

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ELABORAÇÃO DE UM INDICADOR DE VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS

Bruna Martins da Paixão

Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, SP, Brasil

E-mail: bruna.mp@live.com

Resumo

A erosão laminar apresenta-se como um problema constante em bacias hidrográficas, gerando uma série de impactos negativos associados a degradação dos solos, os quais, a partir da influência antrópica, podem ser intensificados. Dessa forma, verifica-se a relevância de análises capazes de associar as interações entre os setores social e ambiental na busca de estratégias de conservação das bacias hidrográficas. O presente estudo apresenta uma metodologia de análise integrada de variáveis socioeconômicas e ambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu, localizada em Ibiúna (SP), por meio da elaboração de um indicador de vulnerabilidade socioambiental (IVSA). Para tal, são utilizadas geotecnologias para a aplicação da RUSLE como modelo de estimativa de perda de solo e para o mapeamento de variáveis censitárias relacionadas aos aspectos de renda e condições sanitárias dos domicílios localizados na bacia hidrográfica. Os resultados demonstram que a bacia hidrográfica apresenta o IVSA classificado como baixo de forma predominante em sua extensão. Entretanto, esse aspecto se concentra em localidades específicas, associadas aos melhores aspectos de variáveis socioeconômicas e perdas de solo anuais médias consideradas baixas. A elaboração do IVSA mostra-se como uma proposta metodológica eficaz para a análise integrada de dados físicos e socioeconômicos, os quais atuam, de forma simultânea, na modificação da paisagem.

Palavras-chave: Vulnerabilidade socioambiental; Bacias hidrográficas; RUSLE; Variáveis censitárias.

METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR ELABORATION OF AN SOCIOENVIRONMENTAL VULNERABILITY INDICATOR FOR RIVER BASINS

Abstract

The laminar erosion is an usual problem in river basins, that generates several negative impacts related to soil degradation, which can be intensified by human influence. In this sense, there is a substantial relevance about the analyzes that are capable of connect the interactions between the social and environmental sections in the search for river basins' conservation strategies. This study presents a methodology for the integrated analysis of socioeconomic and environmental variables in the Sorocabuçu River Basin, which is located in the city of Ibiúna (SP), through the elaboration of an indicator of socioenvironmental vulnerability (IVSA). To this end, geotechnologies are used to apply RUSLE as a model for estimating soil loss and to map census variables related to aspects of income and sanitary conditions of households located in the river basin. The results shows that the river basin has the IVSA classified as predominantly low in its extension. However, this feature is concentrated in specific localities, which are associated with the best aspects of socioeconomic variables and with the low average annual soil losses. The elaboration of the IVSA is shown to be an effective methodological proposal for the integrated analysis of physical and socioeconomic data, which act, simultaneously, in the modification of the landscape.

Key words: Socioenvironmental vulnerability; River basins; RUSLE; Census variables.

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE UN INDICADOR DE VULNERABILIDAD SOCIOAMBIENTAL EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Resumen

La erosión laminar se presenta como un problema constante en las cuencas hidrográficas, generando una serie de impactos negativos asociados a la degradación del suelo, que, por influencia antropogénica, pueden intensificarse. Así, se verifica la relevancia de análisis capaces de asociar las interacciones entre los sectores sociales y ambiental en la búsqueda de estrategias de conservación de cuencas. Este estudio presenta una metodología para el análisis integrado de variables socioeconómicas y ambientales en la Cuenca del Río Sorocabaçu, ubicada en Ibiúna (SP), mediante la elaboración de un indicador de vulnerabilidad socioambiental (IVSA). Para ello, se utilizan geotecnologías para aplicar RUSLE como modelo para estimar la pérdida de suelo y mapear variables censales relacionadas con aspectos de ingresos y condiciones sanitarias de los hogares ubicados en la cuenca. Los resultados demuestran que la cuenca hidrográfica tiene el IVSA clasificado como predominantemente bajo en su extensión. Sin embargo, este aspecto se concentra en localidades específicas, asociado a los mejores aspectos de las variables socioeconómicas y las pérdidas medias anuales de suelo consideradas bajas. La elaboración del IVSA se muestra como una propuesta metodológica eficaz para el análisis integrado de datos físicos y socioeconómicos, que actúan, simultáneamente, en la modificación del paisaje.

Palabras-clave: Vulnerabilidad socioambiental; Cuencas hidrográficas; RUSLE; Variables censales.

Introdução

A frequente expansão das atividades agropecuárias sem as práticas de manejo adequadas, podem ocasionar uma série de impactos ambientais negativos, associados, principalmente, às alterações diversas no ecossistema original (LIMA *et al.*, 2011; LUIZÃO *et al.*, 2006).

As alterações no uso da terra para manejos intensivos à longo prazo geram a necessidade de supressão da vegetação natural, tornando o solo sensível aos processos de degradação, como a erosão e a compactação (SAMBUICHI *et al.*, 2012; PRIMAVESI, 1990). Esses processos afetam diretamente os corpos d'água, proporcionando a sua contaminação e a alteração de sua qualidade, o que, a longo prazo, pode afetar também a saúde da população e a fauna local (SILVÉRIO *et al.*, 2012).

Uma das formas mais frequentes de degradação dos solos agrícolas brasileiros envolve a erosão hídrica, responsável pela poluição e assoreamento dos corpos d'água, influenciando na queda de produtividade agrícola e empobrecimento rural, que geram a dependência de aparatos tecnológicos para a sua contenção (TELLES *et al.*, 2013b; BALDASSARINI; NUNES, 2018).

A erosão envolve o desprendimento, o desgaste e o transporte de partículas pela ação da água, vento e gelo, incluindo o arraste gravitacional (SANTOS, 2013; VEIGA *et al.*, 1994).

Esse processo pode ocorrer de forma natural ou antrópica e envolve a desagregação, o transporte e a deposição dos sedimentos em função da atuação de fatores climáticos (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012).

A ação antrópica nos ecossistemas promove a aceleração dos processos erosivos, causando o desequilíbrio natural dos solos em diferentes escalas, como na criação de voçorocas e ravinas, na contaminação e assoreamento pelo transporte de sedimentos com agrotóxicos e no aumento da frequência de inundações (GUERRA; CUNHA, 2001).

O acúmulo de sedimentos nos corpos d'água indica que as perdas de solo ocorreram de forma expressiva, evidenciando a intensa erosão laminar, que envolve a remoção superficial do solo (DRUGOWICH, 2011). A intensidade da produção de sedimentos é influenciada diretamente pelas características fisiográficas encontradas, pelo clima e pelo uso e manejo do solo (MINELLA; MERTEN, 2011).

A quantificação da produção de sedimentos pode ocorrer por meio de modelos matemáticos de erosão do solo, os quais podem representar a ocorrência dos processos erosivos, proporcionando o planejamento de práticas de controle desses processos e as melhores formas de manejo da terra, sendo, portanto, uma importante ferramenta na avaliação e planejamento ambiental (MACHADO, 2002). Atualmente, os modelos matemáticos de erosão do solo são aplicados de forma associada às geotecnologias, que são capazes de caracterizar e analisar as paisagens em diferentes escalas, processos e padrões relacionados aos fenômenos ambientais (BUTLER; WALSH, 1998).

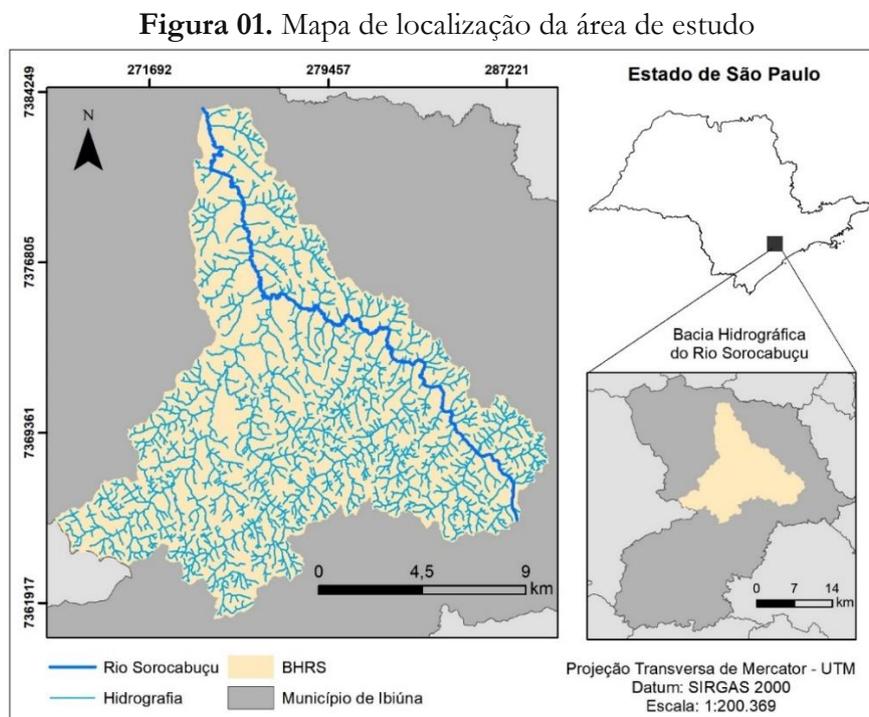
Apesar da compreensão de que os corpos d'água sofrem influência simultânea de fatores naturais, antrópicos e econômicos, a análise integrada de dados físicos e socioeconômicos para o dimensionamento dos impactos ambientais ainda é pouco explorada, evidenciando a necessidade de elaboração de novas metodologias de trabalho para a gestão e o planejamento eficiente de determinadas áreas.

Nesse sentido, este trabalho apresenta uma metodologia de análise, integrando variáveis socioeconômicas e ambientais, obtidas por meio de pesquisa secundária, tendo como área de estudo uma bacia hidrográfica com aspecto de forte interferência humana. A partir da integração das variáveis foi construído um modelo que pode ser replicado a outras bacias hidrográficas e que pode indicar a vulnerabilidade socioambiental, servindo de suporte ao desenvolvimento de práticas conservacionistas e de gestão ambiental da área de estudo.

Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu (BHRS), localizada na região centro-oeste do Estado de São Paulo (Figura 01). Possui um território de cerca de 202,68 km² e uma baixa densidade populacional, onde predominam os pequenos aglomerados rurais e as pequenas propriedades de terra com atividades agropecuárias (MAIA JÚNIOR; LOURENÇO, 2020).



Fonte: os autores.

Está inserida totalmente no município de Ibiúna, na região do Alto Sorocaba, e apresenta influência direta com importantes sistemas de represamento hídrico, responsáveis por promover o abastecimento público e a geração de energia para municípios de destaque localizados em suas proximidades (PEDRAZZI *et al.*, 2014).

Situa-se no Planalto de Ibiúna/São Roque, contendo morros elevados de topos convexos ou aguçados, os quais apresentam alto nível de suscetibilidade aos processos erosivos, principalmente na ausência de cobertura vegetal (GOUVEIA *et al.*, 2014).

A sua vegetação natural é correspondente à Floresta Ombrófila Densa, do bioma Mata Atlântica, a qual é bastante condicionada por altos índices de temperatura e precipitação (IBGE, 2021).

Metodologia

Para a construção do Indicador de Vulnerabilidade Socioambiental (IVSA) foram utilizadas as variáveis censitárias produzidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011), referentes aos aspectos sociais de renda e condições sanitárias (abastecimento de água da rede geral, esgotamento sanitário via rede geral, coleta de lixo e renda) dos domicílios localizados na bacia hidrográfica, bem como a estimativa de perda de solo por erosão laminar, obtida pelo modelo da Equação Universal da Perda de Solo Revisada - RUSLE (RENARD *et. al.*, 1997). As variáveis censitárias e a estimativa de perda de solo foram mapeadas e posteriormente reclassificadas para obtenção do Mapa de IVSA da área de estudo.

Seleção e tratamento de variáveis censitárias

As variáveis censitárias de esgotamento sanitário via rede geral, abastecimento de água da rede geral, coleta de lixo e renda foram obtidas da Malha Digital de Setores Censitários (IBGE, 2020), referente ao ano de 2010 para todo o Brasil, e a partir da ferramenta *Clip* do *software* ArcMap 10.6 (ESRI, 2017), recortada para os setores censitários pertencentes à BHRS.

Obtidos os setores censitários para a área de estudo, as variáveis foram normalizadas em porcentagem, considerando a relação do total de domicílios pela extensão territorial do setor censitário, evitando-se distorções na representação da variável em função da distribuição espacial da informação.

Finalmente, as variáveis foram mapeadas qualitativamente com base na variação da intensidade de influência na vulnerabilidade socioambiental, sendo de “Muito Baixa” a “Alta”.

Elaboração do mapa de estimativa de perda de solo

Para a elaboração do mapa de estimativa de perda de solo foi utilizada a RUSLE, um modelo empírico proposto por Renard *et. al* (1997), conforme adaptações do modelo de Wischmeier e Smith (1978), que é capaz de estimar a perda de solo média por erosão laminar no período de um ano, com base na relação entre seis diferentes fatores, conforme expresso pela Equação 1.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot CP \quad (1)$$

Na equação, “A” se refere a perda de solo anual média por unidade de área, a partir dos fatores de erosividade da chuva (R), erodibilidade dos tipos solos (K), topografia (LS) e uso da terra, cobertura vegetal e práticas conservacionistas (CP). O cálculo da estimativa de perda de solo na BHRS foi realizado por meio da ferramenta *Map Algebra* do *software* ArcMap 10.6, a qual é capaz de efetuar operações algébricas em imagens matriciais, possibilitando a elaboração do mapa de perda de solo.

Fator de erosividade da chuva (R)

O fator R foi calculado conforme a Equação 2, com base na metodologia de Bertoni e Lombardi Neto (2012), em que são utilizadas as somatórias dos valores mensais de erosividade e a média anual de precipitação. Nessa equação, o fator R ($MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot ha^{-1}$) é determinado com base na precipitação média mensal em mm (r) e na precipitação média anual em mm (P).

$$R = \sum_{i=1}^{12} 67,355 \left(\frac{r_i^2}{P} \right)^{0,85} \quad (2)$$

Os dados de precipitação foram adquiridos a partir de séries históricas do banco de dados hidrológicos do DAEE (2020), abrangendo o período dos anos de 1973 a 2019. Foram utilizadas treze estações pluviométricas para a seleção dos dados, as quais apresentaram séries históricas de no mínimo vinte anos, e que além de estarem em funcionamento, estão localizadas nas proximidades da área de estudo.

Esses dados foram interpolados no *software* ArcMap 10.6 com base na metodologia de Silva *et al.* (2017), em que há primeiramente a geração de uma malha com grade regular pela ferramenta Vizinho Natural, da qual são extraídos, posteriormente, pontos com valores de R a serem interpolados pela ferramenta IDW.

Fator de erodibilidade do solo (K)

O fator K, expresso em $t \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$, é responsável pela suscetibilidade dos tipos de solo a sofrerem erosão em detrimento da energia da chuva, apresentando valores que variam de 0 a 1. Esses valores foram retirados do estudo de Silva e Alvares (2005), baseado em médias de valores entre trabalhos realizados no Estado de São Paulo para os mesmos tipos de solo, conforme Tabela 01. A identificação dos tipos de solo da BHRS foi realizada com base no Mapa Pedológico do Estado de São Paulo, realizado por Rossi (2017).

Tabela 01. Valores de erodibilidade das classes de solo.

Classes de solo	Erodibilidade ($t \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$)
Latossolo	0,0162
Gleissolo	0,0361
Cambissolo	0,0508

Fonte: Silva; Alvares (2005).

Fator topográfico (LS)

O fator LS, corresponde a influência do relevo na erosão, e para o seu cálculo, são necessários os valores de comprimento de rampa. Dessa forma, primeiramente foi utilizada a metodologia de Coutinho *et al.* (2014), que possibilitou a aquisição do comprimento de rampa (λ) a partir do tamanho dos pixels (Px) e da declividade do terreno em porcentagem (D), conforme Equação 3.

$$\lambda = \sqrt{Px^2 + [(D/100) \cdot Px]^2} \quad (3)$$

Em seguida, o fator LS foi calculado, conforme metodologia de Bertoni e Lombardi Neto (2012), pela Equação 4, que leva em conta não apenas o comprimento de rampa de cada pixel em metros, mas também a declividade do terreno em porcentagem (D).

$$LS = 0,00984 \cdot \lambda^{0,63} \cdot D^{1,18} \quad (4)$$

A declividade do terreno em porcentagem, utilizada no cálculo do Fator LS, foi obtida a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo, gerado pela interpolação de curvas de nível e pontos cotados com a ferramenta TIN. A partir do MDE, os valores de declividade foram expressos com o auxílio das ferramentas *Topo to Raster* e *Slope*.

Fator de uso da terra, cobertura vegetal e práticas conservacionistas (CP)

O fator CP, correspondente ao uso da terra e às práticas conservacionistas, envolvem a ação antrópica no meio, extrapolando as condições naturais, conforme proposto pelos demais fatores da RUSLE (SILVA *et al.*, 2017). Para a obtenção do fator C, cada classe do mapeamento de uso da terra da BHRS foi associada a um valor diferente, selecionado a partir de estudos realizados para o Estado de São Paulo e/ou com base na literatura mais tradicional (Tabela 02). O mapeamento de uso da terra da BHRS foi realizado a partir da interpretação visual de uma ortoimagem do sensor *Vexcel Ultracam*, referente ao ano de 2010, disponibilizada pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC/SP), passando, posteriormente, por um processo de retificação, com o auxílio do *software* Google Earth.

Tabela 02. Valores de Fator C para o uso da terra na BHRS.

Classes de uso do solo	Fator C	Referência
Área urbanizada	0,0000	Silva (2004)
Campo	0,0420	Silva (2004)
Corpo d'água	0,0000	Bertoni e Lombardi Neto (2012)
Cultura permanente	0,0247	Bertoni e Lombardi Neto (2012)
Cultura temporária	0,1800	Silva (2004)
Mata	0,0004	Silva <i>et al.</i> (2010)
Mineração	1,0000	Silva (2004)
Pastagem	0,0100	Bertoni e Lombardi Neto (2012)
Reflorestamento	0,0470	Silva <i>et al.</i> (2010)

Fonte: os autores.

Foi atribuído ao Fator P o valor de 1, conforme recomendações de Aziz *et al.* (2012) e Lee (2004), e com base na metodologia de Silva *et al.* (2017), que utiliza este valor quando não há estudos específicos sobre as práticas conservacionistas no local de estudo. Além disso,

destaca-se que os fatores C e P foram avaliados conjuntamente, como um único fator, conforme metodologia proposta pelos autores citados.

Indicador de Vulnerabilidade Socioambiental (IVSA)

Após as variáveis censitárias e a estimativa de perda de solo terem sido mapeadas, foi realizada a classificação com base em suas respectivas intensidades de influência na variação da vulnerabilidade socioambiental, definidas, nesse estudo, como Muito Baixa, Baixa, Média e Alta (Tabela 03). A cada uma das classes estabelecidas foi atribuído um valor, de 0 a 3, conforme adaptações da metodologia de Jesus *et al.* (2014), para a posterior álgebra de mapas no *software* ArcMap 10.6.

Tabela 03. Escala de valores para a execução da álgebra de mapas.

Categoria	Intervalo	Valor atribuído	Classificação da contribuição à vulnerabilidade socioambiental
RUSLE (t/ha · ano)	0 – 1	0	Muito baixa
	1 – 10	1	Baixa
	10 – 50	2	Média
	> 50	3	Alta
Abastecimento de água da rede geral (%)	60% – 100%	0	Muito baixa
	30% – 60%	1	Baixa
	1% – 30%	2	Média
	0% – 1%	3	Alta
Esgotamento sanitário via rede geral (%)	60% – 100%	0	Muito baixa
	30% – 60%	1	Baixa
	1% – 30%	2	Média
	0% – 1%	3	Alta
Coleta de lixo (%)	83% – 100%	0	Muito baixa
	57% – 83%	1	Baixa
	30% – 57%	2	Média
	0% – 30%	3	Alta
Renda (R\$)	1953 – 4063	0	Muito baixa
	1214 – 1953	1	Baixa
	759 – 1214	2	Média
	250 – 759	3	Alta

Fonte: os autores.

O cálculo do IVSA, possibilitado pela álgebra de mapas, foi realizado a partir da ferramenta *Map Algebra*, do *software* ArcMap 10.6, com o uso da operação algébrica

responsável pela integração entre as categorias utilizadas pelo indicador proposto, previamente classificadas e com valores atribuídos. Essa operação algébrica (Equação 5) foi elaborada com base em adaptações da metodologia de Jesus *et al.* (2014).

$$\text{IVSA} = \text{RUSLE} + \text{Variáveis Censitárias} \quad (5)$$

Os valores resultantes do IVSA, expressos em um mapa final, além de terem sido analisados com base na correlação entre as variáveis censitárias com a perda de solo, foram reclassificados em quatro diferentes faixas (Tabela 04), em que valores mais próximos de zero indicam uma menor vulnerabilidade socioambiental e os valores mais altos uma maior vulnerabilidade socioambiental.

Tabela 04. Classificação do IVSA.

IVSA	Classificação
0 – 1	Muito baixo
1 – 30	Baixo
30 – 81	Médio
> 81	Alto

Fonte: os autores.

Resultados e discussões

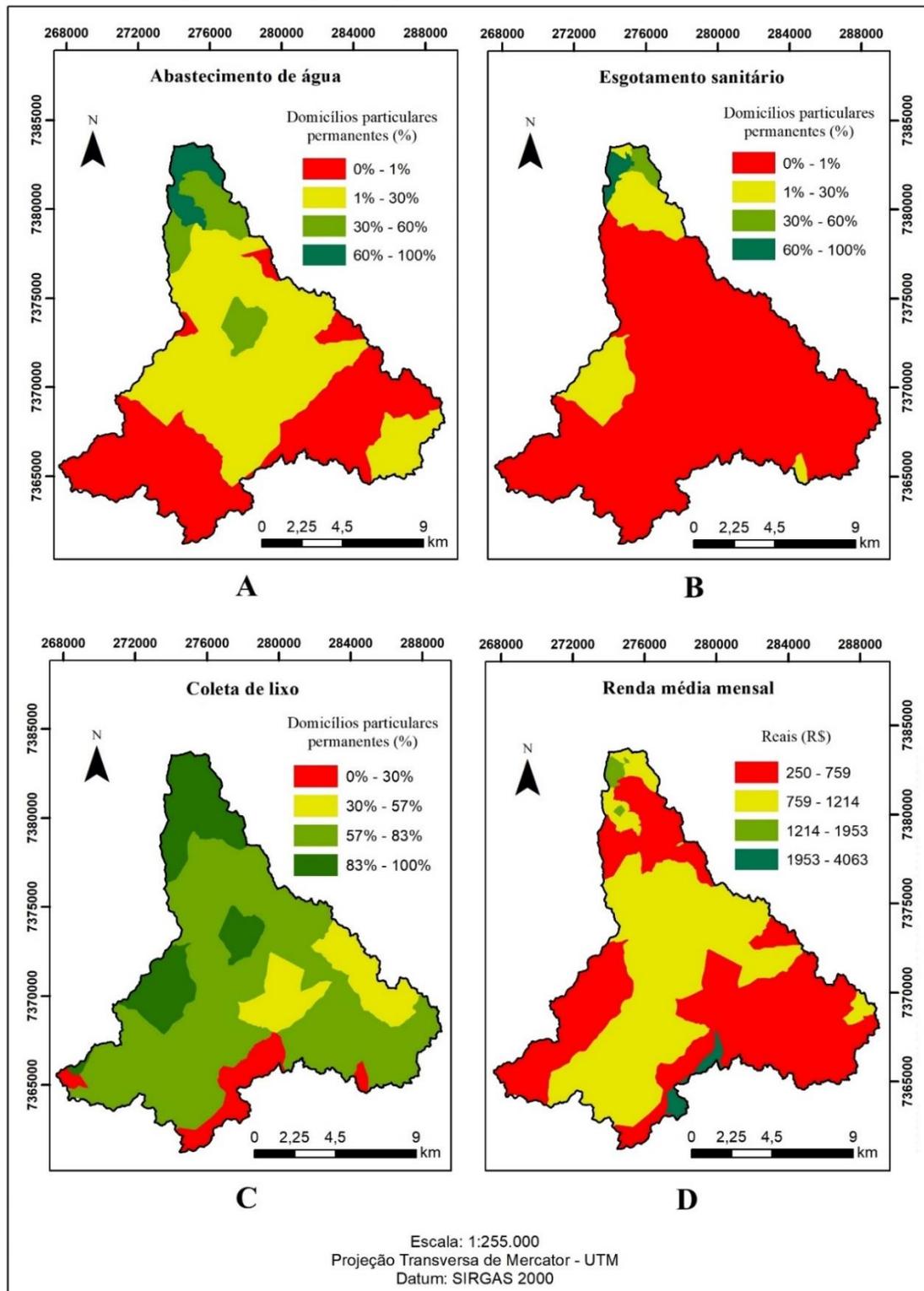
Aspectos de renda e condições sanitárias

O mapeamento das variáveis censitárias associadas aos aspectos de renda e condições sanitárias da área de estudo pode ser observado na Figura 02. Nota-se que as melhores condições de abastecimento de água da rede geral (Figura 02A) se concentram nas regiões norte e central, atendendo entre 60% a 100% dos domicílios particulares permanentes. As áreas com menor atendimento localizam-se nas regiões sudeste e sudoeste, com menos de 30% dos domicílios atendidos. Verifica-se, portanto, que grande parte dos domicílios não são contemplados por esse serviço.

A presença de esgotamento sanitário via rede geral (Figura 02B), caracterizou-se como a variável mais precária, com a predominância de valores inferiores a 1% de atendimento aos domicílios da bacia hidrográfica. As áreas mais contempladas estão localizadas ao norte, se relacionando com aspectos urbanos de infraestrutura. Por outro lado,

a coleta de lixo (Figura 02C) demonstrou-se muito eficiente, sendo possível localizar apenas um pequeno conjunto de localidades não atendidas.

Figura 02. Mapa de aspectos de renda e condições sanitárias



Fonte: os autores.

A renda média mensal dos moradores dos domicílios (Figura 02D) é considerada, em aspectos gerais, baixa, sendo que o nível de renda de R\$250,00 a R\$ 759,00 predomina na região sudeste. A maioria dos domicílios apresentam renda variável entre R\$759,00 e R\$1214,00, principalmente na região central. Poucas localidades apresentam rendas maiores, sendo caracterizadas como pouco extensas e encontradas nos extremos norte e sul da área de estudo.

Fatores R, K, LS e CP

O mapeamento dos valores obtidos para cada um dos fatores da RUSLE (R, K, LS e CP) pode ser identificado na Figura 03. Os valores de erosividade da chuva (fator R) na área de estudo (Figura 03A) variam de 6.488,21 MJ·mm·ha⁻¹·ano⁻¹ a 7.086,91 MJ·mm·ha⁻¹·ano⁻¹, o que demonstra uma baixa variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas, em razão do tamanho da bacia hidrográfica, que permite uma distribuição mais regular da precipitação.

A erosividade média do fator R foi de 6714,32 MJ·mm·ha⁻¹·ano⁻¹, classificada como média-forte, de acordo com Foster *et al.* (1981). Os valores mais altos se concentram na porção sudoeste, onde há maior intensidade de chuvas devido às elevadas altitudes predominantes, o que evidencia a influência orográfica.

Ao analisar os valores de erodibilidade do solo (fator K), na Figura 03B, verifica-se que os Latossolos apresentam a menor capacidade de perda de solo por erosão laminar. Isso se deve ao fato de que esse tipo de solo é geralmente vegetado por florestas com caráter semidecíduo, o que pode conter os processos erosivos.

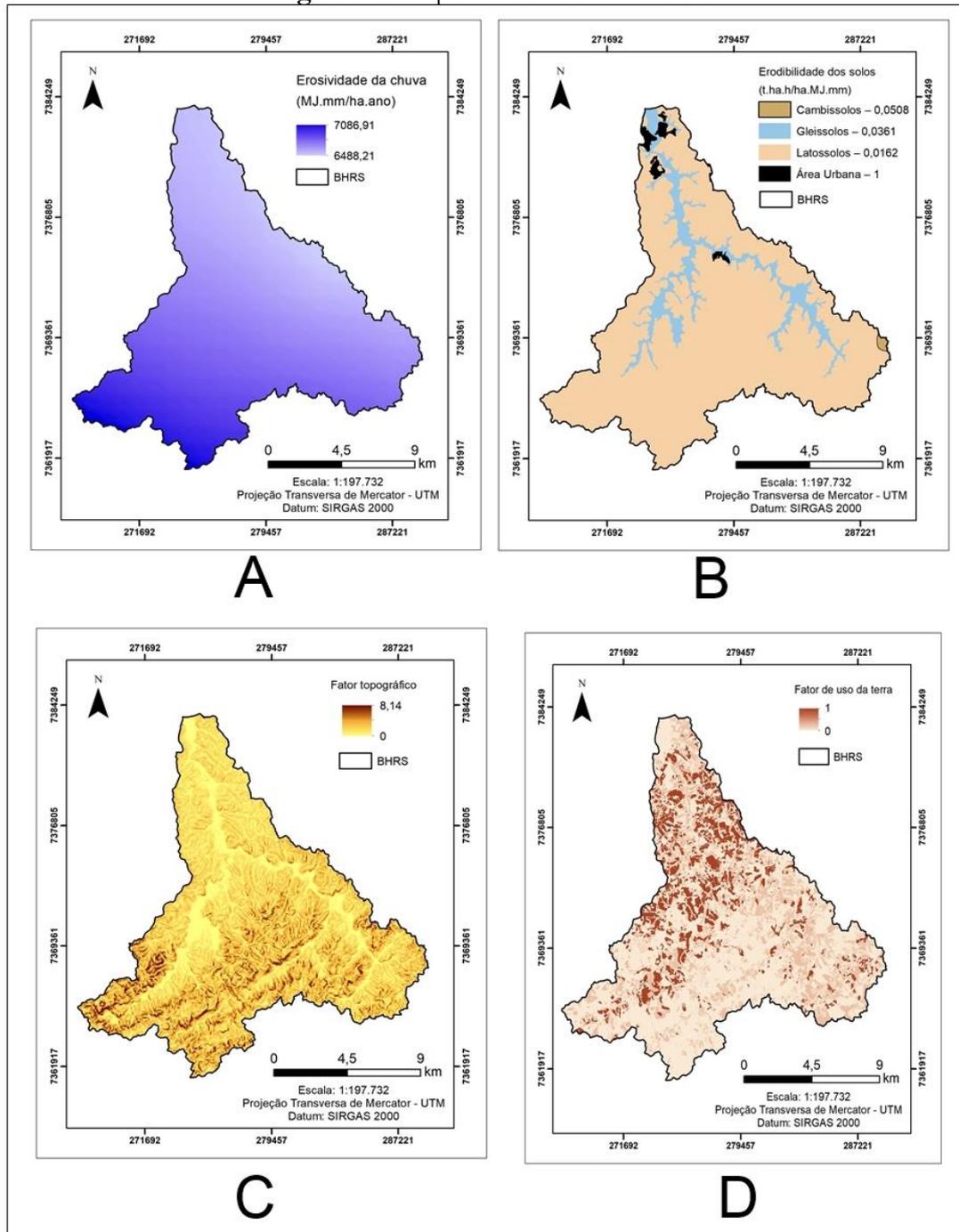
Os Cambissolos sofrem as maiores perdas de solo por erosão laminar, pois são normalmente identificados em elevadas altitudes e apresentam indícios de intemperismo incipiente do solo. Além disso, são pouco profundos, e contêm uma grande quantidade de pedras (EMBRAPA, 2020).

Os Gleissolos podem ser identificados em locais próximos da hidrografia, como no entorno do Rio Sorocabuçu, pois são típicos de áreas de planície ou de várzeas inundáveis, além de serem predominantes em relevos aplainados, com vegetação campestre ou florestas perenifólias de várzea (IAC, 2020; EMBRAPA, 2020).

De acordo com a classificação de Silva e Alvares (2005), pode-se afirmar que os Latossolos apresentam erodibilidade média, enquanto os Gleissolos e os Cambissolos

apresentam erodibilidade alta. Há, portanto, a predominância da erodibilidade média do solo na BHRS, ocupando cerca de 88% de sua extensão total, enquanto a erodibilidade alta abrange os 12% restantes.

Figura 03. Mapas dos fatores da RUSLE



Fonte: os autores.

A Figura 03C mostra o fator LS, com valores de 0 a 8,14 (adimensional). Há a predominância de declividades mais baixas na porção norte, com as classes de relevo plano, suave ondulado e ondulado. Já as declividades mais elevadas se concentram na porção sul, com a predominância da classe de relevo forte ondulado. A classe montanhosa, é a menos expressiva territorialmente, sendo encontrada principalmente na região sudoeste.

É evidente a influência da declividade na determinação desse fator topográfico, pois os menores valores do fator LS correspondem às áreas de predominância das classes de declividade plana, suave ondulada e ondulada, ou seja, às áreas de baixa declividade, concentradas na porção norte da bacia hidrográfica. Por outro lado, os maiores valores do fator LS correspondem às áreas de declividade forte ondulada e montanhosa, ou seja, áreas de declividade mais acentuada, que se concentram, principalmente, na porção sul da área de estudo.

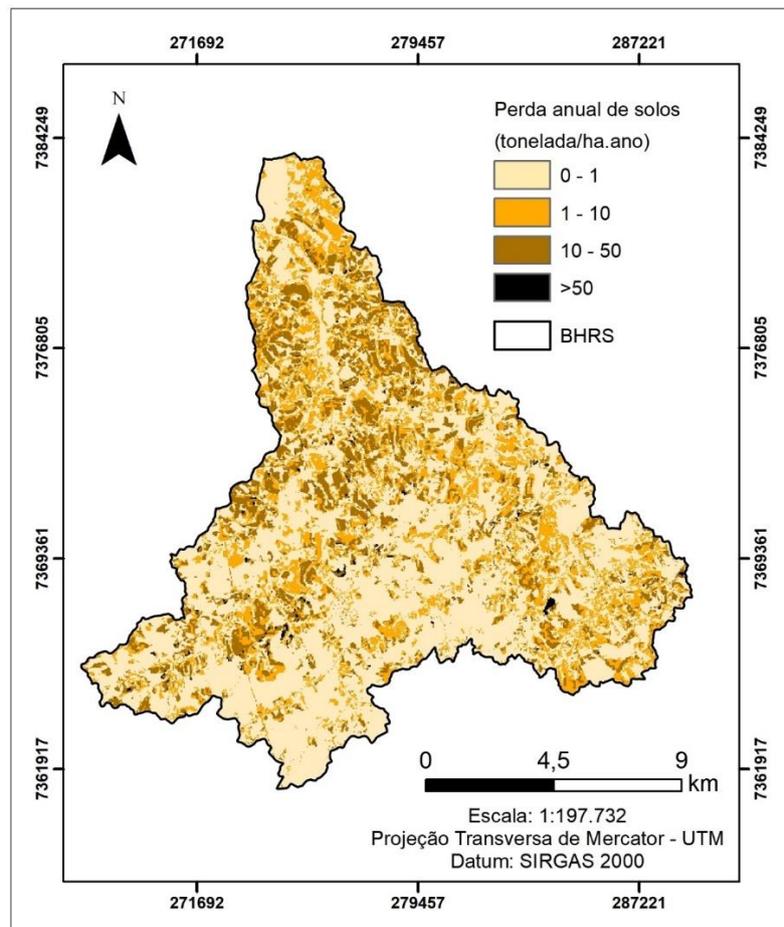
Os maiores valores de fator C (Tabela 02) se relacionam com as classes de mineração e culturas temporárias, portanto, estão concentrados na região norte da bacia hidrográfica, conforme evidenciado pela Figura 03D. Essas atividades, proporcionadas pela ação antrópica, são responsáveis por intensas perdas de solo por erosão laminar, pois há a remoção de vegetação ou o impedimento de sua regeneração, bem como o manejo inadequado do solo.

Por outro lado, os menores valores de fator C (Tabela 02) se associam a classe de mata, encontrada ao sul da área de estudo. Isso ocorre devido a proteção oferecida aos solos contra a remoção de sedimentos durante a ocorrência do escoamento superficial (TOWNSEND *et al.*, 2006). Assim, essas áreas são capazes de conter os impactos da erosão laminar.

RUSLE

A BHRS apresenta perda anual média de solos de aproximadamente 5,0 t/ha·ano, representando, de acordo com a classificação da FAO (1967), a atuação de uma baixa suscetibilidade erosiva. Conforme a Figura 04, verifica-se que a maior extensão da bacia hidrográfica (60,92%) está associada a valores abaixo de 1 t/ha·ano, as quais coincidem com áreas de mata, evidenciando a importância da cobertura vegetal para a contenção de processos erosivos, principalmente em áreas de Latossolo, que podem sofrer intensamente com os efeitos da declividade e do período chuvoso.

Figura 04. Mapa da perda anual de solos por erosão laminar (RUSLE)



Fonte: os autores.

Cerca de 22,51% da área total apresenta perdas de até 10 t/ha:ano, correspondendo a localidades mais planas de baixo potencial de erosividade da chuva. Há associações com a presença de campos e reflorestamentos, os quais apesar de serem coberturas vegetais menos densas, podem atenuar de forma moderada os processos erosivos atuantes.

A classe de perdas de até 50 t/ha:ano pode ser encontrada em aproximadamente 16,09% da BHRS apresentando relações principalmente com as culturas temporárias, que podem apresentar elevado potencial erosivo mediante o manejo inadequado. Destaca-se a presença dos Latossolos, apropriados para o desenvolvimento agrícola, mas ao mesmo tempo bastante propícios a erosão laminar mediante essa atividade, principalmente em declividades mais acentuadas e/ou com a predominância da alta erosividade da chuva.

As perdas maiores do que 50 t/ha:ano são praticamente inexpressivas, ocupando apenas 0,48% da área total, a qual corresponde à classe de mineração, na região sudeste e à pequenas áreas de culturas temporárias na região sudoeste. Essas atividades apresentam alto

potencial erosivo, fato que combinado com declividades acentuadas e a presença do Latossolo, intensificam ainda mais o processo de perda de solo.

Indicador de Vulnerabilidade Socioambiental (IVSA)

A Tabela 05 mostra as porcentagens e classificação do IVSA por área. Verifica-se que 70,60% da área da bacia hidrográfica apresenta IVSA muito baixo, enquanto 19,47% classifica-se como baixo. As classes de valores superiores, consideradas como de médio e alto IVSA foram encontradas em poucas localidades, ocupando, respectivamente, 9,22% e 0,70% de totalidade.

Tabela 05. Distribuição e classificação do IVSA.

IVSA	Classificação	Área (km²)	Área (%)
0 – 1	Muito baixo	141,07	70,60%
1 – 30	Baixo	38,91	19,47%
30 – 81	Médio	18,43	9,22%
> 81	Alto	1,39	0,70%

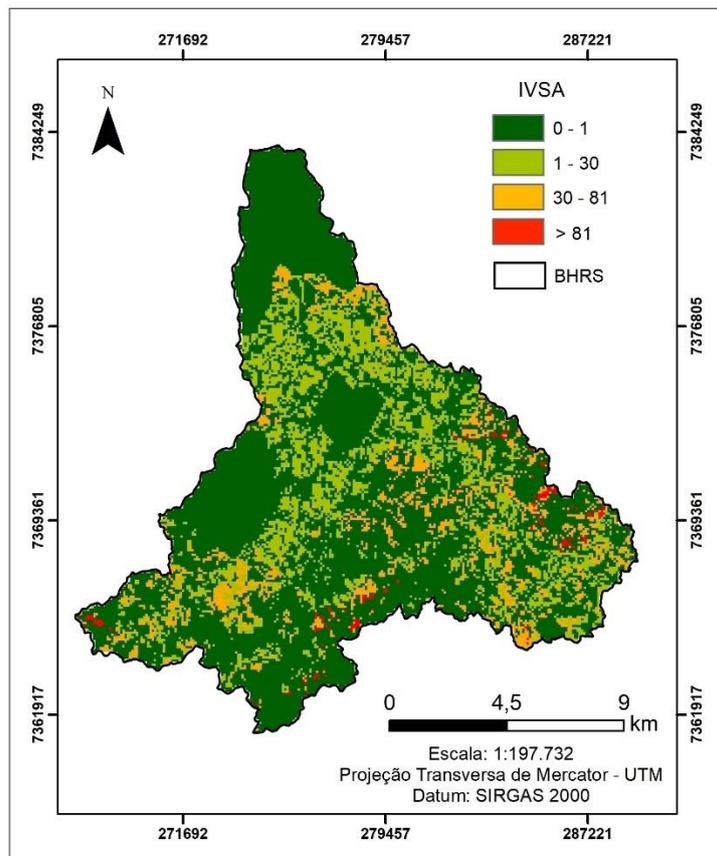
Fonte: os autores.

A Figura 05 mostra o Mapa de Indicador de Vulnerabilidade Socioambiental segundo a metodologia desenvolvida neste trabalho. Segundo o mapa, pode-se afirmar que a classe de IVSA predominante na área de estudo é a “Muito baixo”, coincidentemente, em localidades onde também se observam as melhores condições de abastecimento de água da rede geral, de renda média, de esgotamento sanitário via rede geral e de coleta de lixo. Além disso, essas localidades correspondem também às classes de contribuição como “Muito baixo” ou “Baixo” em relação a perda anual de solos.

A região central da bacia hidrográfica apresentou IVSA “Baixo”, com abastecimento de água da rede geral e renda média considerados mediamente na contribuição da álgebra de mapas. Além disso, essa região apresenta boas condições de coleta de lixo, contendo o avanço da vulnerabilidade, juntamente com uma perda anual de solo “Baixa” ou “Média”.

As áreas com abastecimento de água da rede geral, esgotamento sanitário via rede geral e renda média precários apresentaram IVSA classificado como “Médio”, pois correspondem às classes de alta contribuição à vulnerabilidade socioambiental. Nesses locais, localizados principalmente nas regiões sudeste e sudoeste da BHRS, há também uma perda de solo considerada como de média influência.

Figura 05. Mapa do IVSA



Fonte: os autores.

O IVSA “Alto” pode ser encontrado em poucas áreas, as quais são as únicas a apresentar todas as variáveis de aspectos de renda e condições sanitárias como de alta contribuição à vulnerabilidade socioambiental. Essa classe de IVSA pode ser encontrada na região sudeste e em determinados pontos da região sudoeste.

Conclusões

A aplicação do modelo matemático de estimativa de erosão laminar (RUSLE) apresentou resultados satisfatórios, considerando que os mesmos se mostraram alinhados com as associações entre fatores físicos e ação antrópica, ou seja, apresentando uma baixa suscetibilidade erosiva, principalmente devido à proteção das coberturas vegetais identificadas, como as áreas de mata. Apesar disso, as áreas de mineração e culturas temporárias devem ser monitoradas, considerando o seu alto potencial erosivo, intensificado pela declividade e presença de um tipo de solo de alta erodibilidade. Apesar dos problemas

relacionados à deficiência de abastecimento de água da rede geral e à falta de esgotamento sanitário via rede geral, a coleta de lixo apresenta-se eficiente.

O IVSA “Baixo” foi predominante na extensão da bacia hidrográfica, entretanto, está concentrado em localidades com os melhores aspectos de renda e condições sanitárias, além de perdas de solo consideradas baixas.

A proposta de elaboração do IVSA contribuiu para uma metodologia de integração entre fatores físicos e aspectos de renda e condições sanitárias, considerando as suas atuações simultâneas na modificação da paisagem.

Referências

BALDASSARINI, J. S.; NUNES, J. O. R. Estimação da perda de solo por processos erosivos em parcelas de monitoramento utilizando pinos de erosão em propriedades rurais do interior do Estado de São Paulo. **Confins**, v.38, 2018.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 8 ed. São Paulo: Ícone, 2012.

COUTINHO, L. M.; CECÍLIO, R. A.; GARCIA, G. O.; XAVIER, A. C.; ZANETTI, S. S.; MOREIRA, M. C. Cálculo do fator LS da Equação Universal de Perdas de Solos (EUPS) para a bacia do Rio da Prata, Castelo. **Revista Agroambiente**, v. 8; n. 1; p. 01-09, jan.-abr., 2014.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. DAEE. **Banco de dados hidrológicos**. 2020. Disponível em: <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>. Acesso em: 20 jan. 2020.

DRUGOWICH, M. I. **Plano Diretor de Controle de Erosão Rural para o município de Tatuí – SP**. Campinas: CIAGRO-CATI-SAA, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa. **Árvore do Conhecimento de Solos Tropicais**. 2020. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_6_221220611537.html#>. Acesso 19 maio 2020.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE – ESRI. **ArcGis 10.6**. Redlands, 2017.

FOSTER, G. R.; McCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **J. Soil Water Conserv.**, n. 36, p.355-359, 1981.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

GOUVEIA, I. C. M. C.; LEAL, A. C.; TROMBETA, L. R.; NUNES, R. S.; STOQUI, V. B. Contribuição ao planejamento de recursos hídricos em bacia hidrográfica: geomorfologia e fragilidade geoambiental da UGRH Paranapanema. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. 27, p. 21-46. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Malha de Setores Censitários**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/26565-malhas-de-setores-censitarios-divisoes-intramunicipais.html?=&t=downloads>. Acesso em: 07 abr. 2019.

INSTITUTO AGRONÔMICO. IAC. **Solos do Estado de São Paulo**. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solosp/>. 2020. Acesso 16 jun. 2020.

JESUS, C. F. P.; DIAS, N. W.; CRUZ, M. A. S. Vulnerabilidade socioambiental na Bacia do Rio Japarutuba em Sergipe a partir da álgebra de mapas. **Revista Engenharia na agricultura**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 50-57, jan/fev 2014.

LIMA, S. S.; LEITE, L. F. C.; OLIVEIRA, F. C.; COSTA, D. B. Atributos químicos e estoques de carbono e nitrogênio em argissolo vermelho-amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. **Revista Árvore**, v.35, n.1, jan./fev., 2011.

LUIZÃO, F. J.; CORAL, S. T.; ORDINOLA, J. G.; SILVA, G. C.; LUIZÃO, R. C. C.; CABRERA, L. T.; WANDELLI, E.; FERNANDES, E. C. M. Ciclos Biogeoquímicos em agroflorestas na Amazônia. In: GAMA-RODRIGUES *et al.* **Sistemas Agroflorestais: bases científicas para o desenvolvimento sustentável**. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2006.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 154f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba (SP), 2002.

MAIA JÚNIOR, L. P.; LOURENÇO, R. W. Impactos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre a variabilidade do albedo na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu (Ibiúna - SP). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 443 – 462, 2020.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.3, p.424-432, mar. 2011.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA. FAO. La erosión del suelo por el agua. Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. **Cuadernos de fomento agropecuario da Org. de Las Naciones Unidas**, Roma, n. 81, 1967.

ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; McCOOL, D. K.; YODER, D. C. **Predicting soil erosion by water - A guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington: United States Government Printing, 1997.

SAMBUICHI, R. H. R.; OLIVEIRA, M. A. C.; SILVA, A. P. M.; LUEDEMANN, G. A **sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios**. Rio de Janeiro: IPEA, 2012.

SANTOS, D. B. O. **Aplicação da RUSLE a uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia**. 2013. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Estado do Pará, Belém (PA), 2013.

SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Identificação de áreas com perda de solo acima do tolerável usando NDVI para o cálculo do fator C da USLE. **Revista Ra'e Ga**. Curitiba, v.42, p.72-85, dez., 2017.

SILVA, F. D. G.; MINOTTI, F.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O.; CRESTANA, S. Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim – SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. **Eng. Sanit. Ambient.**, v.15, n.2, p.141-148, 2010.

SILVA, V. C. Estimativa da erosão atual da bacia do Rio Paracatu (MG/GO/DF). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.34, n.3, p.147-159, 2004.

SILVA, A. M.; ALVARES, C. A. Levantamento de Informações e Estruturação de um Banco Dados sobre a Erodibilidade de Classes de Solos no Estado de São Paulo. **Revista Geociências**, v. 24, n. 1, p. 33-41, 2005.

SILVÉRIO, F. O.; SILVA, J. G. S.; AGUIAR, M. C. S.; CACIQUE, A. P.; PINHO, G. P. Análise de agrotóxicos em água usando extração líquido-líquido com partição em baixa

temperatura por cromatografia líquida de alta eficiência. **Química Nova**, v.35, n.10, p. 2052-2056, 2012.

TELLES, T. S.; DECHEN, S. C. F.; SOUZA, L. G. A.; GUIMARÃES, M. F. Valuation and assessment of soil erosion costs. **Scientia Agricola**, v.70, p. 209-216, 2013b.

TOWNSEND, C. R.; BEGON, M.; HARPER, J. L. **Fundamentos em Ecologia**. 2ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2006.

VEIGA, M.; BASSI, L.; ROSSO, A. Degradação do solo e da água. In: SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO (Ed) **Manual de uso, manejo e conservação do solo e da água: projeto de recuperação, conservação e manejo dos recursos naturais em microbacias hidrográficas**. 2 ed. Florianópolis: EPAGRI, 1994.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978.

Submetido em novembro de 2021

Aceito em junho de 2022