, ao mesmo tempo que demanda e pode subsidiar estudos complementares para a redução do fornecimento de sedimentos carreáveis para os rios. A utilização dos Sistemas de Informação Geográfica é fundamental para execução de análises multicriteriais do funcionamento do ambiente. Ela permite a inclusão de várias informações cartográficas em um único mapa, integráveis através da álgebra de mapas. Destaque-se ainda que, apesar do modelo adaptado a partir de Crepani *et al.* (2001) ora proposto, ser julgado meritório, ele poderá apresentar ainda melhores resultados quando subsidiado por bases cartográficas de maior detalhamento e estas, por seu turno, por novas pesquisas de base. Isso minimizaria erros, melhorando, portanto, a acurácia das análises.

Os resultados obtidos indicaram uma concentração de áreas medianamente estáveis/vulneráveis na região sul da bacia, bem como na região noroeste. Eles indicaram que essas áreas são estratégicas para a adoção de medidas de manejo e gestão para a contenção de material sedimentar. O manejo adequado do território pode contribuir para evitar o assoreamento do curso d'água principal da bacia. Ressalta-se ainda que, dada a posição à montante das áreas com maior potencial para perda de solos, é fundamental que, para além do manejo, políticas públicas de uso e ocupação da bacia sejam revistas ou criadas para a minimização de riscos relacionados à dinâmica hídrica.

Finalmente, ressalta-se que, em geral, o modelo identificou que áreas moderadamente vulneráveis ocupam um pequeno total percentual do território da bacia. Não obstante, os usos do solo e a sua gestão devem ser pensados e planejados a partir dos princípios da totalidade e da unidade dos sistemas, apontando-se suas vulnerabilidades e potencialidades. A presença de áreas ainda dotadas de expressiva vegetação nativa pode se tornar um importante recurso para a recuperação de áreas degradadas e a proteção dos recursos hídricos regionais, especialmente em se considerando a realidade ambiental da bacia do rio Doce, da qual o Piracicaba é componente.

### Agradecimentos

À CAPES pela bolsa de pesquisa no período de março/2016 a fevereiro/2018.

### Referências bibliográficas

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1999. 236 p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. **Mapa geológico do Brasil**. 2004. Disponível em: <https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>. Acesso em: 5 jan. 2017.



CREPANI, E. ; MEDEIROS, J. S.; HERNADEZ FILHO, P. ; FLORENZANO, T. G. ; DUARTE, V. , BARBOSA, C. C. F. B. **Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001. 124 p.

CRUZ, L. P. **Avaliação do Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto. 2009. 139 p.

EMBRAPA - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa-SCI, 2006, 2 ed. 306 p. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/downloads/sistema-brasileiro-de-classificacao-dos-solos2006.pdf>. Acesso em 10 ago. 2017.

FACHIN, O. **Fundamentos de metodologia**. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2003. 200 p.

FERNANDES, A.S.. **A climatologia do Quadrilátero Ferrífero e a influência da orografia das serras do centro-sul de Minas Gerais**. 2021. 211 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

GOMES, P. C. C. **Geografia e Modernidade**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1996. 366 p.

HEILBRON, M. et. al. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI; A.Celso D. R. C.; NEVES, B. B. B. (Org.). **Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. 1ªed.São Paulo: Beca Produções Culturais Ltda., 2004, v. I, p. 203-234.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015, 430 p. 3 ed. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv95017.pdf>. Acesso em: 2 Ago. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra**. 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?edicao=16023&t=downloads>. Acesso em: 5 jan. 2017.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Piracicaba- PARH Piracicaba**. Consórcio ECOPLAN Engenharia e LUME Estratégia Ambiental. Maio de 2010. 100 p. Disponível em: [http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2015/01/PARH\\_Piracicaba.pdf](http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2015/01/PARH_Piracicaba.pdf) . Acesso em: 5 jan. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Normais Climatológicas do Brasil**. 2017. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais> . Acesso em: 5 jan. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Imagem SRTM**. 2016. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/> . Acesso em: 5 jan. 2017.

MOREIRA, J. L. B. **Estudo da distribuição espacial das chuvas em Belo Horizonte e em seu entorno**. 2002. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

SILVA, I. F. L. **Contribuições para o diagnóstico ambiental da parte média e inferior da bacia do rio Piracicaba – MG**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação Engenharia Ambiental. 2010. 105 p.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977. 91 p.

UHLEIN, A.; OLIVEIRA, H. A. História geológica do Quadrilátero Ferrífero. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro: 2000, v.27, n.160, p. 68-71.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. 2011. Disponível em: [https://www.dps.ufv.br/?page\\_id=742](https://www.dps.ufv.br/?page_id=742). Acesso em: 5 jan. 2017.