



**Fragilidade Ambiental à Erosão em uma Bacia
Hidrográfica Antropizada no Nordeste do Estado de São Paulo, Brasil**

Environmental Fragility to Erosion in an Anthropogenic
Watershed in the Northeast of the State of São Paulo, Brazil

Ana Paula Pereira Carvalho¹; João Vitor Roque Guerrero¹; Elton Vicente Escobar Silva¹;
Mauricio José Rosso Pinto¹; Renata Maria Guerreiro Fontoura Costa Vaz¹; Camila Tavares Pereira¹;
Reinaldo Lorandi²; José Augusto de Lollo³ & Luiz Eduardo Moschini¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais

Rodovia Washington Luiz, Km 235, Jardim Guanabara, Caixa-postal: 676, 13565905, São Carlos - São Paulo, Brasil

²Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil

Rodovia Washington Luiz, Km 235, Jardim Guanabara, Caixa-postal: 676, 13565905, São Carlos - São Paulo, Brasil

³Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Departamento de Engenharia Civil

Alameda Bahia, 550, Caixa-postal: 56, 15385000, Ilha Solteira - São Paulo, Brasil

e-mails: appc.engambiental@gmail.com; joaovitorguerrero@yahoo.com.br; eltescobar@gmail.com; mjrossop@gmail.com;
remaria.guerreiro@gmail.com; tavares.camila88@gmail.com; lorandir@gmail.com; jose.lollo@unesp.br; lemoschini@ufscar.br

Recebido em: 10/04/2019 Aprovado em: 24/06/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_07_18

Resumo

A funcionalidade do ambiente natural é alterada pelas intervenções antrópicas, dessa forma, a mudança na estrutura do solo pode ocasionar eventos que causam impactos negativos que altere a qualidade ambiental de uma área, tornando-a mais frágil, por exemplo, a ocorrência de processos erosivos. Com isso, é necessário um planejamento adequado do espaço físico territorial com a finalidade de proteger e controlar as atividades desenvolvidas em uma determinada área. Diante desse cenário, foi determinada a fragilidade ambiental à erosão da Bacia Hidrográfica do Rio Claro (BHRC), situada no município de Santa Rita do Passa Quatro (SP), abrangendo 251,91Km² da unidade UGRHI do Rio Mogi Guaçu - Médio Mogi e constitui-se numa área de grande importância à captação de água superficial para abastecimento público. O estudo foi desenvolvido num intervalo de 16 anos (2001-2017), na escala de 1:50.000 e envolveu quatro atributos do meio físico e o uso e cobertura do solo, considerando-se cinco classes de fragilidade: Muito Baixa; Baixa; Média; Alta; e Muito Alta. As mudanças entre as classes média e alta (5%) são oriundas da alteração dos tipos de uso e cobertura do solo. Estas duas classes representam os maiores percentuais de área, e demandam maiores cuidados, pois se situam em regiões que o solo apresenta textura arenosa e profundidade superior a 10 m, constituindo em um cenário favorável ao surgimento de feições erosivas, que poderão acarretar degradação solo e assoreamento dos mananciais dessa bacia hidrográfica, caso medidas protecionistas não seja adotadas.

Palavras-chave: Fragilidade Ambiental; Bacia Hidrográfica; Planejamento Territorial; Processos Erosivos

Abstract

The functionality of the natural environment is altered by the anthropic interventions, so the change in the soil structure can cause events that cause negative impacts that alter the environmental quality of an area, making it more fragile, for example, the occurrence of erosive processes. Thus, adequate planning of the physical space is necessary in order to protect and control the activities developed in a given area. In view of this scenario, the environmental fragility of the Rio Claro Hydrographic Basin (BHRC), located in the municipality of Santa Rita do Passa Quatro (SP), was determined to encompass 251.91 Km² of the UGRHI unit of the Mogi Guaçu - Mogi River and constitutes in an area of great importance to the abstraction of surface water for public supply. The study was developed over a period of 16 years (2001-2017), in the scale of 1: 50.000 and involved four attributes of the physical environment and the use and cover of the soil, considering five classes of fragility: Very Low; Low; Average; High; and Very High. The changes between the middle and upper classes (5%) are due to changes in the types of land use and land cover. These two classes represent the highest percentages of area and require greater care, since they are located in regions where the soil presents a sandy texture and depth of more than 10 m, constituting a scenario favorable to the appearance of erosive features, which may lead to soil degradation and sedimentation of the watersheds of this river basin, if protectionist measures are not adopted.

Keywords: Environmental Fragility; Watershed; Territorial Planning; Erosive Processes

1 Introdução

As transformações nos recursos naturais, por meio da ação humana, acarretam alterações no equilíbrio dinâmico da natureza, que podem se manifestar na forma de processos erosivos (Spörl & Ross, 2004; Burcher *et al.*, 2007; Macedo *et al.*, 2018). Por sua vez, a erosão do solo pode ocasionar o assoreamento dos rios e alterações significativas nos ecossistemas, o que evidencia a relevância de estudos sobre a dinâmica e fragilidade das bacias hidrográficas (Zhao *et al.*, 2013).

O mapeamento da fragilidade ambiental apresenta-se como uma ferramenta fundamental para as tomadas de decisão dos gestores e planejadores com relação à ocupação e os problemas ambientais (Spörl & Ross, 2004; Tomczyk, 2011; Costa *et al.*, 2015), em escala regional ou local (Valle *et al.*, 2016), como apresenta os estudos de Cruz *et al.* (2017), Guerrero *et al.* (2018), Gao & Zhang (2018), Macedo *et al.* (2018).

Para conhecer a fragilidade de um determinado sistema se faz necessário realizar um estudo de integração e análise dos elementos que compõe o espaço geográfico, de forma a adquirir um produto analítico que expresse o diagnóstico das diferentes categorias de fragilidade de forma hierárquica (Ross, 1994; Celestino *et al.*, 2019). Dessa forma, a análise da fragilidade ambiental classifica a bacia hidrográfica em níveis diferentes de fragilidade a partir da associação de diversas variáveis, de maneira a identificar em pontos específicos da bacia os impactos ambientais (Manfré *et al.*, 2013).

O reconhecimento das unidades naturais e dos graus de fragilidade potencial e emergente da paisagem viabilizam definições mais adequadas para o planejamento territorial, e se mostra essencial na elaboração de diretrizes e proposição de ações de zoneamento e gestão das áreas que necessitam de maiores cuidados para a conservação do equilíbrio ambiental (Martín-Duque *et al.*, 2012).

A partir do conceito das Unidades Ecodinâmicas (Tricart, 1977), a análise do ambiente se realiza a partir da Teoria de Sistemas, que parte do entendimento que na natureza o processo de troca de ener-

gia e matéria ocorre conforme o equilíbrio dinâmico entre os componentes da paisagem. No entanto, esse equilíbrio se altera devido à ação do homem, provisoriamente ou de forma definitiva.

Com base nesta abordagem, Ross (1990) ampliou o entendimento sobre Unidades Ecodinâmicas, classificando-as em Estáveis e Instáveis, sendo as primeiras consideradas em equilíbrio dinâmico e que não sofreram nenhuma intervenção antrópica, apresentando Instabilidade Potencial em graus diversos, de muito fraca a muito forte, assim como as Unidades Ecodinâmicas Instáveis, que são aquelas que foram modificadas de maneira significativa pelo homem (Ross, 1994).

Para realizar de modo efetivo, o planejamento do uso e cobertura do solo deve-se considerar a fragilidade do ambiente à degradação, com o monitoramento dos processos que atingem de forma direta o fornecimento de bens e serviços ambientais, como os processos erosivos, assoreamento de rios e perda de biodiversidade (Valle *et al.*, 2016). Desse modo, modelos qualitativos empíricos são utilizados na análise da fragilidade ambiental para avaliar o fenômeno da erosão, quanto a sua origem, evolução e fatores condicionantes (Kappes *et al.*, 2012).

Os processos erosivos diferenciam devido ao mecanismo de desencadeamento da erosão e as condições de predisposição (Lollo & Sena, 2013). Existem diversos fatores que condicionam os processos de erosão do solo, como: clima, propriedades físicas e químicas do solo, características das encostas, geologia, uso e cobertura do solo (Zhou *et al.*, 2016).

O modelo tecnológico brasileiro que aborda a produção de cana de açúcar tem causado incertezas sobre sua sustentabilidade (Garbiate *et al.*, 2011). A porção centro-leste do Estado de São Paulo apresenta risco ambiental potencial oriundo da alta interferência das atividades humanas, como exemplo, as áreas fortemente manejadas e ocupadas por culturas anuais como a cana de açúcar que dependem de maquinários de grande porte, que compactam o solo dificultando a infiltração de água, o que favorece maior escoamento superficial, tornando um cenário mais propenso à ocorrência de diversos processos de instabilidade (Fushita *et al.*, 2010).

Uma vez que estas práticas antrópicas usualmente são implantadas sem planejamento, uma resposta pode ser o surgimento e/ou o agravamento de processos de degradação, como é o caso dos processos erosivos presentes em toda a extensão da Bacia Hidrográfica do Rio Claro (BHRC).

Dentre as intervenções humanas desenvolvidas na bacia, a cultura de cana de açúcar para a fabricação do etanol é a principal atividade realizada. Além do uso intensivo do solo, o período de entressafra e/ou pousio da cultura deixa o solo menos protegido. Outro fator que contribui fortemente com a fragilidade da área de estudo são as próprias características físicas, como a predominância de material inconsolidado de textura arenosa. Dessa forma, em um planejamento não se faz necessário analisar apenas atributos antrópicos (externos), mas também, é indispensável à compreensão do meio físico.

Diante deste contexto, neste artigo discutiu-se a dinâmica do grau de fragilidade ambiental à erosão da bacia hidrográfica do Rio Claro (SP), com ênfase nos atributos do meio físico e de uso e ocupação do solo em 2001 e 2017, com o intuito de oferecer subsídios para o planejamento ambiental e territorial da região.

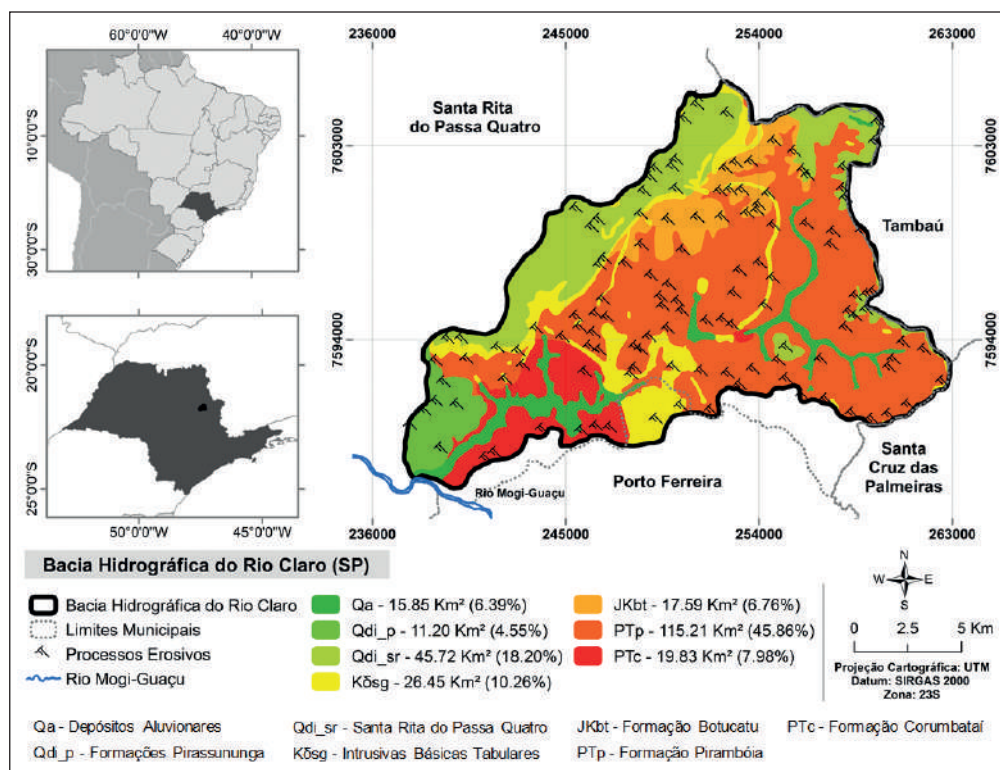
2 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo abrange a Bacia Hidrográfica do Rio Claro (BHRC) localizada no nordeste do Estado de São Paulo, Brasil, entre as coordenadas 21°39' a 21°47' Sul e 47°19' a 47°32' Oeste (Figura 1).

A partir de 1994, o Estado de São Paulo foi dividido em 22 Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), sendo que a BHRC faz parte da UGRHI do Mogi Guaçu, que faz divisa com outras 6 UGRHI: Piracicaba/Capivari/Jundiá; Tietê/Jacaré; Tietê/Batalha; Turvo/Grande; Baixo Pardo/Grande e Pardo (BRASIL, 1994; FEHIDRO, 2011). A BHRC está localizada na Região Hidrográfica do Paraná, de acordo com a Resolução nº 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH (MMA, 2003).

A BHRC compreende um espaço territorial de 251,91km², onde se localiza parcialmente a área urbana do município de Santa Rita do Passa Quatro, que por sua vez, apresenta 26.478 habitantes, com uma densidade demográfica de 35,11 hab/km² (IBGE, 2010). Segundo o índice FIRJAN de Desenvolvimento Municipal no ano de 2013, o município apresenta um índice moderado, correspondendo a 0,7051 (FIRJAN, 2015).

Figura 1 Posicionamento geográfico e formações geológicas de superfície da bacia hidrográfica do Rio Claro (SP). Adaptado de São Paulo - IG (1981a, 1981b, e 1984).



Fragilidade Ambiental à Erosão em uma Bacia Hidrográfica Antropizada no Nordeste do Estado de São Paulo, Brasil

Ana Paula Pereira Carvalho; João Vitor Roque Guerrero; Elton Vicente Escobar Silva; Mauricio José Rosso Pinto; Renata Maria Guerreiro Fontoura Costa Vaz; Camila Tavares Pereira; Reinaldo Lorandi; José Augusto de Lollo & Luiz Eduardo Moschin

Segundo Marquezola *et al.* (2016), a BHRC apresenta a rede hidrográfica em padrão dendrítico, sendo o rio Claro um dos principais mananciais de água para a abastecimento na região. De acordo com os cartogramas na escala 1: 2.500.000 (Feitosa, 2008), a área de estudo situa-se na Província Hidrogeológica da Bacia do Paraná, apresentando uma classe de muita alta a média favorabilidade hidrogeológica. No estudo publicado por São Paulo (DAE-E-IG-IPT-CPRM, 2005) na escala de 1:1.000.000, a área de estudo envolve dois aquíferos: Guarani (aflorente) e Serra Geral. Conforme Lorandi *et al.* (2014), na escala de 1:50.000, esta mesma área contém unidades aquíferas sedimentares (82%), aquíferos fraturados (10%) e um aquífero sedimentar (8%).

A geologia da BHRC conforme São Paulo - IG (1981a, 1981b, e 1984), apresenta seis unidades geológicas da Bacia Sedimentar do Paraná, conforme descritas na Tabela 1.

Os solos presentes na BHRC apresentam predominância de textura arenosa, exceto os materiais residuais dos Magmatitos Básicos e da Formação

Corumbataí, que apresentam maiores percentuais de partículas de argila. A Tabela 2 apresenta as unidades de solos na área de estudo.

Materiais Inconsolidados	Área (km ²)	Espessura (m)	Granulometria (%) [*]			K ₂₀ (cm/s) ⁺	Mini MCV [#]
			Ag	S	Ar		
Quaternário	15,87	<2, 2-5	5	4	91	6,1 10 ⁻³	NA
Res. Santa Rita do P. Quatro	45,72	>5	14	8	78	3,7 10 ⁻²	NA'
Res. Piraçununga	11,38	>5	28	7	65	4,2 10 ⁻³	NA'
Res. Botucatu	17,65	<2, >5	20	5	75	3,8 10 ⁻³	LA
Res. Pirambóia	11,38	<2, >5	24	6	70	7,1 10 ⁻³	LA
Res. Magmatitos Básicos	26,48	<2, 2-5, >5	47	17	36	4,9 10 ⁻⁴	LG'
Res. Corumbataí	19,65	<2	77	9	14	4,1 10 ⁻⁴	NG'

Tabela 2 Caracterização geotécnica dos materiais inconsolidados (valores médios) da bacia hidrográfica do Rio Claro. (Lorandi, *et al.*, 2015).

*Ag = Argila, S = Silte, Ar = Areia; ⁺coeficiente de permeabilidade; [#]Moisture Condition Value.

Supergrupo; Grupo; Unidade; Membro	Era & Período	Descrição
Depósitos Aluvionares (Qa)	Cenozoica; Holoceno	São representados por amplas planícies que ocorrem ao longo dos fundos de vale do Ribeirão do Meio e afluentes principais: córrego do Taquari e da Invernada. São constituídas por sedimentos aluvionares e coluvionares de textura arenosa devido à contribuição das litologias adjacentes. É comum a presença de matéria orgânica nas camadas superficiais.
Formações Piraçununga (Qdi_p) e Santa Rita do Passa Quatro (Qdi_sr)	Cenozoica; Pleistoceno	Constituídas por sedimentos arenosos inconsolidados de origem continental (flúvio-lacustre), não estratificados e sem estrutura, verticalmente homogêneos, sobrepostos indiferentemente às formações mais antigas, em cuja base têm sido encontrados, por vezes, linhas de seixos. Em termos de espessura, a Fm. Piraçununga atinge 5,0m, enquanto que a Fm. Santa Rita do Passa Quatro apresenta espessura até 20,0m.
São Bento; Intrusivas Básicas Tabulares (Kδsg)	Mesozoica Cretáceo	São regionalmente constituídos de soleiras e diques de magmatitos básicos, de textura fanerítica e coloração cinza a preta, apresentando intensamente fraturados e aspecto denso. Em fotografias aéreas, apresentam tonalidades cinza escuras, pendentes abruptas e distribuição preferencial ao longo de interflúvios. Na área de estudo apresentam diques associados a falhamentos normais na porção oeste, enquanto à leste apresentam-se na forma de extensas soleiras.
São Bento; Formação Botucatu (JKbt)	Mesozoica Jura/ Cretáceo	Constituída predominantemente por arenitos eólicos atribuídos a depósitos em ambiente desértico, com granulação fina a média, partículas bem arredondadas e composição essencialmente quartzosa (80%), a espessura varia entre 20 e 280 metros. Apresenta grande quantidade de poros interconectados e uma elevada capacidade de armazenar e fornecer água. Em fotos aéreas, apresentam características idênticas às da Formação Pirambóia, porém, mostram quebras negativas bastante evidentes no contato com esta última.
São Bento; Formação Pirambóia (PTp)	Mesozoica Triássico	Composta por arenitos fluviais esbranquiçados, amarelados e róseos, médios a finos, às vezes bastante argilosos, em função de posicionamento estratigráfico. Em fotografias aéreas, apresentam tonalidades cinza claro a branca, com sistema de drenagem pouco desenvolvido, com padrão dendrítico. Situam-se em regiões com ondulações suaves e interflúvios aplainados.
Passa Dois; Formação Corumbataí (PTc)	Paleozoica Permiano	Composta, regionalmente, por folhelhos variegados, estando posicionada entre as formações Irati (inferior) e Pirambóia (superior). Em fotografias aéreas, estampa tonalidades cinza escuras e alta densidade de drenagem com padrão penado. As faixas de afloramento mais expressivas encontram-se, na área de estudo, distribuídas a oeste e sudoeste de Pirassununga (SP).

Tabela 1 Unidades geológicas ocorrentes na área de estudo (Mezzalana *et al.*, 1981).

A região da bacia é caracterizada pelos biomas Cerrado e Mata Atlântica. A cobertura vegetal nativa da região pertence ao subtipo floresta latifoliada tropical, que com o decorrer do tempo foi quase totalmente erradicada, resultando poucas áreas preservadas. De acordo com Marquezola *et al.* (2016), as áreas de vegetação florestada e natural estão sendo alteradas para outros tipos de usos, principalmente com o cultivo de cana de açúcar. Além disso, a área também é ocupada por silvicultura, solo exposto, pastagens e campos.

Com base no sistema de Köppen, o clima da região é classificado em Cwa, que compreende o mesotérmico úmido subtropical de inverno seco, com temperatura média no inverno inferior a 18°C e no verão superior a 22°C. O período de estiagem ocorre entre maio e setembro e o período chuvoso entre outubro e abril (CEPAGRI, 2017).

3 Materiais e Métodos

A análise da fragilidade ambiental da BHRC foi produzida com base na metodologia de Ross (1994), que parte do princípio da Teoria da Ecodi-

nâmica das Paisagens (Tricart, 1977) que trata do equilíbrio entre as condições ambientais naturais e as ações antrópicas.

A sistemática metodológica para a elaboração do documento cartográfico final englobou a análise de cinco atributos: pluviosidade, pedologia, geologia, formas de relevo, e uso e cobertura do solo elaborado para o ano de 2001 e 2017 (Figura 2). A Tabela 3 apresenta síntese dos atributos ambientais considerados nesta investigação.

Atributos	Fonte	Escala
Pluviosidade	CEPAGRI, 2017	1:50.000
Pedologia	Autores	
Formas de Relevo	Topodata - INPE (2017)	
Formações Geológicas	São Paulo - IG (1981a, 1981b, e 1984)	
Uso e ocupação do solo - 2001	LandSat 7, de 23/03/2001 Composição colorida: banda 6, 5 e 4 com fusão pancromática (15m Pixel)	
Uso e ocupação do solo - 2017	LandSat 8, de 01/03/2017 Composição colorida: banda 6, 5 e 4 com fusão pancromática (15m Pixel)	1:60.000
Fotos Aéreas Analógicas	Brasil - Ministério do Exército (1965)	

Tabela 3 Fonte dos atributos ambientais.

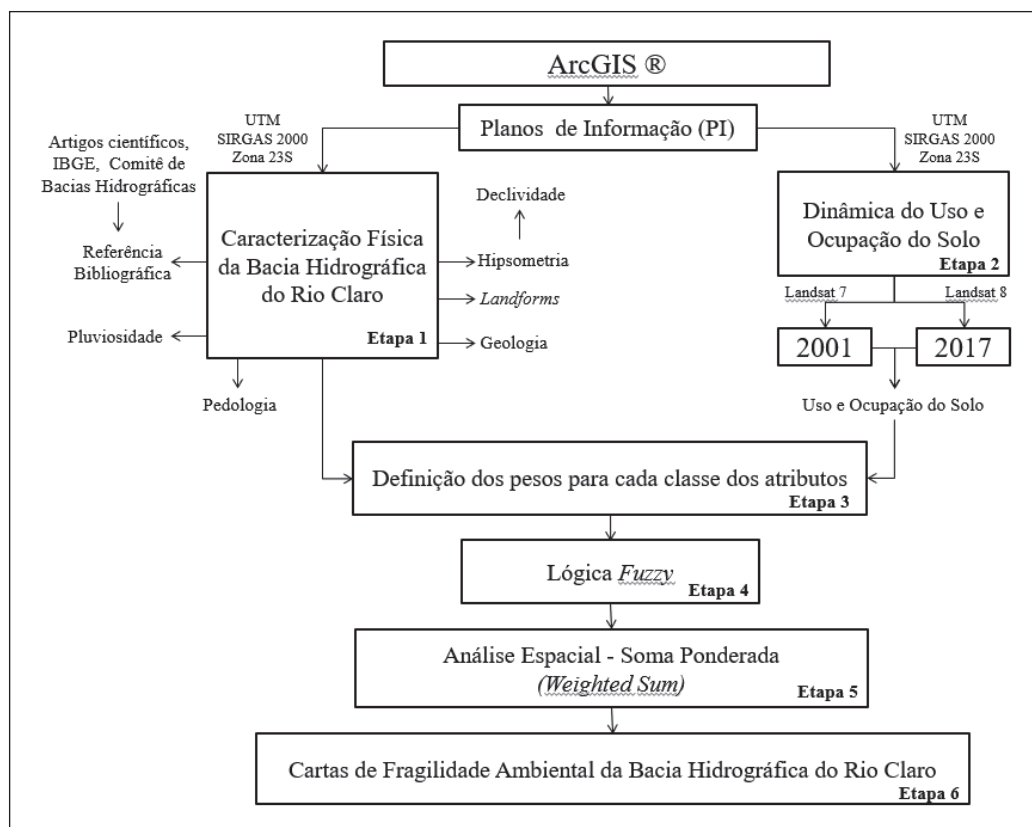


Figura 2 Etapas metodológicas para a análise da fragilidade ambiental na área de estudo.

Para a produção dos mapas de uso e cobertura do solo foram utilizadas as imagens Landsat 7 e Landsat 8 disponibilizadas pela plataforma digital do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS Earth Explorer). Após sua aquisição, as imagens passaram por um processamento prévio que consistiu na correção atmosférica, composição colorida, fusão com a banda pancromática (para a obtenção de resolução espacial de 15 metros), o que permitiu qualidade suficiente para a classificação, e por fim, a etapa consistiu no recorte com os limites da área de estudo. A classificação foi realizada de modo manual sobre as imagens Landsat processadas, com o operador delimitando os polígonos representados por cada tipo de uso (áreas urbanizadas, cana de açúcar, culturas permanentes, culturas temporárias, pastagem, silvicultura, mineração, solo exposto, corpos hídricos, e vegetação natural).

O mapa pedológico foi elaborado com base no conhecimento técnico e científico da área, e envolveu a interpretação e reclassificação dos planos de informação de geologia, declividade e hidrografia, validados em visitas de campo, ressaltando-se que estes documentos cartográficos também foram elaborados na escala de 1:50.000. A pedologia foi enquadrada nas classes da fragilidade ambiental da BHRC a partir das informações da textura dos materiais, da declividade em que se encontra através da fotointerpretação das unidades do relevo (BRASIL-ME, 1965), e da espessura das camadas dos solos presentes na área de estudo. Dessa forma, as áreas mais frágeis estão representadas por solos com textura média-argilosa, com declividades bastante acentuadas e espessura que não ultrapassa 5 metros, enquanto que as áreas menos frágeis apresentam solos com textura argilosa, em áreas que a declividade varia de baixa a moderada, e a espessura da camada de solo é de até 10 metros.

A carta de declividade foi elaborada a partir das informações obtidas do Projeto Topodata - INPE, que disponibiliza dados geomorfométricos derivadas de dados SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHIC MISSION) para todo o território nacional.

A pluviosidade da BHRC foi caracterizada por uma única classe (média) considerando as caracte-

terísticas pluviométricas de Massa & Ross (2012), devido a área apresentar precipitação anual distribuída de forma desigual, tendo períodos secos entre 2 e 3 meses no inverno e no verão, registrando alta intensidade de chuvas entre os meses de dezembro a março, com volumes que variam de 1300 a 1600 mm/ano.

As formas de relevo foram mapeadas por meio do modelo digital do terreno obtido pelo projeto Topodata (INPE, 2017). Os procedimentos computacionais foram realizados utilizando os recursos do software Arc GIS 10.5[®]. Após o mapeamento, o relevo foi classificado conforme Valeriano (2008) nas seguintes classes: convergente convexa; convergente retilínea; convergente côncava; divergente convexa; divergente retilínea; divergente côncava; planar convexa; planar retilínea; e planar côncava.

Cada classe dos atributos utilizados foi classificada segundo a sua importância quanto ao grau de fragilidade ambiental na BHRC. Os pesos foram determinados por atribuição direta com base em conhecimento empírico sobre a temática, e segundo proposto por Ross (1994), procurando ajustá-los ao número de classes, de forma a fornecer indicativo da contribuição do fator analisado para o nível de fragilidade.

A Figura 3 apresenta os planos de informação utilizados na elaboração das Cartas de Fragilidade Ambiental da área de estudo. Os pesos de cada atributo ambiental estão especificados na Tabela 4.

Após a definição dos pesos, os atributos ambientais foram individualmente equalizados através da Inferência Geográfica Fuzzy, no qual os fatores analisados são comparados entre si através de um critério de importância relativa, conforme uma escala pré-definida, que varia de 1 a 5 (Igual importância - Máxima importância). Tal análise apresenta valores contínuos, em que os dados são transformados para espaço de referência [0 ... 1] e posteriormente estes são processados por combinação numérica ou inferência fuzzy (Ruhoff *et al.*, 2005).

Posteriormente a aplicação desta técnica, os cinco atributos foram somados utilizando a ferramenta Weighted Sum do software Arc GIS 10.5[®].

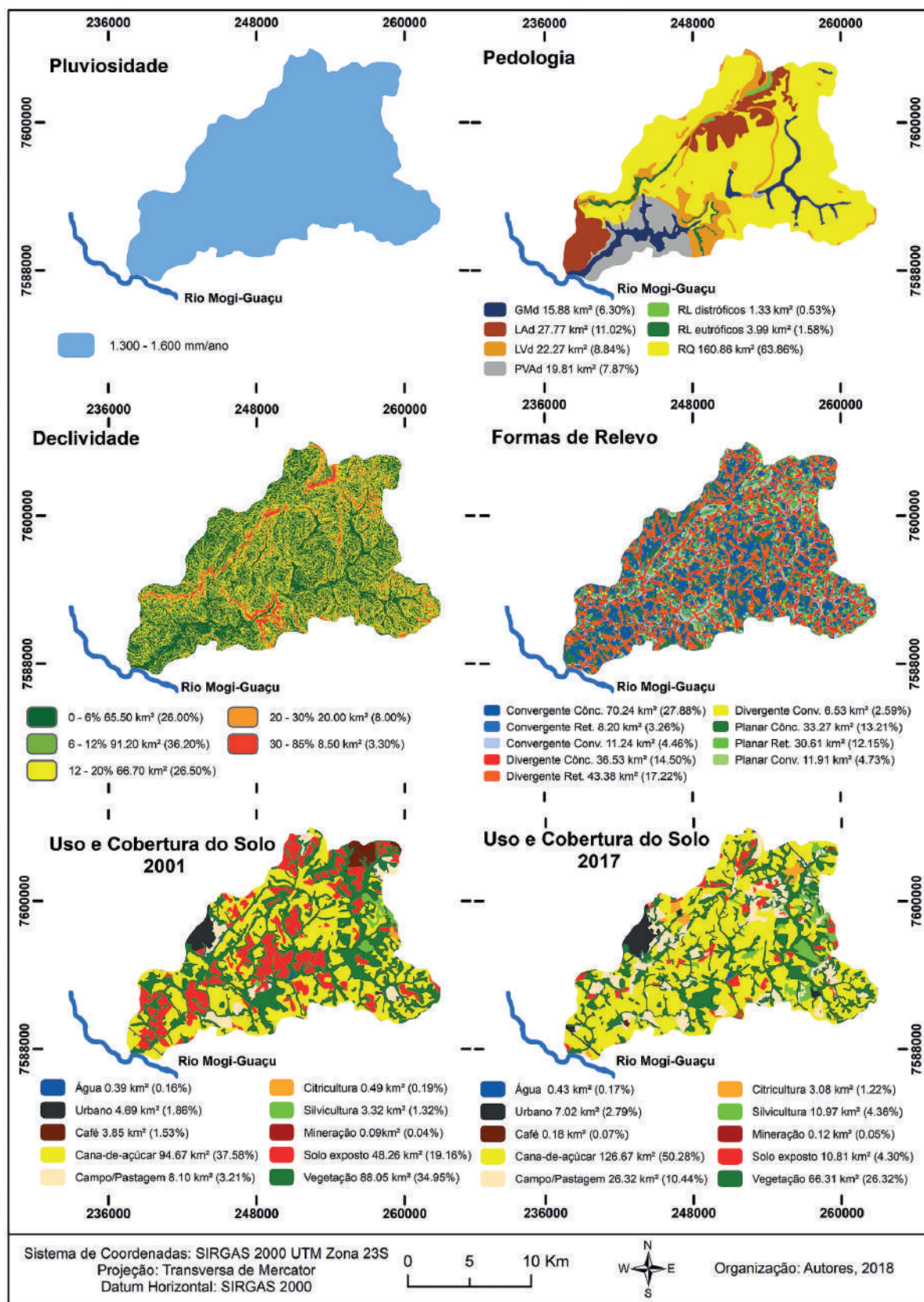


Figura 3 Planos de informação utilizados para as cartas de fragilidade ambiental.

Fragilidade Ambiental à Erosão em uma Bacia Hidrográfica Antropizada no Nordeste do Estado de São Paulo, Brasil
 Ana Paula Pereira Carvalho; João Vitor Roque Guerrero; Elton Vicente Escobar Silva; Mauricio José Rosso Pinto;
 Renata Maria Guerreiro Fontoura Costa Vaz; Camila Tavares Pereira; Reinaldo Lorandi; José Augusto de Lollo & Luiz Eduardo Moschin

Classes de Fragilidade Ambiental						
Atributos		Muito Fraca	Fraca	Média	Forte	Muito Forte
	Peso	1	2	3	4	5
	Fuzzy	0,00 - 0,02	0,02 - 0,04	0,04 - 0,06	0,06 - 0,08	0,08 - 1,00
Pluviosidade		-	-	1300 -1600 mm/ano	-	-
Pedologia		- Latossolos Vermelhos distróficos (LVd)*	- Latossolos Vermelhos distróficos (LVd)** - Latossolos Amarelos distróficos (LAd)*	- Argissolos Vermelhos Amarelos distróficos (PVAd)* - Latossolos Amarelos distróficos (LAd)**	- Argissolos Vermelhos Amarelos distróficos (PVAd)** - Latossolos Amarelos distróficos (LAd)***	- Neossolos Quartzarênicos (RQ)* - Gleissolos Melânicos distróficos (GMd)* - Neossolos Litólicos eutróficos (RL)* - Neossolos Litólicos distróficos (RL)**
Geologia		- Formações Intrusivas Básicas Tabulares - Formação Corumbataí	- Formação Piramboia	- Formação Botucatu	- Formações Pirassununga - Formação Santa Rita do Passa Quatro	- Quaternário
Formas de Relevo		- Convergente Côncava	- Planar Côncava - Divergente Côncava	- Planar Retilínea - Convergente Retilínea - Divergente Retilínea	- Convergente Convexa - Planar Convexa	- Divergente Convexa
Uso e ocupação do solo		- Corpos hídricos - Vegetação	- Urbano - Silvicultura	- Culturas permanentes - Cultura temporária - Pastagem	- Cana de açúcar	- Mineração - Solo Exposto
Informações das classes do atributo Pedologia						
*LVd - (Argiloso 35 - 60%, 3 < d < 45, espessura < 2 - 5m)				*PVAd - (Médio-argiloso, 3 < d < 45, espessura 2 - 5m)		
**LVd - (Argiloso 35 - 60%, 3 < d < 45, espessura 5 - 10m)				** PVAd - (Médio-argiloso, 3 < d < 45, espessura < 2m)		
*LAd - (Médio 15 - 35%, 3 < d < 20, espessura 5 - 10m)				*RQ - (Arenosa < 15%, 3 < d < 20, espessura < 2m)		
**LAd - (Médio 15 - 35%, 3 < d < 20, espessura > 10m)				*GMd - (Indiscriminado, d < 3, espessura < 2 - 5m)		
*** LAd - (Médio 15 - 35%, 3 < d < 20, espessura < 2m)				*RL - (Argiloso 35 - 60%, 45 < d < 75, espessura < 0,5m)		
				**RL - (Arenoso < 15%, 45 < d < 75, espessura < 0,5m)		

Tabela 4 Pesos adotados para cada atributo analisado para elaboração da Carta de Fragilidade Ambiental da área de estudo.

Por fim, foi gerada a carta de fragilidade ambiental em cinco classes: Muito Baixa; Baixa; Média; Alta; e Muito Alta.

4 Resultados

Com a comparação entre os mapas de uso e cobertura do solo dos anos de 2001 e 2017, observa-se que ocorreram significativas mudanças na bacia, destacando-se o aumento do cultivo de cana de açúcar (37,6% para 50,3%) e pastagens (3,2% para 10,4%), enquanto que algumas classes diminuíram, como solo exposto (19,15% para 4,3%) e vegetação nativa (34,95% para 26,4%). Vale destacar também,

que a área ocupada pelo cultivo de café reduziu-se em 95%, conforme apresentado na Tabela 5.

Tipos de Usos	2001 (km²)	2017 (km²)	Variação (%)
Água	0,40	0,45	12,50
Urbano	4,70	7,00	48,94
Café	3,80	0,20	-94,74
Cana de açúcar	94,60	126,70	33,93
Campo/Pastagem	8,10	26,30	224,69
Citricultura	0,50	3,10	520,00
Silvicultura	3,55	11,00	209,86
Solo Exposto	48,20	10,80	-77,59
Vegetação	88,00	66,30	-24,66

Tabela 5 Variação das classes de uso e cobertura do solo.

A Figura 4 apresenta as Cartas de Fragilidade Ambiental dos anos de 2001 e 2017, que mesmo tendo como referência um período de 16 anos, se observa que a fragilidade da BHRC não sofreu alterações significativas.

As cartas mostram a fragilidade em cinco classes (Muito Baixa; Baixa; Média; Alta; Muito Alta), com as classes de média e alta fragilidade correspondendo 80% da bacia, em ambos os anos.

Outra constatação foi que as demais classes apresentam seus percentuais constantes, referente ao intervalo de tempo estudado. As áreas identificadas com fragilidades muito baixa, baixa, e muito alta representam apenas 20% da área de estudo (Tabela 6).

Grau	Classificação	% área 2001	% área 2017
1	Muito Baixa	2,00	2,00
2	Baixa	11,00	11,00
3	Média	40,00	45,00
4	Alta	40,00	35,00
5	Muito Alta	7,00	7,00

Tabela 6 Percentual de área dos cinco graus de fragilidade ambiental na área de estudo, referente aos anos de 2001 e 2017.

A partir dos percentuais de área de cada classe de fragilidade ambiental, pode-se constatar que os atributos do meio físico considerados na análise foram decisivos na classificação da BHRC quanto à fragilidade ambiental a ocorrência de processos erosivos. Estas pequenas alterações nas classes média e alta são justificadas pelas mudanças no tipo de uso e ocupação do solo em ambos os anos de estudo.

Como exemplo, cita-se a diminuição de 12,5% da classe de fragilidade alta, ocasionada pela modificação do uso e cobertura do solo, pois a maior parte das áreas da bacia, que em 2001 apresentavam solo exposto (peso 5), foram ocupadas por áreas agrícolas, uma vez que no período estudado a área de solo exposto reduziu-se 77,00%, em razão do plantio da cana de açúcar na região, que teve um acréscimo de 33,93%.

Com base na análise realizada a partir da inter-relação dos atributos ambientais referentes ao meio físico, biótico e abiótico, abordados neste estudo, cada classe de fragilidade possui suas próprias características, conforme descritas a seguir:

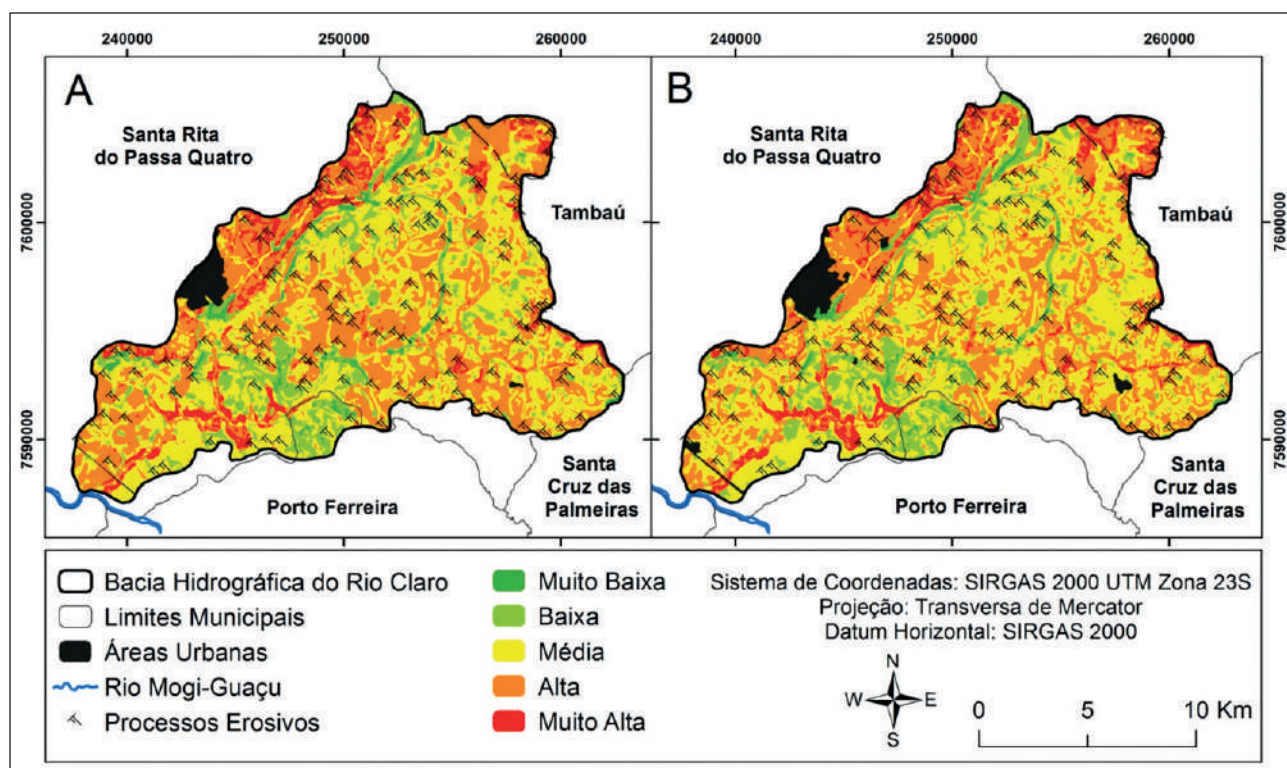


Figura 4 Evolução das classes de fragilidade ambiental do ano de 2001 (A) e do ano de 2017 (B).

Fragilidade Ambiental - Muito Baixa: concentra-se nas regiões norte e sul da BHRC, e está intimamente ligada à unidade geológica identificada pelas rochas Intrusivas Básicas Tabulares e aos Latossolos Vermelhos distrófico (textura Argilosa presentes em áreas com declividade que varia de 3% a 45%). Estas áreas estão associadas às formas de encosta divergente côncava, além de estarem recobertas por vegetação nativa, campos/pastagens, silvicultura e áreas agrícolas. A constituição da estrutura física da bacia não favorece a distribuição espacial dos atributos ideais para o surgimento desta classe, dessa forma, esta situação não condiciona ao aparecimento e/ou agravamento de feições erosivas.

Fragilidade Ambiental - Baixa: ocorre principalmente nas regiões Norte e Sul da bacia, associada aos Latossolos Vermelhos distróficos (textura Argilosa encontradas em áreas de baixa a média declividade), oriundo da formação geológica Intrusiva Básica Tabular e Argissolo Vermelho-Amarelo distróficos (textura Média Argilosa, presentes em declividades que variam de 3% a 45%), este tipo de solo é decorrente da formação Corumbataí, que é composta por siltitos variegados.

Esta classe se encontra mais concentrada em regiões que a forma de relevo é convergente côncava na porção sul, e divergente côncava na porção norte, estando inseridas principalmente em áreas de cultivo de cana de açúcar, bem como, em áreas de vegetação natural.

Considerando a integração dos atributos do meio físico, os fatores analisados apresentam maior estabilidade da área quanto ao surgimento de feições erosivas.

Fragilidade Ambiental - Média: é a classe mais predominante, e se encontra distribuída em toda a BHRC, a maior parte destas áreas se encontram em regiões de Neossolos Quartzarênicos provenientes da formação Pirambóia, este tipo de pedologia apresenta textura arenosa e espessura que varia de 2 a 10 metros de profundidade, em declividades médias (superiores a 3% e inferiores a 20%).

Encontra-se também esta classe em áreas de Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos, os quais

são menos espessos constituídos por camada que não ultrapassa a 5 metros de espessura. Estas áreas estão associadas à forma de encostas retilíneas, como: convergente retilínea e divergente retilínea.

As áreas que estão classificadas em média fragilidade, são cobertas, principalmente, por cana de açúcar. Com base nos pesos atribuídos ao uso e cobertura do solo, esta cultura foi ponderada com peso 4, fato esse que não influenciou de forma expressiva nesta classe de fragilidade, uma vez que os demais atributos do meio físico indicavam baixa fragilidade.

Fragilidade Ambiental - Alta: se distribui por toda a área de estudo, porém se concentra principalmente na região norte da bacia. A porção superior da BHRC apresenta um solo oriundo da Formação Santa Rita do Passo Quatro, que possui textura arenosa (com menos de 15% da fração argila), localizado em áreas que a inclinação da superfície varia de 3% a 20%, e estão associadas às formas de relevo convergente côncava, convergente retilínea, divergente retilínea e planar retilínea.

Na maior parte da área de estudo, apesar da unidade geológica predominante ser a Formação Pirambóia, as unidades pedológicas se destacam como o principal atributo que caracteriza a área em alta fragilidade, pois o tipo de solo predominante nesta região é um solo retrabalhado de textura arenosa, que torna a área mais frágil quanto ao aparecimento de processos erosivos.

Este grau de fragilidade também se situa ao entorno da área urbanizada, com isso pode-se observar baixa potencialidade à expansão do perímetro urbano. A área é composta por dois tipos principais de uso: cana de açúcar e pastagem.

Fragilidade Ambiental - Muito Alta: está concentrada no norte, nordeste e sudoeste da área de estudo. Na região norte e nordeste da bacia, a combinação da presença de solos arenosos decorrentes da formação Santa Rita do Passa Quatro e do uso e cobertura do solo (cultivo de cana de açúcar e presença de solo exposto) contribui para a fragilidade muito alta, conseqüentemente contribuindo com a maior instabilidade da região quanto à ocorrência de processos erosivos.

Na porção sul da área estudada, a fragilidade muito alta está associada a pedologia, nestas regiões os solos predominantes são os Gleissolos Melânicos distróficos, que estão localizados nas planícies ao entorno do Ribeirão do Meio, do Córrego do Taquari e da Invernada, em que a declividade é inferior a 3%, e a espessura varia no intervalo de 2 a 5 metros.

O aumento de áreas pertencentes a esta classe representa uma preocupação quanto ao equilíbrio dinâmico da bacia, evidenciando a necessidade de um manejo adequado do solo, e de práticas sustentáveis de uso e ocupação, de modo que o desenvolvimento da bacia possa ocorrer de forma racional e sustentável.

5 Conclusão

A BHRC apresenta 80% da sua área com média à alta fragilidade ambiental, em ambos os anos estudados. As demais classes (muito baixa, baixa e muito alta) não apresentaram alterações, visto que os seus percentuais de valores permaneceram constantes.

Pode-se concluir que os atributos do meio físico analisados foram determinantes no grau de fragilidade da bacia, enquanto que o uso e cobertura do solo influenciou o resultado nas áreas com média e alta fragilidade, pois nestes locais ocorreram mudanças consideráveis no tipo de uso e cobertura do solo, como a supressão de fragmentos de matas, além da alteração de áreas agrícolas que se encontravam no período de pousio e/ou entressafra no ano de 2001, para o cultivo intenso de monocultura no ano de 2017.

A área de estudo se destaca como uma bacia de uso agrícola, mais precisamente com o predomínio do cultivo de cana de açúcar, considerando esta situação, são necessários cuidados mais frequentes para assegurar o melhoramento e a estabilidade da área, pois este tipo de cultura depende de algumas manutenções que empregam maquinários de grande porte que compactam o solo, dificultando a infiltração de água e conseqüentemente aumentando a velocidade do escoamento superficial, o que poderá acarretar no surgimento de novos caminhos preferenciais

no solo, elevando o potencial ao aparecimento de feições erosivas.

O cultivo de cana de açúcar na bacia se encontra principalmente em áreas que a areia é a fração granulométrica predominante. No período de pós-colheita, o solo nestas áreas agrícolas fica exposto, e com isso menos protegido. Estas condições do meio físico e antrópico se configuram em um cenário que facilita o processo de desagregação das partículas do solo, aumentando a suscetibilidade à erosão, e possíveis assoreamentos nos afluentes do Rio Claro.

As cartas de fragilidade ambiental permitiram verificar as regiões que demandam maiores cuidados com a finalidade de prevenção da área quanto aos processos erosivos. Com isso, faz-se necessário a implantação de técnicas de manejo e conservação do solo independente do plantio. No mais, deve-se realizar o monitoramento contínuo da BHRC, principalmente nas áreas que apresentam alta e muita alta fragilidade ambiental.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão de recursos financeiros, aportados ao Processo nº. 2013/03699-5, os quais possibilitaram a geração de resultados laboratoriais essenciais na elaboração deste trabalho e informam que “o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”.

7 Referências

- Brasil. 1994. Lei nº 9034, de 27 de dezembro de 1994. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1994/lei-9034-27.12.1994.html>>. Acesso em: 22 de agosto de 2018.
- Brasil. 1965. Ministério do Exército. Fotos aéreas analógicas. 23cm x 23cm. 1:60.000.
- Burcher, C.L.; Valett, H.M. & Benfield, E.F. 2007. The land-cover cascade: relationships coupling land and water. *Ecology*, 88: 228 - 242.
- Celestino, E.F.; Celestino, L.F.; Silva, J.F.M. da; Kashiwaqui, E.A.L.; Makrakis, M.C.; Makrakis, S. 2019. Environmental Assessment in Neotropical Watersheds: A Multi-Factorial Approach. *Sustainability*, 11(2): 1 - 17.
- CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura). 2017. Clima dos municípios paulistas. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_531.html>. Acesso em: 25 de maio de 2017.

Fragilidade Ambiental à Erosão em uma Bacia Hidrográfica Antropizada no Nordeste do Estado de São Paulo, Brasil

Ana Paula Pereira Carvalho; João Vítor Roque Guerrero; Elton Vicente Escobar Silva; Mauricio José Rosso Pinto;
Renata Maria Guerreiro Fontoura Costa Vaz; Camila Tavares Pereira; Reinaldo Lorandi; José Augusto de Lollo & Luiz Eduardo Moschin

- Costa, C.W.; Piga, F.G.; Moraes, M.C.P.; Dorici, M.; Sanguineto, E.C.; Lollo, J.A.; Moschini, L.E.; Lorandi, R. & Oliveira, L.J. 2015. Fragilidade ambiental e escassez hídrica em bacias hidrográficas: Manancial do Rio das Araras - Araras, SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(4): 946-958.
- Cruz, B.B.; Manfré, L.A.; Ricci, D.S.; Brunoro, D.; Appolinario Jr, L. & Quintanilha, J.A. 2017. Environmental fragility framework for water supply systems: a case study in the Paulista Macro Metropolis area (SE Brazil). *Environmental Earth Sciences*, 76 (441): 1 - 13.
- Fushita, Á.T.; Camargo-Bortolin, L.H.G.; Arantes, E.M.; Moreira, M.A.A.; Cançado, C.J. & Lorandi, R. 2010. Fragilidade ambiental associada ao risco potencial de erosão de uma área da região geoeconômica Médio Mogi Guaçu superior (SP). *Revista Brasileira de Cartografia*, 63(4): 477-488.
- FIRJAN (Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro). 2015. IFDM 2015 - Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.firjan.com.br/ifdm/downloads/>>. Acesso em: 03 de julho de 2017.
- Feitosa, F.A.C. 2008. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro, CPRM: Labhid, 812p.
- FEHIDRO (Fundo Estadual de Recursos Hídricos). 2011. Plano da Bacia Hidrográfica: 2008-2011. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu, CETESB - SÃO PAULO. 170p.
- Gao, Y. & Zhang, H. 2018. The Study of Ecological Environment Fragility Based on Remote Sensing and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(5): 793 - 799.
- Garbiate, M.V.; Vitorino, A.C.T.; Tomasini, B.A.; Bergamin, A.C. & Panachuki, E. 2011. Erosão em entre sulcos em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35: 2145 - 2155.
- Guerrero, J.V.R.; Lollo, J.A. de; Moschini, L.E. & Lorandi, R. 2018. Carta de Fragilidade Ambiental como instrumento de planejamento e conservação de unidades aquíferas: o caso da bacia do rio Clarinho, SP. *Caderno de Geografia*, 28(53): 385 - 403.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2010. Informações estatísticas. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=354750&search=sao-paulo-santa-rita-do-passa-quatro>>. Acesso em 03 de julho de 2017.
- IG (Instituto Geológico). 1981a. Mapa Geológico - Folha Santa Rita do Passa-Quatro (SF-23-V-C-V- 1), Escala 1:50.000. São Paulo, 1981a.
- IG (Instituto Geológico). 1981b. Mapa Geológico - Folha Piracungua (SF-23-V-C-V-3). São Paulo, Escala 1:50.000. São Paulo, 1981b.
- IG (Instituto Geológico). 1984. Mapa Geológico - Folha Descalvado (SF-23-V-C-IV-4). São Paulo, Escala 1:50.000. São Paulo, 1984.
- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2017. TOPODATA, banco de dados geomorfométricos do Brasil. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 03 de julho de 2017.
- Kappes M.S.; Papatoma-köhle, M. & Keiler, M. 2012. Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, 32(2): 577 - 590.
- Lollo, J.A. & Sena, J.N. 2013. Establishing erosion susceptibility: analytical hierarchical process and traditional approaches. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72: 589-600.
- Lorandi, R.; Lollo, J.A. de & Guerrero, J.V.R. 2014. Carta de unidades aquíferas aplicada ao Zoneamento (Geo)Ambiental - Estudo de Caso na Bacia do Rio Claro. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 14, Covilhã, 2014. Lisboa, p.1-10.
- Lorandi, R.; Lollo, J.A.; Guerrero, J.V.R.; Stanganini, F.N.; Serikawa, V. 2015. Zoneamento geo(ambiental) da bacia hidrográfica do rio Claro (SP), na escala 1:50.000. Reinaldo Lorandi [coord.]. Departamento de Engenharia Civil (CCET/UFSCar). Processo FAPESP 2013/03699-5.
- Macedo, D.R.; Hughes, R.M.; Kaufmann, P.R. & Callisto, M. 2018. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. *Science of the Total Environment*, 635: 1267 - 1279.
- Manfré, L.A.; Silva, A.M.; Urbano, R.C. & Rodgers, J. 2013. Environmental fragility evaluation and guidelines for environmental zoning: a study case on Ibiuna (the Southeastern Brazilian region). *Environmental Earth Sciences*, 69: 947 - 957.
- Marquezola, D. de S.; Serikawa, V. de S.; Lollo, J.A. de & Lorandi, R. 2016. Emprego das unidades de relevo no planejamento territorial da bacia do Rio Claro (SP), na escala 1:50.000. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 6, Cuiabá, 2016. Cuiabá, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 255-264.
- Martín-Duque, J.F.; García, J.C. & Urquí, L.C. 2012. Geoheritage information for geoconservation and geotourism through the categorization of landforms in a Karstic Landscape: a case study from Covalagua and Las Tuerces (Palencia, Spain). *Geoheritage*, 4(1-2): 93 - 108.
- Massa, E.R. & Ross, J.L.S. 2012. Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP. *Revista do Departamento de Geografia*, 24: 57-79.
- Mezzalira, S.; Azevedo, A.A.B. de; Tominaga, L.K. & Massoli, M. 1981. *Léxico estratigráfico do Estado de São Paulo*. São Paulo, Instituto Geológico. 161p.
- MMA (Ministério do Meio Ambiente). 2003. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº32, de 15 de outubro de 2003. Disponível em: http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14. Acesso em: 29 junho 2017.
- Ross, J.L.S. 1990. *Geomorfologia, ambiente e planejamento*. São Paulo, Editora Contexto. 85p.
- Ross, J.L.S. 1994. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. *Revista do Departamento de Geografia*, 8: 63-74.
- Ruhoff, A.L.; Souza, B.S.P. e; Giotto, E. & Pereira, R.S. 2005. Lógica Fuzzy e zoneamento ambiental da Bacia do Arroio Grande. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia, 2005. São José dos Campos, INPE, p. 2355-2362.
- São Paulo-DAEE-IG-IPT-CPRM. 2005. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000 : nota explicativa / [coordenação geral Gerônimo Rocha]. São Paulo: DAEE-Departamento de Águas e Energia Elétrica: IG - Instituto Geológico: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo: CPRM Serviço Geológico do Brasil. 119p.
- Spörl, C. & Ross, J.L. 2004. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. *GEOUSP - Espaço e Tempo*, 15: 39-49.
- Tomczyk, A.M. 201. A GIS assessment and modelling of environmental sensitivity of recreational trails: The case of Gorce National Park, Poland. *Applied Geography*, 31(1): 339 - 351.
- Tricart, J. 1977. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro, IBGE/SUPREN. 97p.
- Valle, I.C.; Francelino, M.R. & Pinheiro, H.S.K. 2016. Mapeamento da Fragilidade Ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. *Floresta e Ambiente*, 23(2): 295 - 308.
- Valeriano, M.M. 2008. Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE-15318-RPQ/818, São José dos Campos, São Paulo. 72p.
- Zhao, G.; Mu, X.; Wen, Z.; Wang, F. & Gao, P. 2013. Soil erosion, conservation and Eco-environment changes in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development*, 24 (5): 499-510.
- Zhou, J.; Fu, B.; Gao, G.; Lü, Y.; Liu, Y.; Lü, N. & Wang, S. 2016. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. *Catena*, 137: 1 - 11.