

SUSCETIBILIDADE EROSIVA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRACURUCA, SITUADA ENTRE OS ESTADOS DO CEARÁ E DO PIAUÍ

EROSIVE SUSCETIBILITY OF THE PIRACURUCA RIVER HYDROGRAPHIC BASIN, SITUATED BETWEEN THE STATES OF CEARÁ AND PIAUÍ

Francílio de Amorim dos SANTOS¹

Resumo: A pesquisa teve como objetivo avaliar a suscetibilidade erosiva da Bacia Hidrográfica do rio Piracuruca, considerando a litologia, a declividade média do relevo, a erosividade das chuvas, a erodibilidade dos solos e o índice de vegetação ajustado ao solo. O estudo é uma pesquisa quantitativo-qualitativa, descritivo e que empregou levantamento cartográfico junto a diversos órgãos governamentais, para obtenção de arquivos matriciais, vetoriais e alfanuméricos, para montagem de banco de dados. Ressalta-se que a integração dessas informações ocorreu via Sistema de Informação Geográfica (SIG) *ArcGIS*, onde se definiu notas e pesos para as variáveis ambientais elencadas. Os resultados apontaram o predomínio de: litologia com alta suscetibilidade a processos erosivos em 68,8%, que está associado aos siltitos, argilitos e folhelhos; relevo plano (muito baixa suscetibilidade) por 58,4%; erosividade moderada com ocorrência em 60,7%; erodibilidade muito alta em 59,8%; moderada suscetibilidade da vegetação frequente em 49,1% da área da Bacia estudada. Essas variáveis quando integradas apontaram preponderância da classe baixa de suscetibilidade erosiva, que ocorre por 51,7% da área da Bacia do rio Piracuruca. Enquanto as demais classes de suscetibilidade apresentaram a seguinte distribuição: moderada (35,3%), muito baixa (6,8%), alta (6,2%). O estudo apresentou informações relevantes e que devem dar suporte a estudos futuros e subsidiar a elaboração de planejamentos territoriais para uso das terras, considerando as potencialidades e as limitações da paisagem da Bacia do rio Piracuruca.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica, Indicadores ambientais, Álgebra de mapas, Índice.

Abstract: The research aimed to evaluate the erosive susceptibility of the Piracuruca River Basin, considering the lithology, the average slope of the relief, the erosivity of the rains, the erodibility of the soils and the vegetation index adjusted to the soil. The study is a quantitative-qualitative, descriptive research that used a cartographic survey with several government agencies, to obtain matrix, vector and alphanumeric files, to assemble a database. It is noteworthy that the integration of this information occurred via the Geographic Information System (GIS) *ArcGIS*, where notes and weights were defined for the listed environmental variables. The results showed the predominance of: lithology with high susceptibility to erosive processes in 68.8%, which is associated with siltstones, claystones and shales; flat relief (very low susceptibility) by 58.4%; moderate erosivity, occurring in 60.7%; very high erodibility in 59.8%; moderate susceptibility of vegetation frequent in 49.1% of the studied basin area. These variables, when integrated, showed a preponderance of the low class of erosive susceptibility, which occurs in 51.7% of the area of the Piracuruca River Basin. While the other susceptibility classes had the following distribution: moderate (35.3%), very low (6.8%), high (6.2%). The study presented relevant information that should support future studies and support the preparation of territorial plans for land use, considering the potential and limitations of the landscape of the Piracuruca River Basin.

Keywords: Hydrographic basin, Environmental indicators, Map algebra, Index.

¹Doutor e Pós-Doutor em Geografia. Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI) / Campus Piriapiri, Piauí, Brasil. E-mail: francilio.amorim@ifpi.edu.br.

Introdução

O Nordeste do Brasil (NEB) constitui uma região marcada por distintas peculiaridades geoambientais, particularmente relevo rebaixado, clima tropical com algumas variações, grande quantidade de rios intermitentes, distintos mosaicos de solos e coberturas vegetais com fisionomias diferenciadas, com destaque para aquela adaptada ao clima seco.

A abordagem sistêmica apresenta-se, dessa forma, como possibilidade metodológica de fundamental importância para realização de estudos ambientais integrados e, como tal, identificação de riscos potenciais dos diferentes espaços geográficos e subsidiando o planejamento ambiental. Ross (2009) desataca a necessidade em entender tanto as potencialidades dos recursos como, também, as humanas e, ainda, as fragilidades dos sistemas ambientais naturais e socioculturais das sociedades humanas.

Ressalta-se que as características ambientais dessa região quando integradas exibem suscetibilidades erosivas diferentes. Entenda-se suscetibilidade como a propensão que determinada área possui em ser afetada por um processo perigoso, por tempo indeterminado (LOMBARDO; FREITAS, 2013). Bitar (2014) complementa ao afirmar que a suscetibilidade diz respeito à predisposição dos terrenos frente ao desenvolvimento de um fenômeno ou processo do meio físico.

É importante a realização de estudos ambientais tendo como recorte espacial a bacia hidrográfica, considerada como um sistema aberto. Destaca-se que a bacia hidrográfica pode ser entendida como uma área compreendida por um território e por diversos cursos d'água (ANA, 2011). Ao passo que o sistema é entendido, por Camargo (2012), como um elemento interativo, integrador e que com evolução diacrônica, buscando uma totalidade.

Nesse contexto, reconhece-se a bacia como relevante recorte espacial para estudos ambientais e, como tal, apresenta importante perspectiva para conhecimento dos componentes ambientais e para a elaboração de planejamento ambiental. Nesse contexto, Bastos e Peulvast (2016) asseveram que técnicas de geoprocessamento associadas às metodologias de mapeamentos da suscetibilidade, tiveram grande desenvolvimento nas últimas décadas, possibilitando a implementação de políticas públicas.

O estudo realizado representa uma pesquisa descritiva quando ao seu objetivo, principalmente por ter como proposta o conhecimento das características ambientais e sua, respectiva, integração. Para tal demandou levantamento bibliográfico e cartográfico, sendo que esse último será realizado em diversos bancos de dados de sites governamentais essencial.

Posteriormente, essas informações foram organizadas e manuseadas no Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS, versão 2.14.

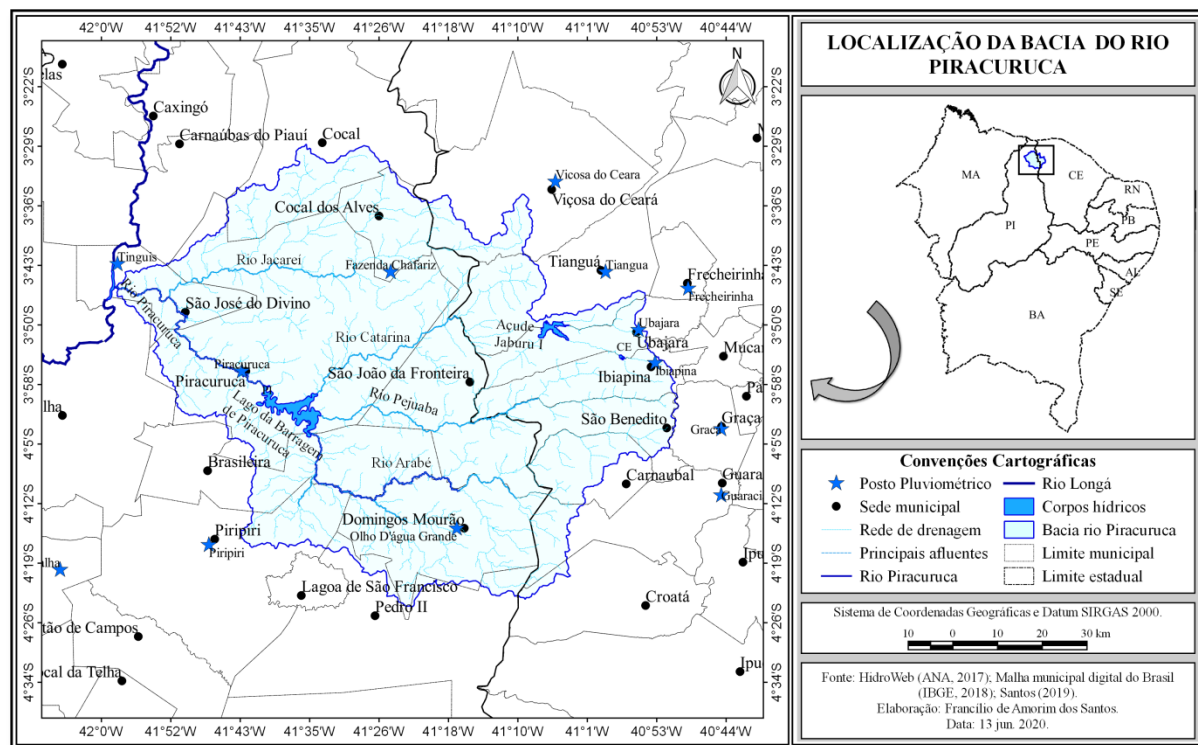
Frente o exposto, acima, o estudo torna-se de suma relevância, quando se considera a possibilidade para geração de conhecimentos, de forma sistêmica, acerca da Bacia do rio Piracuruca. Nesse sentido, o estudo se propôs a avaliar a suscetibilidade erosiva da Bacia Hidrográfica do rio Piracuruca, considerando a litologia, a declividade média do relevo, a erosividade das chuvas, a erodibilidade dos solos e o índice de vegetação ajustado ao solo.

A área em estudo

A Bacia do rio Piracuruca está localizada na região Nordeste do Brasil, especificamente na divisa dos estados do Ceará e do Piauí. A referida bacia está situada na região semiárida do Nordeste do Brasil (NEB), compreendendo uma área de 7.704 km². As principais nascentes do rio principal, o rio Piracuruca, nasce no Planalto da Ibiapaba, a altura do município de São Benedito, estado do Ceará, e na Serra dos Matões, município de Pedro II, estado do Piauí. O rio Piracuruca deságua no rio Longá a altura do município de São José do Divino, estado do Piauí. A bacia, supracitada, abrange áreas de 20 municípios, sendo que 11 desses estão localizados em território piauiense e 9 no estado do Ceará (Figura 1)

A BHRP está assentada sobre as seguintes formações geológicas, cujas características estão expostas no Quadro 1: Serra Grande, Pimenteiras, Cabeças, Longá, Sardinha e Depósitos Colúvio-Eluviais. A área estudada está sob a influência do Planalto da Ibiapaba, que apresenta topo plano, vertentes íngremes e altitudes que ultrapassam os 900 m. Destaca-se que esse Planalto apresenta marcas de festonamento em suas bordas, fruto da dissecação oriunda da rede de drenagem consequente, com decaimento no sentido do estado do Piauí. A Bacia do rio Piracuruca classifica-se, de acordo com a proposta de Strahler (1952), como sendo de 6^a ordem (SANTOS, 2019).

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do rio Piracuruca, divisa dos estados do Ceará e do Piauí, Nordeste do Brasil.



Fonte: (ANA, 2017); IBGE (2018); Santos (2019).

Quadro 1 - Características geológicas da Sub-bacia Hidrográfica do rio Piracuruca.

Era	Período	Formação	Litologia	%
Cenozoica	Neógeno	Depósitos Colúvio-Eluviais	Sedimentos arenosos, areno-argilosos e conglomeráticos.	12,6
Mesozoico	Cretáceo	Sardinha	Basaltos e diabásios.	4,9
Paleozoica	Devoniano	Longá	Folhelhos e arenitos.	0,1
		Cabeças	Arenitos e siltitos.	21,8
		Pimenteiras	Folhelhos com intercalações de arenitos e siltitos.	23,6
	Siluriano	Grupo Serra Grande	Conglomerados, arenitos e intercalações de siltitos e folhelhos.	37,0

Fonte: BRASIL (1973); CPRM (2006a; 2006b; 2006c); PFALTZGRAFF, TORRES e BRANDÃO (2010).

O principal sistema provedor de chuvas na BHRP é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), cujo posicionamento está associado aos fenômenos oceânicos *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) e Dipolo do Atlântico, que resulta na ocorrência das anomalias pluviométricas interanuais. O estudo de Santos (2019) apontou que a Bacia exibe as seguintes

características médias anuais: precipitação da ordem de 860 a 1.710 mm; temperaturas de 20 a 27°C; 1 a 7 meses secos; perda de água por evapotranspiração potencial da ordem de 903 a 1.643 mm; excedente hídrico situado entre 100 a 1.000 mm; déficit hídrico com 0 a 730 mm.

Os processos pedogenéticos originaram onze subordens de solos (INDE, 2018), quais sejam: Argissolo Amarelo, Argissolo Vermelho, Chernossolo Argilúvico, Gleissolo Melânico, Latossolo Amarelo, Neossolo Litólico, Neossolo Quartzarênico, Planossolo Háplico, Plintossolo Argilúvico, Plintossolo Pétrico, Vertissolo Ebânico. Esses solos possibilitaram o desenvolvimento de cobertura vegetal distinta, onde se tem no platô do Planalto da Ibiapaba vegetação de grande porte (mata plúvio-nebular). Devido às condições climáticas e edáficas a cobertura vai modificando-se em direção ao estado do Piauí variando de mata seca, ao complexo vegetacional carrasco e a caatinga arbórea e arbustiva (SANTOS, 2019).

As condições ambientais descritas possibilitam o desenvolvimento de diversas atividades humanas na Bacia, a saber: extração vegetal, principalmente de fibras, ceras, madeira e oleaginosas; lavoura permanente, com produção de abacate, banana, café, castanha-de-caju, coco-da-baía, goiaba, laranja, limão, mamão, manga, maracujá, tangerina e urucum; lavoura temporária voltada ao cultivo de amendoim, arroz, batata-doce, cana-de-açúcar, fava, feijão, mandioca, melancia, milho, soja, tomate; pecuária, onde se destaca a aquicultura, mel de abelha e criação de gado bovino, caprino, galináceo, ovino, suíno (IBGE, 2020).

Materiais e métodos

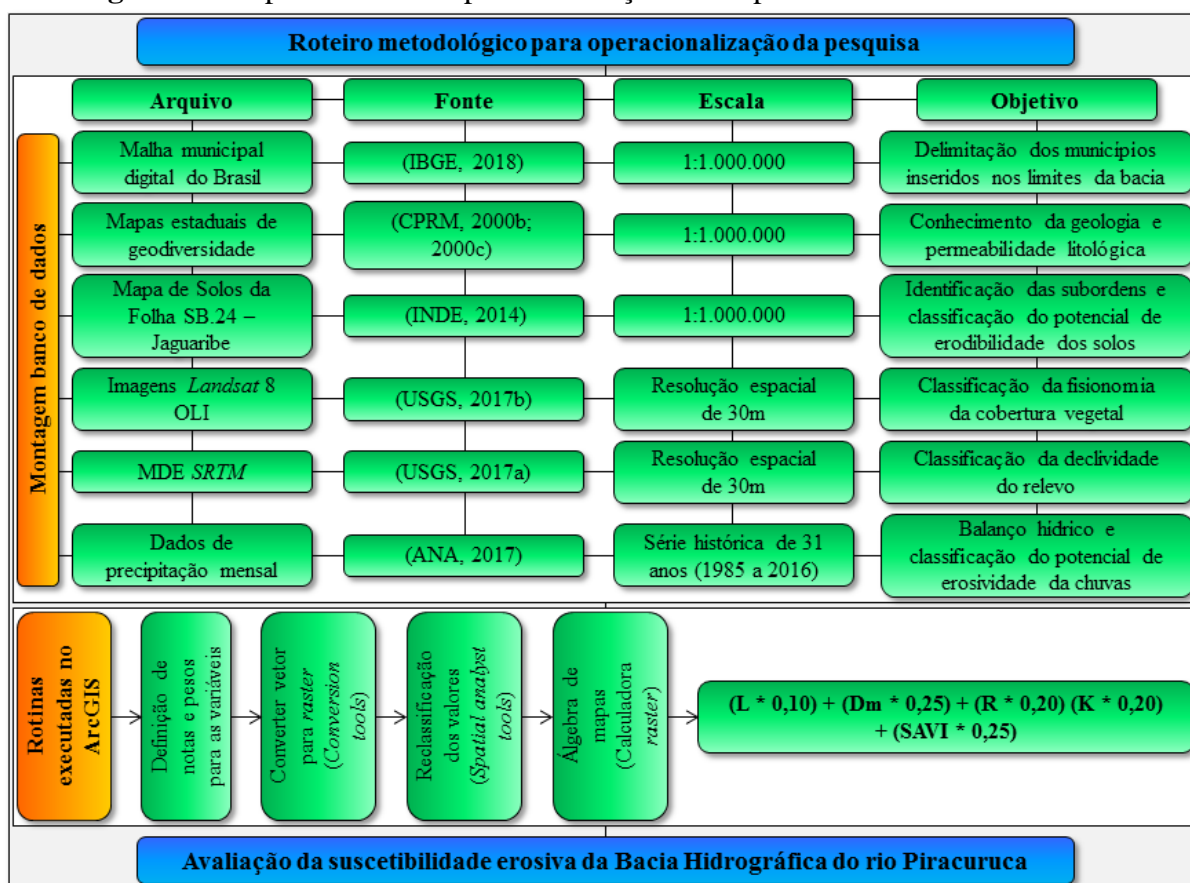
A pesquisa constitui um estudo quantitativo-qualitativo, notadamente pela quantificação realizada na coleta dos dados e, posterior, organização, análise e interpretação. O estudo classifica-se como descritivo, tendo em vista que buscou compreender a inter-relação das variáveis ambientais litologia, declividade média, erosividade das chuvas, erodibilidade dos solos e índice de vegetação ajustado ao solo, integrados por meio do índice de suscetibilidade erosiva.

Para operacionalização do estudo foi realizado, inicialmente, levantamento bibliográfico acerca dos principais conceitos utilizados no estudo, fato que permitiu também confrontar os resultados desse estudo com a literatura pertinente. Posteriormente, foi essencial a efetivação de levantamento cartográfico junto a diversos órgãos governamentais, para obtenção de arquivos matriciais, vetoriais e alfanuméricos, para montagem de banco de dados,

no Sistema de Informação Geográfica (SIG) *ArcGIS*, cuja licença foi adquirida pelo Instituto Federal do Piauí / *Campus* Piripiri.

A pesquisa empregou a proposta metodológica elaborada por Santos e Aquino (2017), cuja área estudada mantém semelhanças com a Bacia do rio Piracuruca, particularmente por estar localizada no semiárido do Nordeste do Brasil. A Figura 2 apresenta uma síntese das etapas executadas para a elaboração do mapa de suscetibilidade erosiva para a Bacia em questão. A metodologia proposta define notas e pesos para as variáveis ambientais elencadas – litologia, declividade média do relevo, erosividade das chuvas, erodibilidade dos solos e índice de vegetação ajustado ao solo – que variaram de 0 a 100% (0 a 1), diferenciando o grau de importância de cada variável e sua contribuição para a compreensão da suscetibilidade erosiva da Bacia do rio Piracuruca.

Figura 2 - Etapas executadas para elaboração do mapa de suscetibilidade erosiva.



Fonte: Adaptado de Santos e Aquino (2017).

A proposta metodológica alicerça-se sobre a abordagem sistêmica, logo se buscou realizar uma análise baseada na integração de variáveis ambientais, considerando a Equação

1. Ressalta-se que, de acordo com Santos e Aquino (2017), quanto maior for o valor obtido para cada variável, mais alta será a suscetibilidade aos processos erosivos e vice-versa; ao passo que foram atribuídos pesos a cada variável, a partir do seu nível de contribuição para ocorrência de suscetibilidade erosiva na Bacia do rio Piracuruca.

$$ISE = [(L * 0,10) + (DM * 0,25) + (R * 0,20) + (K * 0,20) + (SAVI * 0,25)] \quad (1)$$

Onde:

ISE = Índice de Suscetibilidade Erosiva;

L = Litologia;

DM = Declividade média do relevo;

R = Erosividade das chuvas;

K = Erodibilidade dos solos;

SAVI = Índice de Vegetação Ajustado ao Solo.

Posteriormente, à execução da álgebra de mapas com emprego da técnica de soma ponderada, foi realizada a divisão em quatro classes, com intervalos iguais, de suscetibilidade erosiva, conforme está exposto na Tabela 1.

Tabela 1 - Intervalos e classes de suscetibilidade erosiva.

Intervalos	Classes de suscetibilidade erosiva
1,45 - 2,19	Muito Baixa
2,20 - 2,94	Baixa
2,95 - 3,69	Moderada
3,70 - 4,45	Alta

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

As variáveis ambientais, que compuseram o índice de suscetibilidade erosiva, os arquivos vetoriais e matriciais obtidos, bem como os procedimentos técnicos utilizados para seu manuseio serão mais bem detalhadas a seguir.

Litologia

Essa variável possibilitou a estimativa da resistência das rochas da Bacia do rio Piracuruca aos processos de intemperismo, para tal foi necessária à aquisição de arquivo vetorial referente à geodiversidade do estado do Ceará e do Piauí, em escala 1:1.000.000, junto ao banco de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2006b; 2006c). Foram delimitadas quatro classes para a variável litologia, conforme proposta metodológica de Oliveira (2011) e adaptações realizadas por Santos e Aquino (2017), conforme se pode observar na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipologia litológica, notas e classes de suscetibilidade erosiva.

Tipologia litológica	Notas	Classe de suscetibilidade
Basalto e diabásio	1	Muito Baixa
Arenitos	3	Moderada
Siltitos e argilitos, folhelhos	4	Alta
Sedimentos arenosos, areno-argilosos e conglomeráticos.	5	Muito Alta

Fonte: Oliveira (2011). Adaptado por Santos e Aquino (2017).

Declividade média do relevo (Dm)

O conhecimento do nível de inclinação do relevo é essencial, particularmente quando se fala em escoamento superficial da água e, ainda, como perspectiva para o desenvolvimento de atividades humanas, a exemplo da agropecuária. Logo, foi adquirido arquivo matricial do Modelo Digital de Elevação (MDE), resolução espacial de 30 metros, da missão *Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)*, via banco de dados do *United States Geological Survey (USGS)*. Para a definição das classes de declividade considerou-se a proposta da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2009), como está exposto na Tabela 3.

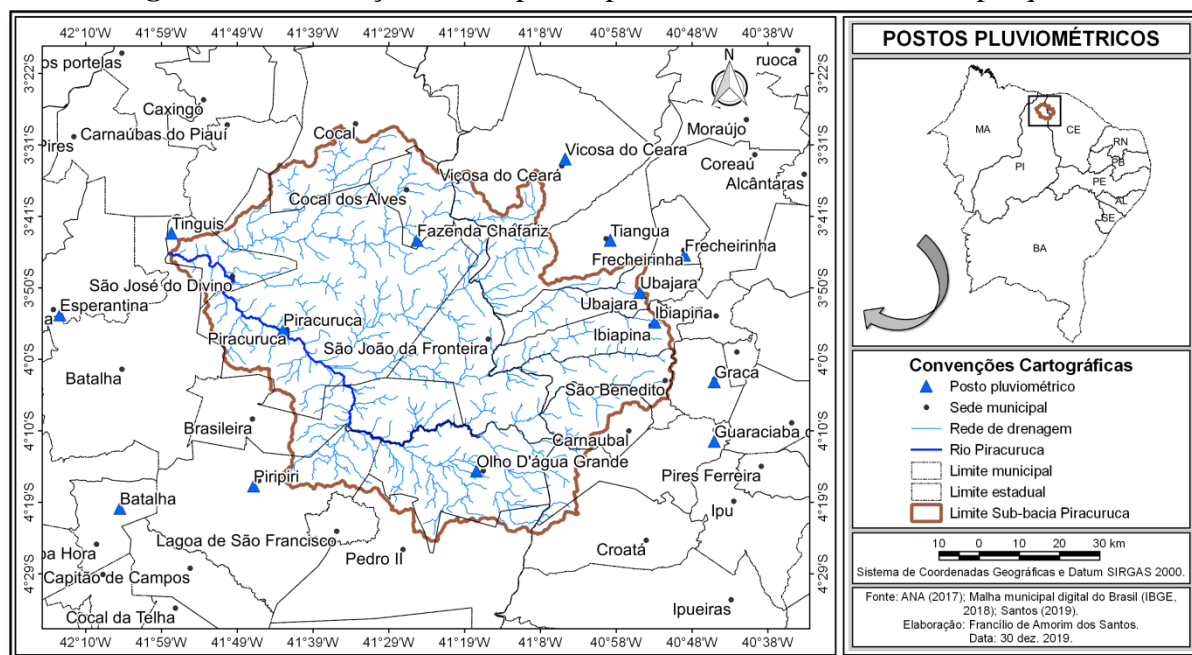
Tabela 3 - Intervalos e classes de declividade média do relevo (Dm), notas e classes de suscetibilidade erosiva.

Intervalos de Dm (%)	Classes de relevo	Notas	Classes de suscetibilidade
0 a 3	Plano	1	Muito baixa
3 a 8	Suave Ondulado	2	Baixa
8 a 20	Ondulado	3	Moderada
20 a 45	Forte Ondulado	4	Alta
45 a 75	Montanhoso	5	Muito alta

Fonte: EMBRAPA (2009). Adaptado por Santos e Aquino (2017).

Erosividade das chuvas (R)

Essa variável está ligada ao potencial da chuva em causar desprendimento dos sedimentos do solo, nesse estudo realizado por meio de método indireto. Foram adquiridos dados de quatorze postos pluviométricos (Figura 3), junto ao Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWEB), da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), considerando o período de 32 anos (1985 a 2016).

Figura 3 - Localização dos 14 postos pluviométricos utilizados na pesquisa.

Fonte: ANA (2017).

Os dados alfanuméricos de precipitação foram organizados e as falhas na série histórica foram corrigidas por meio da técnica de ponderação regional proposta por Tucci (1993) associado a rotinas executadas no pacote de programas USUAIS, conforme propõem Oliveira e Sales (2016), cujas etapas são descritas abaixo:

- 1) CRIATEMP: criação de arquivo para cada posto pluviométrico;
- 2) CRIACHUV: utilizada para inserção e gravação dos dados de precipitação média mensal da série histórica de os 32 anos;
- 3) EROSIV: geração dos valores médios de erosividade das chuvas.

Posteriormente, a execução desses procedimentos foi possível aplicar a Equação 2, conforme propõem Lombardi Neto e Moldenhauer (1992). Essa equação estima com relativa precisão os valores de erosividade para longos períodos e baseia-se em regressão linear entre o índice médio mensal de erosão e o coeficiente de chuva.

$$E = 67,355 (r^2/P)^{0,85} \quad (2)$$

Onde:

E = média mensal do índice de erosão (t/ha.mm/h);

r = precipitação média mensal em mm;

P = precipitação média anual em mm.

Os valores resultantes da equação 2 foram organizados e espacializados por meio das ferramentas do SIG *ArcGIS* e emprego do método de interpolação IDW (peso pelo inverso da distância). O produto dessa espacialização foi reclassificado, via ferramenta *analyst spatial tools* e função *reclassify*, gerando cinco classes (Tabela 4).

Tabela 4 - Intervalos de erosividade das chuvas (R) com classes de suscetibilidade erosiva correspondentes a cada nota.

Amplitude de R (MJ.mm/ha.h.ano)	Classe de Suscetibilidade	Notas
6162,4 a 6795,8	Muito Baixa	1
6795,9 a 7429,3	Baixa	2
7429,4 a 8062,7	Moderada	3
8062,8 a 8696,2	Alta	4
8696,3 a 9329,6	Muito Alta	5

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Erodibilidade dos solos (K)

Inicialmente, é importante dizer que a erodibilidade dos solos está ligada aos diferentes potenciais que cada solo apresenta em erodirem-se, conforme suas características. Para estimar esse potencial foi obtido arquivo vetorial dos solos da Folha SB.24 - Jaguaribe, em escala 1:250.000, via banco de dados da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE, 2014). Posteriormente, foi utilizada a metodologia proposta por Crepani *et al.* (2001), que estimou as classes de erodibilidade a partir do nível de desenvolvimento ou maturidade dos solos, que no estudo resultou em quatro classes (Tabela 5).

Tabela 5 - Intervalos de erodibilidade dos solos (K), notas e respectivas classes de suscetibilidade erosiva.

Ordens de solos	Notas	Classe de suscetibilidade
Latossolos, Argissolos (Amarelo e Vermelho)	2	Baixa
Chernossolos, Planossolos	3	Moderada
Gleissolos, Plintossolos e Vertissolos	4	Alta
Neossolo (Litólico e Quartzarênico)	5	Muito Alta

Fonte: Crepani *et al.* (2001). Adaptado pelos autores (2020).

Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI)

A vegetação exerce papel crucial na redução dos processos erosivos, reduz a temperatura ambiente ao absorver parte da radiação solar, reduz a energia cinética das gotas de chuva e, como tal, processos como a lixiviação. Logo, essa variável possibilitou estimar a fisionomia da cobertura vegetal e seu, respectivo, nível de proteção oferecida aos solos. Desse modo, foram obtidas imagens via satélite *Landsat 8 OLI*, junto ao banco de dados do *USGS*. As imagens possuem as seguintes características: órbita/ponto 219/62 e 219/63 e data de passagem de 08/08/2016; órbita/ponto 218/63 e data de passagem de 01/08/2016.

Essas imagens passaram por processos de conversão dos níveis de cinza da imagem (NC) para radiância espectral e, em seguida, para valores de radiância para refletância, posteriormente foi realizada a correção atmosférica. Realizados esses procedimentos foi possível aplicar a equação 3 do SAVI. Esse índice, conforme atestam Boratto e Gomide (2013), analisa os efeitos do solo exposto nas cenas estudadas, a partir do ajuste do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) quando a superfície não está totalmente recoberta pela vegetação.

$$SAVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R + L)} * (1 + L) \quad (3)$$

Onde:

L corresponde a uma constante chamada de fator de ajuste do índice SAVI, que nesse estudo assumiu o valor de 0,5, aplicado à vegetação com densidade intermediária.

O produto da equação 3 foi reclassificado por meio da ferramenta *analyst spatial tools* e função *reclassify*, do SIG *ArcGIS*, que resultou em seis classes, mas para o índice final de suscetibilidade considerou-se apenas cinco classes, conforme está exposto na Tabela 6.

Tabela 6 - Intervalos do SAVI, classes de vegetação, notas e respectivas classes de suscetibilidade erosiva.

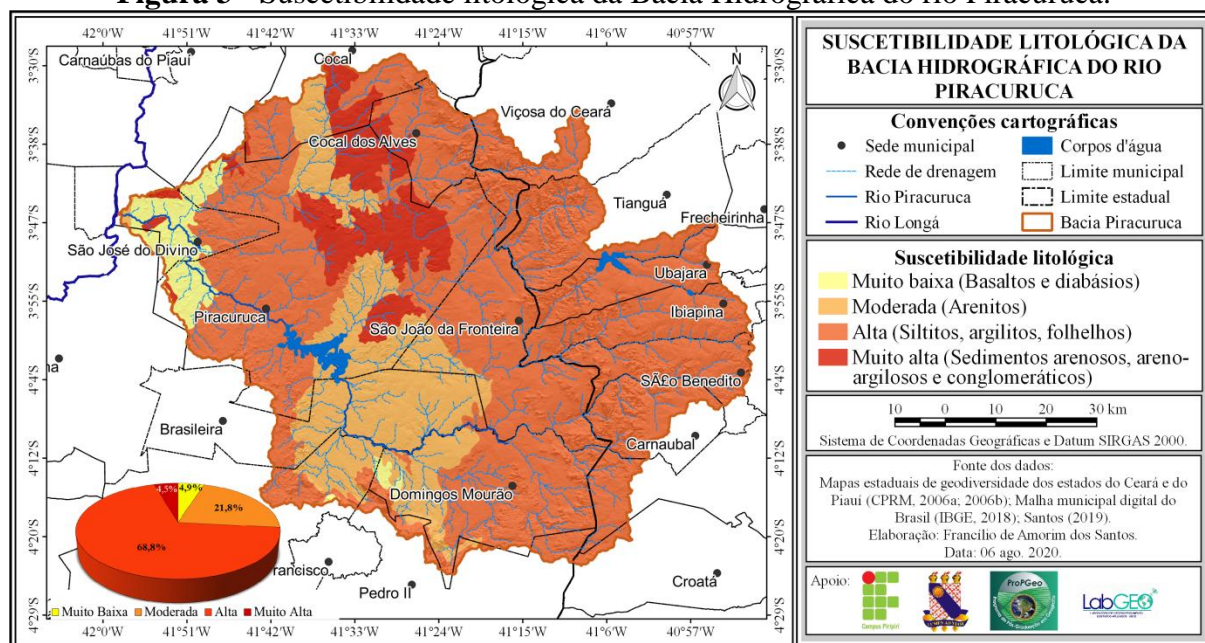
Intervalos do SAVI	Classes de vegetação	Notas	Classes de suscetibilidade
0,6 a 0,8	Vegetação com alta atividade fotossintética	1	Muito Baixa
0,4 a 0,6	Vegetação com média atividade fotossintética	2	Baixa
0,2 a 0,4	Vegetação com baixa atividade fotossintética	3	Moderada
0,1 a 0,2	Área urbana/Vegetação com muito baixa atividade fotossintética	4	Alta
0 a 0,1	Solo exposto	5	Muito alta
< 0,1	Corpo hídrico	-	-

Fonte: Santos e Aquino (2017). Adaptado pelo autor (2020).

Resultados e discussão

O conhecimento da resistência das rochas é essencial para entendimento da suscetibilidade da área estudada a processos de dissecação e/ou atividades intempéries. Na Bacia do rio Piracuruca predomina litologia de alta suscetibilidade a processos erosivos (Figura 3), distribuindo-se por 68,8% da Bacia estudada, principalmente na parte centro-leste. As referidas rochas estão ligadas aos siltitos, argilitos e folhelhos, que em termos de processos de dissecação esses tipos de rochas apresentam natureza friável e mais sujeita a sedimentação resultante dos agentes exógenos.

Figura 3 - Suscetibilidade litológica da Bacia Hidrográfica do rio Piracuruca.

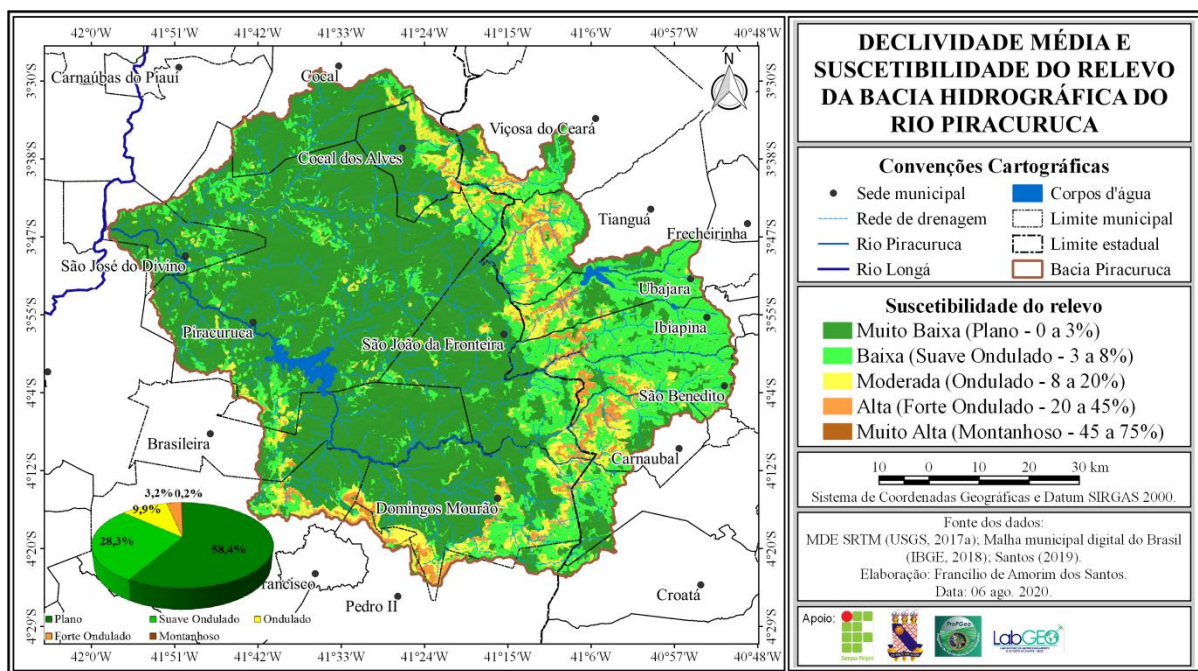


Fonte: CPRM (2006a; 2006b); IBGE (2018); Santos (2019).

A segunda classe de rochas mais suscetível a processos erosivos diz respeito à classe moderada, que se distribui por 21,8% da Bacia em análise, que são representadas pelos arenitos, que, de acordo com Penteadó (1983), tendem a reduzir o escoamento superficial, pois são permeáveis. Por sua vez, a classe muito baixa suscetibilidade litológica distribui-se por 4,9% da Bacia, particularmente situado próximo à foz do rio Piracuruca, sendo representado pelos basaltos e diabásios, que exibem maior coerência que as demais rochas encontradas na área e, como tal, maior resistência aos processos areolares (PENTEADO, 1983). Por seu turno, a classe muito alta de suscetibilidade litológica – constituída pelos sedimentos arenosos, areno-argilosos e conglomeráticos – foi identificada em 4,5% da Bacia e devido a sua baixa coesão demonstram alta suscetibilidade ao ataque dos agentes erosivos.

Para Ross (1993), o conhecimento da classe de declividade de determinada área possibilita inferir o vigor dos processos erosivos, risco de escorregamento e inundações. Lima, Passos e Sales (2019) complementam ao dizer que a compreensão do relevo das bacias possibilita avaliar a influência empreendida pelas encostas sobre o escoamento superficial das águas. Na Bacia do rio Piracuruca prevalece o relevo plano, que se distribui por 58,4% da área (Figura 4), o que possibilita o desenvolvimento de diversas atividades agropecuárias. Mas, reduz o potencial de escoamento superficial, predispondo a área a processos de inundações.

Figura 4 - Declividade média e suscetibilidade do relevo da Bacia Hidrográfica do rio Piracuruca.



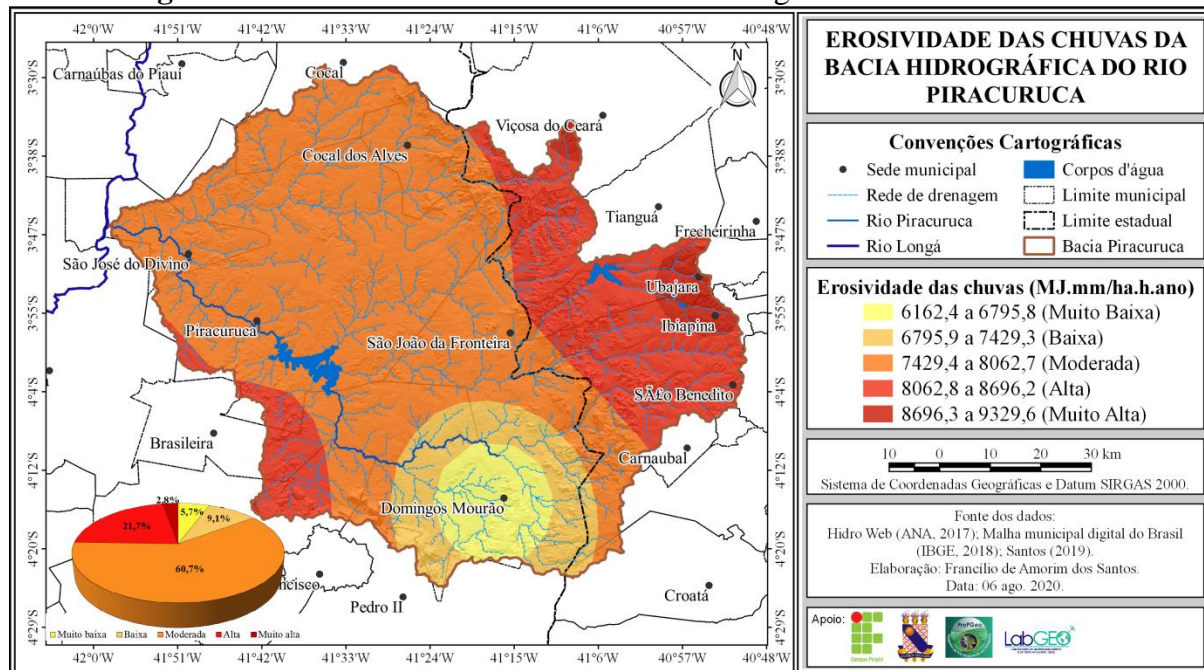
Fonte: USGS (2017a); IBGE (2018); Santos (2019).

A classe de suscetibilidade baixa do relevo é frequente em 28,3% da Bacia estudada, identificada principalmente no setor cearense da bacia, no reverso do Planalto da Ibiapaba, que também está sujeita a processos inundatórios. Por sua vez, as classes moderada, alta e muito alta identificados em 9,9%, 3,2% e 0,2% da Bacia estão situadas na transição do platô do Planalto da Ibiapaba para a área mais escarpada, que está mais sujeita a processos de escorregamentos e dissecação da rede de drenagem consequente.

A erosividade é causada principalmente pela intensidade das chuvas e, como tal, demanda conhecimento acerca dos aspectos pluviométricos da área atingida (RABELO; GIRÃO; ARAÚJO, 2018), como possibilidade para redução e/ou mitigação dos efeitos danosos das precipitações em áreas com baixa proteção da cobertura vegetal ou solo exposto.

Desse modo, na Figura 5 observa-se a predominância da classe de erosividade moderada, que se distribui por 60,7% da Bacia pesquisada, principalmente na área central.

Figura 5 - Erosividade das chuvas da Bacia Hidrográfica do rio Piracuruca.



Fonte: ANA (2017); IBGE (2018); Santos (2019).

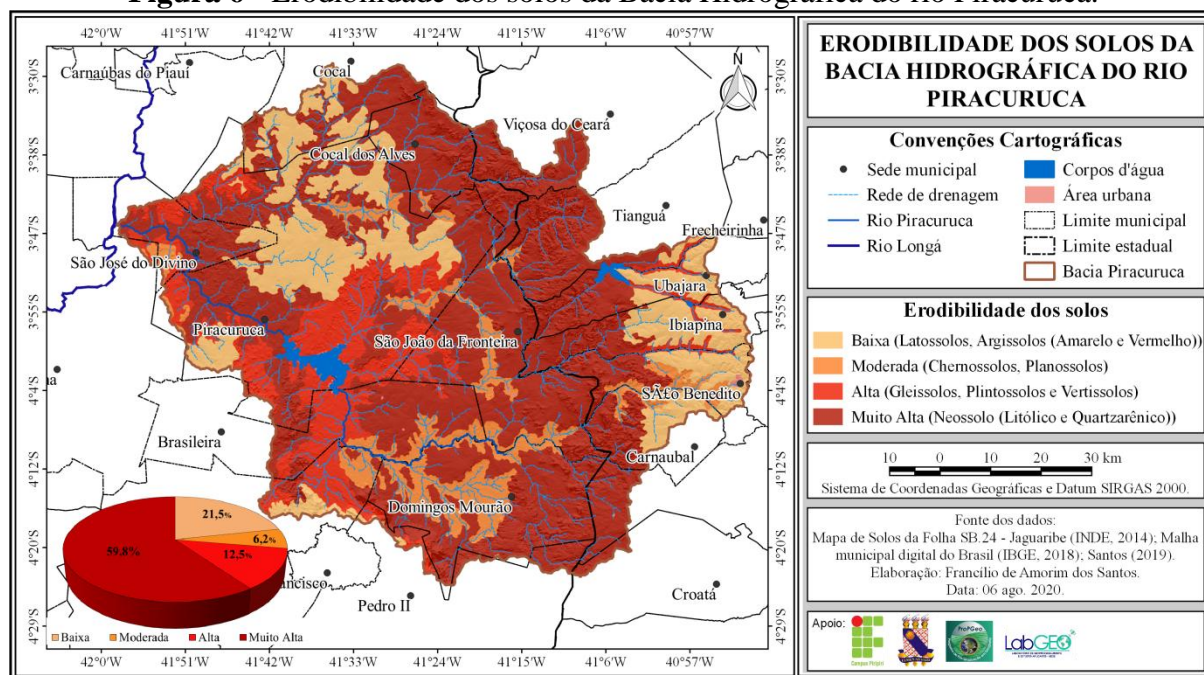
Por sua vez, as classes de erosividade alta (setor cearense, topo do Planalto da Ibiapaba, e trecho sudoeste) e muito alta (setor sudoeste) ocorrem, respectivamente, por 21,7% e 2,8% da Bacia estudada. Ao passo que as classes de erosividade baixa e muito baixa dispersam-se por 9,1% e 5,7% da Bacia, localizando-se no trecho sul. Ressalta-se que a extensão da área estudada e o seu relevo, particularmente o Planalto da Ibiapaba, explicam a variação dos níveis de erosividade, cujos valores mais altos ocorrem no trecho mais chuvoso, que diz respeito ao topo do referido Planalto. Tais resultados assemelham-se aos do estudo de Rabelo, Girão e Araújo (2018), que ao estudar a erosividade da chuva na bacia hidrográfica do rio Seridó (RN/PB) indicaram que suas dimensões (cerca de 10.000 km²) e as condições geomorfológicas da bacia influenciaram na variação do fator Erosividade.

A erodibilidade dos solos está associada ao potencial natural que os solos apresentam para erodirem-se com diferentes taxas, considerando suas propriedades e usos (BELTRAME, 1994), de tal modo que o conhecimento desse parâmetro tornou-se essencial para estimar a suscetibilidade erosiva da Bacia do rio Piracuruca, principalmente para reduzir os efeitos danosos dos usos inadequados. Na Figura 6 pode-se visualizar o predomínio da classe de erodibilidade muito alta, que se estende por 59,8% da área pesquisada, e deve-se à expressiva

presença dos Neossolos (Litólico e Quartzarênico), que constituem solos pouco desenvolvidos e mal drenados, logo de fácil desprendimento e bastante suscetível a processos erosivos.

Por sua vez, a classe de erodibilidade baixa ocorreu por 21,5% da Bacia estudada, estando associada à presença de Latossolos e Argissolos, principalmente no topo do Planalto da Ibiapaba e noroeste da área estudada. Esses solos por serem mais desenvolvidos, de maior profundidade e de melhor drenagem em relação aos demais, estando ainda em áreas planas exibem menor suscetibilidade à erosão. Os resultados assemelham-se ao estudo de Moraes e Sales (2017), para a Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, estado do Piauí, pois esses autores apontaram que algumas subordens de Argissolos e Latossolos apresentaram muito baixo potencial de erodibilidade.

Figura 6 - Erodibilidade dos solos da Bacia Hidrográfica do rio Piracuruca.

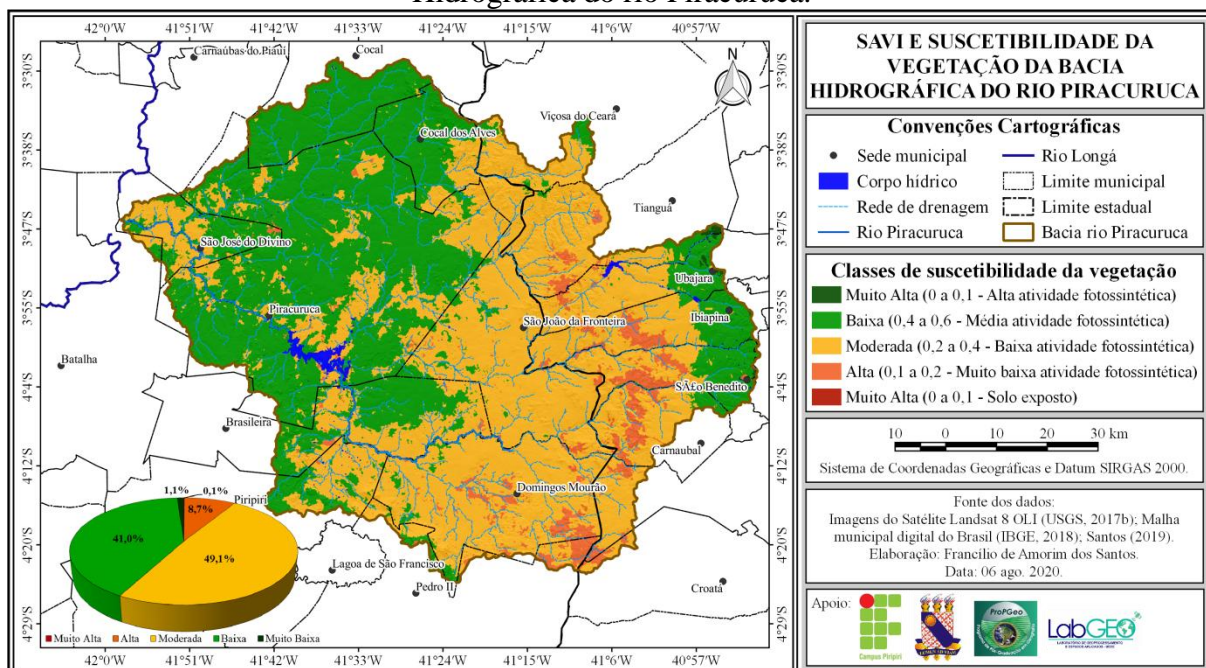


Fonte: INDE (2014); IBGE (2018); Santos (2019).

Por seu turno, as classes de erodibilidade alta (Gleissolos, Plintossolos e Vertissolos) e moderada (Chernossolos e Planossolos), foram identificadas em 12,5% e 6,2%, respectivamente, estando situados principalmente no setor centro-sul da Bacia. A classe alta diz respeito a solos situados em áreas alagáveis da Bacia, enquanto a classe moderada constitui solos localizados em áreas planas e pouco movimentadas, fato que justifica as diferenças em seus potenciais de erodibilidade.

A presença da cobertura vegetal apresenta grande relevância como elemento protetor e atenuador dos processos erosivos, fato que levou Tricart (1977) a afirmar que a vegetação reduz a erosão pluvial e, como tal, o regime hídrico, pois intercepta as precipitações e fornece detritos vegetais à superfície. Nesse sentido, ressalta-se que na Bacia do rio Piracuruca predomina a classe moderada de suscetibilidade da vegetação, que se distribuiu por 49,1% da área estudada, encontrada na transição das vertentes do Planalto da Ibiapaba para as áreas mais deprimidas (Figura 7). A presença dessa vegetação de porte médio deve-se, principalmente à mudança das condições edáficas, com relevo mais inclinado, aspectos climáticos tendendo a ser mais seco e a presença de solos mais rasos. Esse tipo de vegetação, que estaria ligado ao porte arbustivo, foi identificado em 34,89% da Bacia do rio Paraíba do Meio, conforme estudo de Ramos *et al.* (2016).

Figura 7 - Índice de vegetação ajustado ao solo e suscetibilidade da vegetação da Bacia Hidrográfica do rio Piracuruca.



Fonte: USGS (2017b); IBGE (2018); Santos (2019).

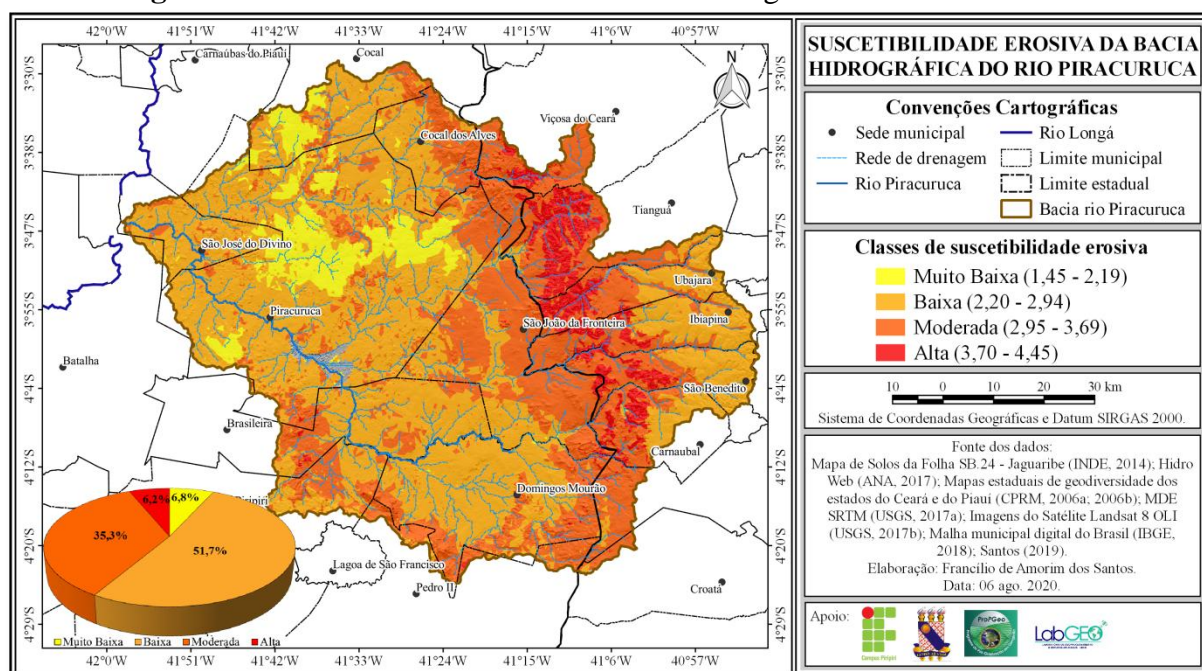
Por sua vez, a classe baixa suscetibilidade da vegetação esteve presente em 41,0% da área da Bacia, principalmente no trecho centro-oeste e em parte do platô do Planalto da Ibiapaba, destacando-se sua presença às margens dos principais cursos hídricos do baixo e médio vale da Bacia. Por seu turno, a classe alta de suscetibilidade da vegetação, identificada em 8,7% da área pesquisada, estando situada nas vertentes do Planalto da Ibiapaba, possivelmente fruto da associação dessa cobertura vegetal ao relevo íngreme e solos jovens e rasos. As classes muito baixa (1,1%) e muito alta (0,1%) de suscetibilidade da vegetação

forma encontradas, principalmente, no platô do Planalto e próximo ao lago da barragem de Piracuruca, respectivamente.

Ressalta-se que essa dinâmica da vegetação é fruto, principalmente das características dos solos e condicionantes climáticos, onde se tem um topo de Planalto com solos mais desenvolvidos e aspectos climáticos menos rigorosos, em detrimento de solos mais jovens e rasos e condições climáticas mais severas nas áreas rebaixadas, que resulta em diferentes proteções desses solos ao longo da Bacia pesquisada.

A integração das variáveis ambientais, acima, descritas e analisadas possibilitou a geração do mapa de suscetibilidade erosiva da Bacia do rio Piracuruca (Figura 8), por meio do emprego de soma ponderada. Desse modo, observa-se que na Bacia em questão predomina baixa suscetibilidade erosiva (Figura 9B), ocorrendo por 51,7% da área pesquisada, localizada principalmente no setor centro-oeste da Bacia. Tal fato pode está associado ao predomínio de relevo com muito baixa suscetibilidade, erosividade das chuvas moderada e cobertura vegetal com moderada suscetibilidade.

Figura 8 - Suscetibilidade erosiva da Bacia Hidrográfica do rio Piracuruca.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A classe moderada de suscetibilidade erosiva ocorreu em 35,3% da Bacia do rio Piracuruca (Figura 9C), principalmente na transição das bordas do Planalto da Ibiapaba para as áreas rebaixadas, que pode está ligado a litologia com alta suscetibilidade a processos

erosivos, relevo suave ondulado a ondulado, moderada a alta erosividade, erodibilidade muito alta, vegetação de moderada suscetibilidade. Por sua vez, em 6,2% da Bacia do rio Piracuruca ocorre suscetibilidade alta (Figura 9D), situada nas vertentes do Planalto da Ibiapaba, área com relevo íngreme, alta erodibilidade, solos jovens e rasos, recobertos vegetação de baixo porte e/ou estão expostos. A classe de muito baixa suscetibilidade erosiva foi identificada por 6,8% da área estudada (Figura 9A), onde se encontra litologia com moderada suscetibilidade, relevo plano, erosividade moderada, baixa erodibilidade e vegetação arbórea.

Figura 9 - Mosaico de imagens para ilustrar as classes de suscetibilidade erosiva da Bacia Hidrográfica do rio Piracuruca. Em A: muito baixa suscetibilidade erosiva; Em B: baixa suscetibilidade erosiva; Em C: moderada suscetibilidade erosiva; Em D: alta suscetibilidade erosiva.



Fonte: Arquivo do autor (2018).

Os resultados encontrados para a Bacia do rio Piracuruca, diferem dos resultados de outros trabalhos. Dentre esses o estudo de Tavares e Ferreira Neto (2017), sobre a susceptibilidade erosiva na Bacia Hidrográfica do rio Pratagy (AL), que apontou que praticamente metade da bacia (48,60%) apresentou susceptibilidade erosiva elevada, particularmente de muita à extremamente susceptível. O estudo de Santos e Aquino (2017),

por sua vez, indicou que o município de Castelo do Piauí possui suscetibilidade moderada, que se dispersa por 69,8% desse município.

Conclusões

A metodologia aplicada foi de grande relevância para conhecimento integrado da suscetibilidade erosiva da Bacia do rio Piracuruca, particularmente por ter permitido espacializar distintos elementos da paisagem. Desse modo, foi identificado que na Bacia predomina: litologia com alta suscetibilidade a processos erosivos, em 68,8% da área pesquisada; relevo plano, que se distribui por 58,4% da área estudada; erosividade moderada, frequente em 60,7% da Bacia; erodibilidade muito alta, que se estende por 59,8% da área pesquisada; moderada suscetibilidade da vegetação, que se distribuiu por 49,1% da área da Bacia estudada.

A álgebra de mapas empregado no estudo possibilitou integrar e conhecer a suscetibilidade erosiva da Bacia do rio Piracuruca, que exhibe predominância da classe baixa e ocorre por 51,7% da área estudada, principalmente no trecho centro-oeste da Bacia. Embora haja predomínio dessa classe é preciso se atentar para as demais áreas com suscetibilidade moderada a alta 41,5% da Bacia e está localizada na transição das vertentes para a área rebaixada. Tendo em vista que devem compor áreas a serem conservadas e/ou ter o uso otimizado, sob pena de desencadear processos erosivos.

As informações aqui apresentadas devem ser tomadas como ponto de partida para estudos posteriores e, ainda, como base para elaboração de planejamentos territoriais para uso das terras compatíveis com as potencialidades e limitações. Outros estudos devem ser desenvolvidos para aprofundamento das variáveis elencadas, ao passo que os governos locais e estaduais devem considerar o estudo como perspectiva para investimentos no desenvolvimento de atividades econômicas compatíveis, ao tempo que se devem estimular a criação de unidades de conservação para mitigar os efeitos da ocupação humana a área.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Hidro Web: sistema de informações hidrológicas. **Séries históricas:** 1985 a 2016. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 11 fev. 2017.

_____. **O Comitê de Bacia Hidrográfica: o que é e o que faz?** Brasília: SAG, 2011.

BASTOS, F.H.; PEULVAST, J.P. Suscetibilidade à Ocorrência de Movimentos de Massa no Maciço de Baturité-Ceará, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v.32, p.124-142, 2016.

BELTRAME, A.V. **Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas: modelo e aplicação.** Florianópolis: Ed. da UFSC, 1994.

BITAR, O.Y. (Coord.). CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000: nota técnica explicativa.** São Paulo: IPT; Brasília: CPRM, 2014.

BORATTO, I.M.P.; GOMIDE, R.L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: 2013, p.7345-7352.

CAMARGO, L.H.R. **A Geoestratégia da Natureza: a Geografia da Complexidade e a Resistência à possível Mudança do Padrão Ambiental Planetário.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. 240p.

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

INFRAESTRUTURA NACIONAL DE DADOS ESPECIAIS. **Mapa de Solos da Folha SB.24 - Jaguaribe.** Disponível em: <<http://www.visualizador.inde.gov.br/>>. 2014. Acesso em: 13 set. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Malha municipal digital do Brasil: situação em 2018.** Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 10 jun. 2019.

_____. **Cidades.** 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 01 jun. 2020.

LIMA, G.S.A.; PASSOS, J.S.; SALES, J.C. Avaliação do potencial à erosão laminar dos solos das Bacias Hidrográficas do Ribeirão Pereiras e do Córrego os Macacos (GO). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais...** Santos: INPE, 2019, p.2362-2356.

LOMBARDO, M.A.; FREITAS, M.I.C. **Riscos e vulnerabilidades: teoria e prática no contexto luso-brasileiro.** São Paulo: Cultura Acadêmica, 2013. 246p.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solos em Campinas - SP. **Bragantina**, Campinas, v. 51, nº 2, p.189-1996, 1992.

MORAIS, R.C.S.; SALES, M.C.L. Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica, **Caderno de Geografia**, v.27, p.84-105, 2017.

OLIVEIRA, J.G.B.; SALES, M.C.L. Usuais: programas para uso em análise ambiental. **Revista Equador**, Teresina, v.5, n.2, p.36-60, jan./jun. 2016.

OLIVEIRA, V.P.V. Indicadores biofísicos de desertificação, Cabo Verde/África. **Revista Mercator**, Fortaleza, v. 10, n. 22, p.147-168, mai./ago. 2011.

PENTEADO, M.M. **Fundamentos de geomorfologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1983.

RABELO, D.R.; GIRÃO, I.R.F.; ARAÚJO, J.C. Processos erosivos superficiais: o caso da erosividade da chuva na bacia hidrográfica do rio Seridó RN/PB. **REGNE**, v.4, p.45-57, 2018.

RAMOS, R.P.S.; DEUS, R.A.S.G.; ALEXANDRE, F.S.; GOMES, D.D.M.; GOLDFARB, M.C. Mapeamento e caracterização da densidade da vegetação Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Meio. **REGNE**, v.2, p.1110-1119, 2016.

ROSS, J.L.S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n.8, p.63-74, 1993.

_____. **Ecogeografia do Brasil**: subsídios para planejamento ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

SANTOS, F.A. **Resiliência ambiental a secas e a inundações na Sub-bacia Hidrográfica do rio Piracuruca (CE-PI)**. 268p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará. Fortaleza, 2019.

SANTOS, F.A.; AQUINO, C.M.S. Suscetibilidade erosiva em área suscetível à desertificação, no estado do Piauí: subsídios ao planejamento ambiental. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v.27, p.19-28, 2017.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Mapa Geológico do Estado do Piauí**. 2. ed. Teresina, 2006a.

_____. **Mapas estaduais de geodiversidade**: Ceará. Rio de Janeiro: CPRM. 2006b. Documento cartográfico em arquivo vetorial. Disponível em <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>>. Acesso em: 31 jul. 2018.

_____. **Mapas estaduais de geodiversidade**: Piauí. Rio de Janeiro: CPRM. 2006c. Documento cartográfico em arquivo vetorial. Disponível em <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>>. Acesso em: 31 jul. 2018.

STRAHLER, A.N. Hypsometric analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, Columbia, n.63, p.111-141, 1952.

TAVARES, K.A.S.; FERREIRA NETO, J. V. Mapeamento da susceptibilidade erosiva na Bacia Hidrográfica do rio Pratagy, Alagoas. **Revista Contexto Geográfico**, v.2, n.4, p. 41-50, dezembro/2017.

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

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre: Eds. da UFRGS e da USP, 1993.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Digital elevation**: SRTM 1 Arc-Second Global. 2017. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 23 nov. 2017a.

_____. **Collection**: landsat archive. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 23 nov. 2017b.

Artigo recebido em 15-08-2020

Artigo aceito para publicação em 31-07-2021