



Artigo Original

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v20n12026p186-202

Submetido em: 01 jan. 2026

Aceito em: 21 ago. 2026

Análise de cenário de fragilidade ambiental na Microbacia Hidrográfica do Rio Mato Grosso, Saquarema (RJ)

Environmental fragility scenario analysis in the Mato Grosso River Microbasin, Saquarema (RJ)

Análisis de escenario de fragilidad ambiental en la Microcuenca Hidrográfica del Río Mato Grosso, Saquarema (RJ)

Vitor Ottoni Pastore  <https://orcid.org/0000-0001-5958-9452>

Fundação de Apoio a Escola Técnica

Doutorado em Geografia pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Professor da Fundação de Apoio à Escola Técnica do Estado do Rio de Janeiro.

E-mail: pastorevo@gmail.com

Vivian Castilho da Costa  <https://orcid.org/0000-0002-7636-0243>

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Doutorado em Programa de Pós Graduação em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Professora Associada da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

E-mail: vivianuerj@gmail.com

Resumo: Este artigo analisa a evolução da fragilidade ambiental e prediz cenários futuros para a Microbacia do Rio Mato Grosso, em Saquarema (RJ), área vulnerável a desastres naturais. Com dados abertos e geotecnologias (SIG), estimou-se a fragilidade potencial via variáveis naturais (geologia, solos, declividade e precipitação) e a fragilidade emergente pelas mudanças de uso da terra entre 2010 e 2020. As variáveis foram ponderadas pelo Processo Analítico Hierárquico (AHP) e integradas com lógica fuzzy. A projeção para 2030, utilizando Cadeias de Markov, revelou que 18,7% da microbacia (6,1 km²) possui sobreposição crítica de alta fragilidade, suscetibilidade a deslizamentos, inundações e vulnerabilidade social, configurando hotspots de risco socioambiental. Os resultados, analisados sob a ótica dos setores censitários e do Plano Diretor de Saquarema, reforçam a urgência de políticas públicas voltadas à conservação ambiental, Soluções Baseadas na Natureza e mitigação da fragilidade. O estudo oferece subsídios técnicos a gestores e pesquisadores para a transição de uma resposta reativa a desastres para uma cultura proativa de adaptação climática.

Palavras-chave: Sistema de Informação Geográfica. Risco ambiental. Cenário preditivo. Redução de riscos de desastres. Microbacia hidrográfica.

Abstract: This paper analyzes the evolution of environmental fragility and predicts future scenarios for the Mato Grosso River Micro-watershed in Saquarema (RJ, Brazil), an area vulnerable to natural disasters. Using open data and Geographic Information

Systems (GIS), potential fragility was estimated through natural variables (geology, soils, slope, and rainfall), while emergent fragility was assessed based on land-use changes between 2010 and 2020. The variables were weighted using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and integrated using fuzzy logic. The 2030 projection, based on Markov Chains, revealed that 18.7% of the micro-watershed (6.1 km²) presents a critical overlap of high fragility, landslide and flood susceptibility, and social vulnerability, forming socio-environmental risk hotspots. The results, analyzed through the lens of census tracts and the Saquarema Master Plan, highlight the urgent need for public policies focused on environmental conservation, Nature-based Solutions, and fragility mitigation. This study provides technical support for policymakers and researchers to transition from a reactive disaster response to a proactive culture of climate adaptation.

Keywords: Geographic Information System. Environmental risk. Predictive scenario. Disaster risk reduction. River microbasin.

Resumen: Este artículo analiza la evolución de la fragilidad ambiental y predice escenarios futuros para la Microcuenca del Río Mato Grosso, en Saquarema (RJ, Brasil), un área vulnerable a desastres naturales. Con datos abiertos y Sistemas de Información Geográfica (SIG), se estimó la fragilidad potencial mediante variables naturales (geología, suelos, pendiente y precipitación), mientras que la fragilidad emergente se evaluó por los cambios de uso del suelo entre 2010 y 2020. Las variables fueron ponderadas por el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) e integradas con lógica difusa (fuzzy). La proyección para 2030, utilizando Cadenas de Markov, reveló que el 18,7% de la microcuenca (6,1 km²) presenta una superposición crítica de alta fragilidad, susceptibilidad a deslizamientos e inundaciones, y vulnerabilidad social, configurando puntos críticos (hotspots) de riesgo socioambiental. Los resultados, analizados desde la perspectiva de los sectores censales y del Plan Director de Saquarema, refuerzan la urgencia de políticas públicas orientadas a la conservación ambiental, las Soluciones Basadas en la Naturaleza y la mitigación de la fragilidad. Este estudio ofrece bases técnicas a gestores e investigadores para la transición de una respuesta reactiva ante desastres a una cultura proactiva de adaptación climática.

Palabras clave: Sistema de Información Geográfica. Riesgo ambiental. Escenario predictivo. Reducción de riesgos de desastres. Microcuenca hidrográfica.

1 Introdução

Nas últimas décadas, o estado do Rio de Janeiro tem enfrentado recorrentes desastres ambientais associados a deslizamentos de encosta e inundações, intensificados pela ocupação desordenada de áreas frágeis e pelos efeitos das mudanças climáticas (Ross, 1994; Guerra, 2012). O município de Saquarema, localizado na Região das Baixadas Litorâneas fluminense, caracteriza-se pela elevada suscetibilidade natural a processos erosivos e hidrológicos críticos. A Microbacia do Rio Mato Grosso constitui um recorte estratégico para a análise desses processos, por reunir características que a tornam um laboratório natural de pesquisa: (i) elevada suscetibilidade geomorfológica, (ii) pressão antrópica crescente com expansão urbana, (iii) histórico documentado de vulnerabilidade social e (iv) localização em área de interesse ambiental para preservação de remanescentes de Mata Atlântica, sobretudo por estar circunvizinha ao município de Maricá, que faz parte da Microrregião Metropolitana do Rio de Janeiro e teve sua população aumentada de 127.461 em 2010 para 197.277 habitantes em 2022, de acordo com os Censos Demográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2026).

A análise da fragilidade ambiental em escala de microbacia possibilita compreender dinâmicas territoriais complexas e antecipar áreas críticas de risco, oferecendo subsídios técnicos robustos para gestores públicos. Além disso, permite identificar oportunidades de mitigação, especialmente quando articulada a políticas de planejamento territorial, à restauração ecológica e às chamadas Soluções baseadas na Natureza. Essas soluções, reconhecidas internacionalmente por organismos como a Organização das

Nações Unidas e o Banco Mundial, representam uma abordagem inovadora que integra objetivos de proteção ambiental com redução de riscos de desastres.

Metodologicamente, este estudo avança em relação à literatura precedente (Crepani et al., 2001; Ab'Saber, 2003) ao integrar: (i) Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto, (ii) modelagem espacial com lógica fuzzy, (iii) cenários preditivos baseados em Cadeias de Markov, e (iv) análise de sobreposição de vulnerabilidades múltiplas (ambiental, natural e social) (SANTOS, 2015). A metodologia proposta é replicável, de baixo custo e aplicada com dados abertos, características essenciais para sua utilização por municípios e comitês de bacias hidrográficas com recursos limitados.

O objetivo principal deste artigo é indicar áreas prioritárias para mitigação da fragilidade ambiental na Microbacia do Rio Mato Grosso. Os objetivos específicos incluem: (1) estimar a fragilidade potencial a partir de variáveis naturais em dois períodos (2010 e 2020); (2) analisar a fragilidade emergente decorrente das mudanças de uso e cobertura da terra; (3) modelar e analisar um cenário preditivo da fragilidade ambiental para 2030; (4) integrar análises de fragilidade, suscetibilidade e vulnerabilidade social; e (5) propor práticas e instrumentos de planejamento para mitigação da fragilidade ambiental identificada.

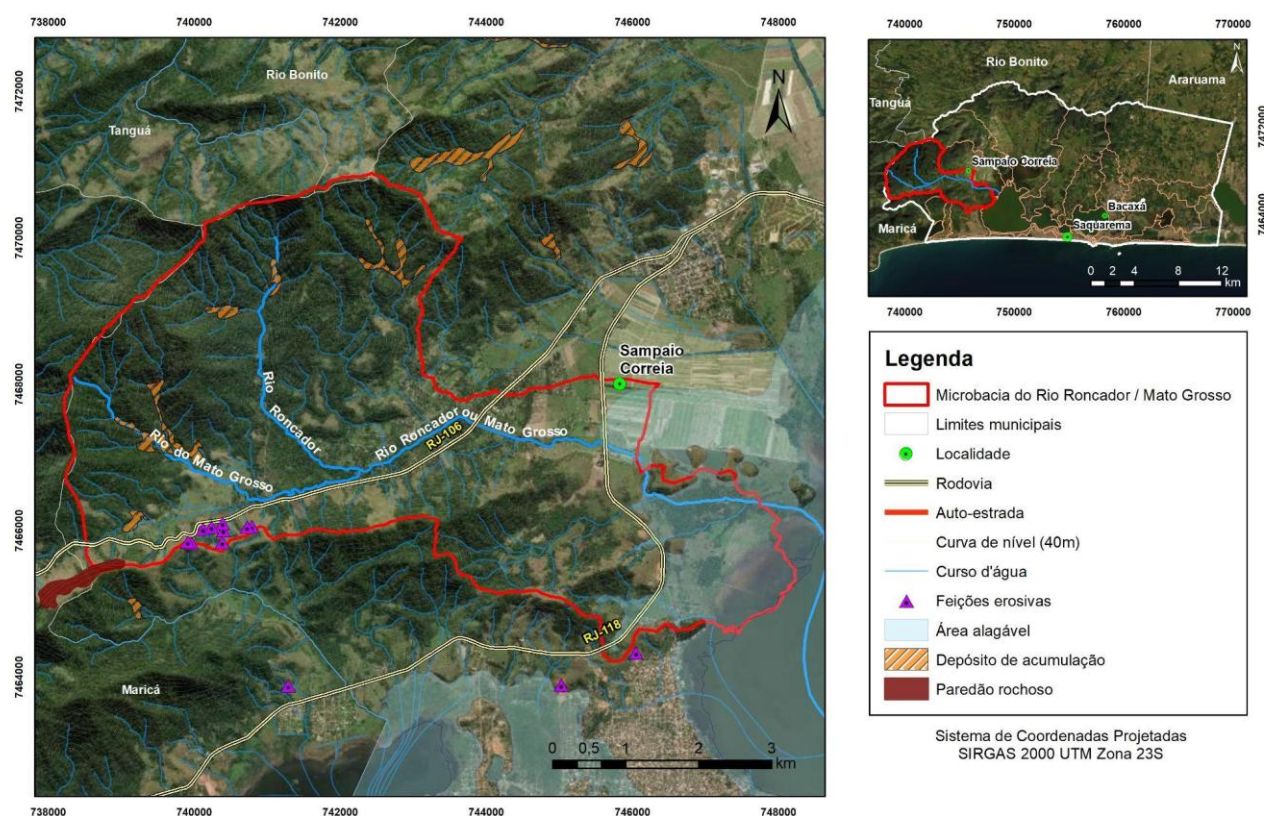
2 Material e Método

2.1 Área de Estudo e Caracterização

A Microbacia do Rio Mato Grosso localiza-se no município de Saquarema, Região das Baixadas Litorâneas do estado do Rio de Janeiro. A microbacia compreende uma área de 32,6 km² e elevação variando de 0 m (complexo lagunar de Saquarema) até 871 m (Figura 1). Saquarema foi escolhida como área de estudo por concentrar múltiplos fatores de risco, tais como: (i) elevada fragilidade geomorfológica com ocorrência de encostas íngremes, (ii) histórico de eventos extremos de deslizamentos de encosta e inundação documentados entre 2010 e 2020, e (iii) localização em zona de amortecimento de unidades de conservação.

Figura 1. Mapa de localização da Microbacia do Rio Mato Grosso, em Saquarema

Microbacia Hidrográfica do Rio Roncador / Mato Grosso



Fonte: Autor (2023), p. 87

Segundo a base vetorial de tipos climáticos do Brasil na escala 1:5.000.000 (IBGE, 2002), a Microbacia do Rio Mato Grosso compreende três unidades: Zona Costeira (6,5 km²); Tropical Brasil Central superúmido subseca, com temperaturas médias superiores a 18 °C em todos os meses do ano (14,7 km²); e Tropical Brasil Central úmido, com um a dois meses secos (11,2 km²). A combinação de elevada pluviosidade, encostas íngremes e ocupação desordenada tem favorecido a ocorrência de movimentos de massa e inundações na Microbacia do Rio Mato Grosso.

Segundo dados do SGB (2019), a litologia da Microbacia do Rio Mato Grosso é predominada pelo gnaiss do Complexo Tingui (37,2%) e por depósitos sedimentares do Quaternário (35,8%), seguidos pelas rochas da Unidade Búzios (25,7%). As demais unidades geológicas, incluindo o Granito Caju e o Complexo Região dos Lagos, apresentam ocorrência restrita, somando cerca de 1,3% da área total. Os solos predominantes são classificados como argissolos vermelho-amarelos com elevada suscetibilidade à erosão, particularmente quando associados a declividades superiores a 30° e cobertura vegetal reduzida. De acordo com o IBGE (2021), há presença de argissolos em 26,1 km² da microbacia, gleissolos em 3,6 km², espodossolos em 1,7 km², organossolos em 1,2 km² e 0,2 km² compreendendo corpo d'água.

2.2 Processamento de dados e integração em SIG

O processamento foi desenvolvido integralmente no Sistema de Informação Geográfica (SIG) livre de código aberto QGIS versão 3.24, e seus complementos Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), dzetsaka : Classification tool e Orfeo Toolbox (OTB), esses utilizados na classificação supervisionada de uso e cobertura da terra (UCT), além dos complementos CBERS-4A Downloader, utilizado no pré-processamento das imagens de 2020, QuickMapServices, para a exibição de mapas base, e Point sampling tool, para copiar valores de imagem para pontos de amostras. O *software* comercial ArcGIS Pro versão 3.2 - licença teste de 21 dias - foi utilizado para a conversão espectral e fusão da imagem multiespectral com a banda pancromática. O programa livre Google Earth Pro foi utilizado para consultar locais, dar suporte a geração de amostras de treinamento da classificação de imagens, e para interpretar visualmente as áreas de interesse. Já a geração dos cenários preditivos de fragilidade ambiental e UCT foi realizada no módulo Land Change Modeler (LCM) do *software* comercial IDRISI Selva versão 17.0, que desde dezembro de 2024 tem versão gratuita chamada TerrSet liberaGIS Geospatial Monitoring and Modeling Software.

2.2.1 Dados de entrada

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos de repositórios públicos de acesso livre:

- Imagens de satélite: SPOT-5 (04 de setembro de 2010, resolução espacial de 5 m) para t1 e CBERS-4A (22 de junho de 2020, com 2 m de resolução espacial) para t2, sendo selecionadas imagens com menor cobertura de nuvens;
- Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC), gerado a partir das camadas de curvas de nível e trechos de drenagem da base cartográfica contínua (IBGE, 2023), para cálculo da declividade;
- Dados climáticos: precipitação mensal do Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas (CHELSA, 2023) com resolução espacial de 1 km para 2010 e 2020;
- Dados pedológicos: camada de solos com escala 1:250.000 (IBGE, 2021);
- Dados geológicos: Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2019) em escala 1:400.000, com reclassificação conforme suscetibilidade a processos de erosão e movimentos de massa;
- Dados socioeconômicos: Censo Demográfico 2010 do IBGE com dados por setor censitário (renda, educação e acesso a serviços de infraestrutura);
- Zoneamento administrativo: Plano Diretor de Saquarema (PREFEITURA MUNICIPAL DE SAQUAREMA, 2023) com delimitação de macrozonas.
- Suscetibilidade a deslizamentos de encosta e inundações de Saquarema (SGB, 2019).

2.2.2 Estimativa da fragilidade potencial

A fragilidade potencial foi estimada a partir de quatro parâmetros do meio físico, conforme Ross (1994) e Crepani et al. (2001):

- Geologia: classificação hierárquica de 1 a 3 de acordo com resistência aos processos erosivos;
- Tipos de solo: classificação conforme suscetibilidade à erosão e infiltração;
- Intensidade pluviométrica: calculada a partir de valores mensais de precipitação e quantidade de meses chuvosos;
- Declividade: derivada de MDEHC, reclassificada em intervalos de fragilidade crescente (0-2%, muito baixa para morros e muito alta para planícies fluviais; 2-30%, baixa; >30%, alta).

As classes de cada parâmetro foram reclassificadas em cinco níveis de fragilidade (1=muito baixa, 2=baixa, 3=média, 4=alta, 5=muito alta), validando a correspondência entre níveis de fragilidade estimados e em pesquisas, observações de campo e notícias veiculadas.

Os pesos relativos de cada parâmetro foram determinados aplicando o Processo Analítico Hierárquico (AHP). A matriz de decisão foi submetida a procedimento de comparação pareada, com índice de consistência inferior a 0,10, indicando robustez da atribuição de pesos. Os pesos resultantes foram: geologia (4,9%), tipos de solo (37,3%), declividade (20,5%) e intensidade pluviométrica (37,3%), refletindo a maior relevância da intensidade de chuvas e tipos de solo, seguido da declividade e da geologia quanto à movimentos de massa e erosão na região.

Após reclassificadas, as camadas de fatores da fragilidade potencial foram convertidas para a lógica *fuzzy* com a função associação de poder, transformando os valores em funções de pertencimento (0-1). Essa abordagem não-booleana permite graduar a fragilidade de forma contínua. O mapa de fragilidade potencial foi gerado a partir da média ponderada das camadas convertidas para a lógica *fuzzy* na ferramenta "Calculadora Raster" do QGIS.

2.2.3 Análise da fragilidade emergente: classificação de uso e cobertura da terra

A fragilidade emergente foi estimada a partir da classificação supervisionada de UCT, realizada separadamente para os dois períodos, conforme especificado a seguir.

Para 2010 (t1) foi gerada uma imagem multiespectral do satélite SPOT-5 com 5 m de resolução espacial. Após pré-processamento (reamostragem, rejeição de pixels com nuvens, fusão com banda pancromática), foram coletadas 78 amostras de treinamento distribuídas geograficamente em toda a

microbacia, validadas em campo e em imagens históricas do Google Earth Pro. Foram testados os classificadores Spectral Angle Mapper, Mínima Distância, Maximum Likelihood, Modelo de Mistura Gaussiano, Random Forest, Support Vector Machines e K-Nearest Neighbors. O classificador com melhor desempenho foi o método de Treinamento do classificador (OTB), que apresentou índice Kappa de 0,73. Posteriormente foi realizada a edição vetorial de polígonos classificados erroneamente (correção de confusões espectrais em áreas de sombra e ambiguidades em bordas de classes), elevando o índice Kappa para 0,85 (qualidade "ótima").

Para 2020 (t2) foi gerada uma imagem multiespectral CBERS-4A com 2 m de resolução espacial. O mesmo procedimento de coleta de amostras (distribuição geográfica e validação de campo) foi executado, gerando 80 amostras de treinamento. O melhor classificador foi o Modelo de Mistura Gaussiana (dzetsaka), com índice Kappa de 0,67 (qualidade "muito boa"), que após edição foi elevado para 0,68. A resolução superior de t2 permitiu detecção de padrões de ocupação que não eram visíveis em 2010 (fragmentação de remanescentes florestais, expansão de loteamentos em áreas periféricas e abandono de áreas agrícolas).

Os mapas classificados foram convertidos em raster com pixel de 5 m para compatibilidade com as demais camadas de fragilidade. As classes de UCT identificadas foram: formação florestal, formação não-florestal, campo alagado, área urbana, pastagem, mosaico de usos (agricultura e pastagem), rio/lago/oceano. Cada classe foi reclassificada em nível de fragilidade emergente conforme seu potencial de aumento de escoamento superficial, exposição do solo e redução de infiltração.

2.2.4 Transição de uso e cobertura da terra

A matriz de transição entre t1 e t2 foi calculada mediante tabulação cruzada (*cross-tabulation*) das classificações supervisionadas rasterizadas no complemento SCP do QGIS. Este procedimento quantificou: (i) áreas de manutenção de classes (formação florestal em 2010 que continuou como formação florestal em 2020), (ii) áreas de conversão unidirecional (formação florestal para pastagem), e (iii) áreas de transições múltiplas intermediárias. Os resultados expostos com quantificação em km² e porcentagem da microbacia evidenciaram dinâmicas territoriais, como a redução da cobertura florestal e a expansão de áreas urbanas.

2.2.5 Cenário preditivo de fragilidade ambiental para 2030

O cenário da fragilidade ambiental de t3 foi construído no *software* IDRISI Selva, mediante integração de Cadeias de Markov e autômatos celulares. Assim, foi possível calcular as probabilidades de transição de classes de fragilidade ambiental entre t1 e t2 e gerar o cenário preditivo de t3, assumindo a continuidade das transições entre 2010 e 2020 para estimar o cenário preditivo.

2.2.6 Integração de suscetibilidades e vulnerabilidade social

O mapa de fragilidade ambiental de t3 foi sobreposto aos seguintes planos de informação:

- Cartas de suscetibilidade a movimentos de massa e inundação de Saquarema (SGB, 2019), que delimitam áreas quanto à suscetibilidade levando em consideração: eventos históricos, dados de precipitação extrema e modelagem hidrológica;
- Indicador de vulnerabilidade social calculado a partir de dados do Censo Demográfico 2010 (IBGE, 2026), considerando variáveis de infraestrutura, renda e escolaridade por setor censitário. As classes de cada variável da vulnerabilidade social foram convertidas para níveis de vulnerabilidade, seguido de média ponderada considerando pesos definidos pelo método AHP obtendo índice de consistência inferior a 0,03: (i) abastecimento de água por rede - 8,5%; sistema de esgoto - 2,7%; coleta de lixo - 2,7%; energia elétrica - 28,7%; renda - 28,7%; alfabetismo - 28,7%).

A sobreposição das três camadas (fragilidade ambiental, suscetibilidade a deslizamentos de encosta e inundação, e vulnerabilidade social) permite identificar *hotspots* de risco socioambiental (SANTOS, 2015) definidos como áreas de simultânea ocorrência de alta fragilidade ambiental, elevada suscetibilidade a desastres e vulnerabilidade social. Esses *hotspots* representam prioridades máximas para intervenção de mitigação.

2.2.6 Análise setorial e de macrozonas

Os resultados de fragilidade ambiental (t1, t2 e t3) foram analisados em relação a duas divisões administrativas/de planejamento:

- Setores censitários: 15 setores que cobrem a microbacia de acordo com o Censo Demográfico de 2022, permitindo desagregação de dados demográficos e análise da distribuição espacial de vulnerabilidade;
- Macrozonas do Plano Diretor de Saquarema na Microbacia do Rio Mato Grosso: total de 4 macrozonas na microbacia, nomeadas Macrozona Ambiental de Sampaio Correia, Macrozona Rural de Sampaio Correia, Macrozona Rururbana de Jaconé e Macrozona Urbana de Jaconé. Essa análise reflete a política de zoneamento municipal e permite alinhar resultados de fragilidade com instrumentos de gestão existentes.

Para cada setor censitário e macrozona, foram calculadas estatísticas zonais (média, máximo, mínimo, desvio padrão, mediana e moda) das classes de fragilidade ambiental estimada para t3, permitindo a comparação.

3 Resultados

3.1 Dinâmica de uso e cobertura da terra (2010-2020)

A análise de transição entre as classificações de UCT de t1 e t2 revelou dinâmicas territoriais significativas:

- Formação florestal: 92,0 % das áreas classificadas como formação florestal em t1 mantiveram essa classe em t2, sendo o restante classificado principalmente como mosaico de usos, pastagem ou restinga arborizada. O aumento de 41,4% para 64,2% da cobertura de formação florestal entre t1 e t2 foi impulsionado principalmente pela transição do que foi classificado como restinga arborizada, pastagem e mosaico de usos em t1 para formação florestal em t2, provavelmente causado pela melhoria na qualidade da imagem utilizada para t2;
- Pastagem: aumentou de 7,5% para 12,0%, com transição de formação florestal para pastagem em 1,3% da vegetação classificada em t1, indicando pressão antrópica sustentada para conversão de florestas em áreas de pastoreio;
- Mosaico de usos: reduziu 20,4% para 17,6%, podendo estar relacionada à outras transições;
- Área urbana: crescimento de 1,2% para 2,2%, principalmente a partir de áreas classificadas como mosaico de agricultura e pastagem (0,9% da sua cobertura original alterada) e como pastagem (0,7%), com padrão de expansão concentrado na Macrozona Urbana de Jaconé, próximo à rodovia RJ-106;
- Campo alagado e área pantanosa: redução de 8,0% para 2,0%, sugerindo possível intervenção antrópica ou reclassificação decorrente de mudanças de umidade sazonal.

A matriz de transição indicou a transição de pixels classificados como formação florestal em t1 principalmente para mosaico de usos (4,89%) e pastagem (2,2%), indicando uma potencial pressão agropecuária sobre remanescentes de Mata Atlântica na microbacia.

3.2 Fragilidade potencial e emergente

A fragilidade potencial, estimada a partir de parâmetros naturais invariáveis no curto prazo (geologia, tipos de solo, declividade e intensidade pluviométrica), apresentou distribuição que reflete a geomorfologia complexa da microbacia:

- Áreas de muito alta fragilidade potencial concentravam-se em encostas íngremes ($>30^\circ$) com solos rasos, particularmente nas proximidades dos afluentes do Rio Mato Grosso;

- Áreas de baixa fragilidade potencial correspondiam principalmente às planícies fluviais de baixa declividade.

Quando sobreposta a classificação de UCT, a fragilidade emergente revelou:

- Simultânea condição de alta fragilidade potencial e cobertura de pastagem ou mosaico de usos, indicando elevado risco, tanto em t1 (17,2% da microbacia) quanto em t2 (16,3%).

3.3 Fragilidade ambiental total e tendências

A integração de fragilidade potencial e emergente, ambas com o mesmo peso, gerou a representatividade das classes de fragilidade ambiental na Microbacia do Rio Mato Grosso para t1 e t2 (Quadro 1).

Quadro 1. Representatividade das classes de fragilidade ambiental de 2010 e 2020

Classe de fragilidade	2010 (t1)	2020 (t2)	Alterações
Muito baixa	10,00%	10,64%	Aumento de 0,64%
Baixa	70,04%	70,05%	Aumento de 0,01%
Média	16,35%	15,30%	Redução de 1,05%
Alta	3,58%	3,89%	Aumento de 0,31%
Muito alta	0,03%	0,12%	Aumento de 0,08%

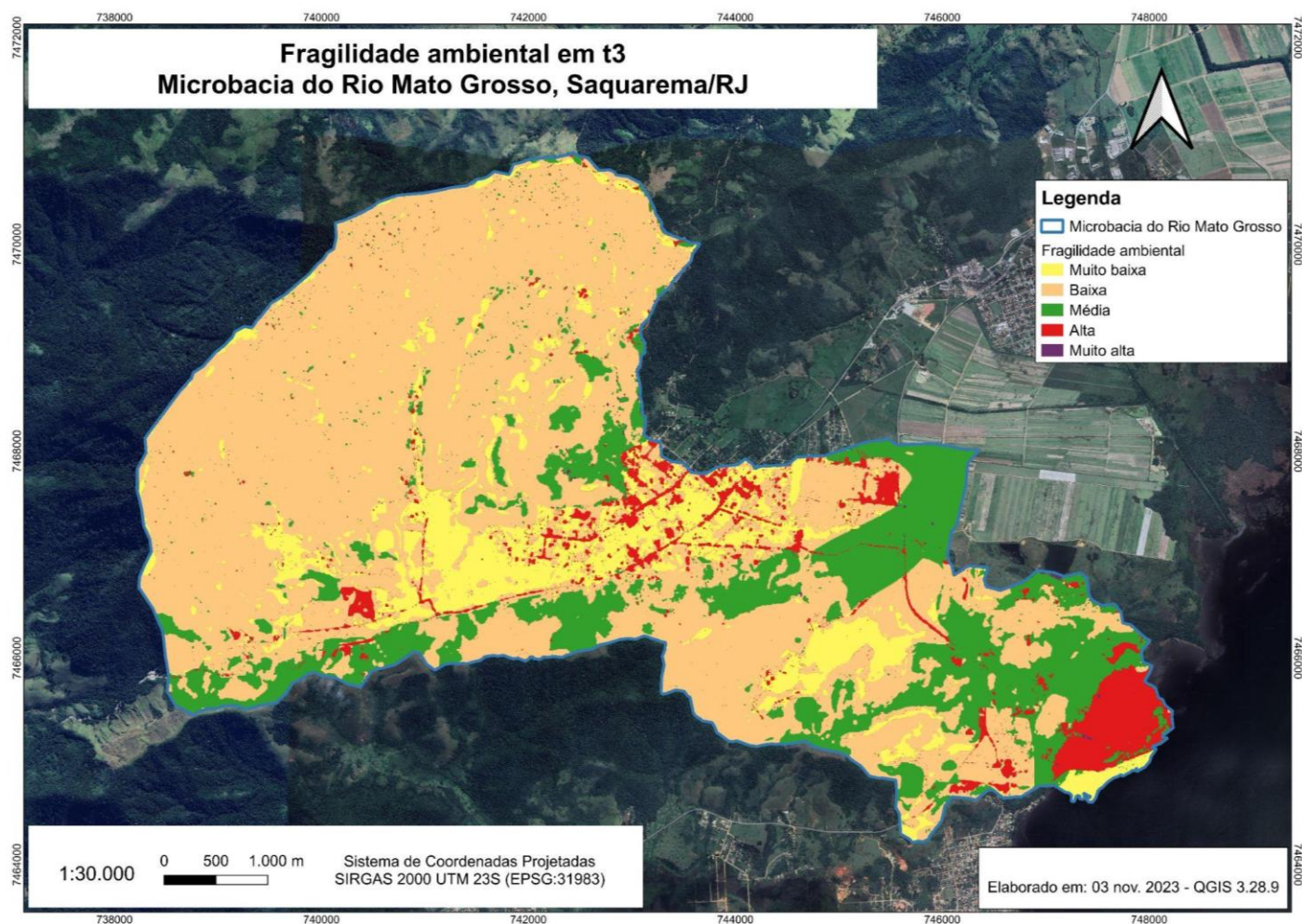
Fonte: Os autores (2026)

Apesar das baixas diferenças de porcentagem total das classes de fragilidade ambiental entre t1 e t2 para a Microbacia do Rio Mato Grosso, a redução de área total ocorreu somente para a classe de média fragilidade, enquanto as classes de muito baixa e de alta fragilidade ambiental foram as classes que mais cresceram de t1 para t2. Ainda, diversas alterações na distribuição espacial das classes foram observadas, sendo consideradas na elaboração do cenário preditivo para t3 (2030).

3.4 Cenário preditivo para 2030

Aplicando Cadeias de Markov e autômatos celulares com as mesmas probabilidades de transição observadas entre 2010-2020, a projeção para 2030 está representada na Figura 2. Já as representatividades das classes da fragilidade ambiental projetada para t3 estão dispostas na Figura 3.

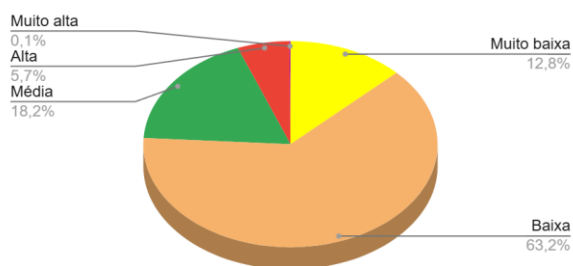
Figura 2. Mapa do cenário preditivo de fragilidade ambiental para 2030



Fonte: Autor (2023), p. 226

Figura 3. Representatividades das classes de fragilidade ambiental projetada para 2030

Fragilidade ambiental estimada para 2030 (t3)



Fonte: Os autores (2026)

Este cenário preditivo da fragilidade ambiental evidencia que, mantidas as tendências atuais de uso e cobertura da terra, aproximadamente 5,8% da microbacia apresentará alta ou muito alta fragilidade ambiental em 2030, superando os 3,6% de 2010 e 4,0% de 2020. Essa maior fragilidade ambiental poderá ocorrer principalmente onde houve conversão de floresta para pastagem ou mosaico de usos, além de

encostas, proximidade de rodovias e do complexo lagunar de Saquarema, assim como nas áreas mais ocupadas.

3.5 Integração: fragilidade, suscetibilidade e vulnerabilidade social

A sobreposição dos três planos de informação permitiu identificar:

- Áreas de risco crítico (*hotspots* socioambientais): 6,1 km² (18,7% da microbacia) apresentam simultânea ocorrência de: (i) média a muito alta fragilidade ambiental em t3, (ii) média ou alta suscetibilidade a deslizamentos de encosta ou inundação conforme o SGB, e (iii) vulnerabilidade social média a muito alta. Dessas áreas, 3,1 km² são suscetíveis a deslizamentos de encosta e 3,0 km² a inundações. A distribuição espacial concentra-se em três eixos principais:
- Encostas de elevada declividade, principalmente a Leste do Rio Roncador;
- Margem Sul da rodovia RJ-106;
- Proximidade da Lagoa de Urussanga/Mombaça, parte do complexo lagunar de Saquarema.

3.6 Análise de setores censitários prioritários para a mitigação

Dos 15 setores censitários na microbacia, 11 apresentaram pelo menos alguma área com alta ou muito alta fragilidade ambiental em t3, sendo a baixa fragilidade a classe mais representativa nos setores. Considerando valores médios, os 15 setores censitários foram estratificados em três grupos de fragilidade ambiental estimada para t3:

- Média a muito alta fragilidade (valor médio >3,0 em escala 1-5): somente 1 dos 15 setores, estando localizado nas fozes dos Rios Mato Grosso e Roncador, que desaguam na Lagoa de Urussanga/Mombaça.
- Média fragilidade (valor médio entre 2,0 e 3,0): 11 dos 15 setores, localizados majoritariamente na passagem das rodovias RJ-106 e RJ-118, além dos cursos d'água em áreas mais elevadas e da proximidade com a sede do distrito de Sampaio Correia.
- Baixa fragilidade (<2,0): 3 setores em áreas rurais com alta cobertura florestal, menor população, proximidade dos Rios Roncador e Mato Grosso e principalmente localizados a norte da rodovia RJ-106.

O setor censitário mais crítico, localizado imediatamente a sul da Rodovia RJ-106 e próximo à Lagoa de Urussanga/Mombaça, apresentou áreas com valores máximos de fragilidade ambiental (5 em escala 1-5)

em t1 e t2, além do maior valor médio de fragilidade ambiental entre os setores tanto para t1, t2 quanto para t3, evidenciando sua condição de maior fragilidade ambiental estimada para 2030.

3.7 Análise do Plano Diretor por macrozonas prioritárias para a mitigação da fragilidade ambiental

As quatro macrozonas apresentaram perfis contrastantes:

- Macrozona Urbana de Jaconé: valor médio de fragilidade ambiental de 2,2 (2010), 2,3 (2020) e 2,6 (2030 projetado). Representa somente 0,7% da área da microbacia, porém apresentou os maiores valores médios de fragilidade ambiental em 2010, 2020 e projetada para 2030, que pode ser agravada pela expansão de loteamentos e outras ocupações em áreas não planejadas.
- Macrozona Ambiental de Sampaio Correia: valor médio de 2,1 (2010), 2,1 (2020) e 2,2 (2030), indicando condição intermediária com possibilidade de estabilização mediante políticas de conservação. Representa 77,2% da área da microbacia;
- Macrozona Rururbana de Jaconé: valor médio de 2,0 (2010), 2,0 (2020) e 2,1 (2030), indicando os menores valores médios estimados de fragilidade ambiental. Representa 21,0% da área da microbacia;
- Macrozona Rural de Sampaio Correia: valor médio de 2,1 (2010), 2,0 (2020) e 2,4 (2030), mantendo média fragilidade graças à elevada cobertura florestal. No entanto, evidencia leve tendência de aumento, sugerindo pressão periférica de ocupação e alteração na cobertura da terra. Representa aproximadamente 1,1% da área da microbacia.

3.8 Validação metodológica e limitações

A metodologia integrada de fragilidade ambiental demonstrou capacidade de síntese de informações heterogêneas (dados naturais, antrópicos, sociais) mediante abordagem espacial explícita em SIG. A utilização de lógica *fuzzy* em vez de classificação booleana permitiu representação gradual e mais realista da variação espacial contínua da fragilidade.

A calibração da fragilidade potencial com validação de campo conferiu robustez aos valores de fragilidade estimados. A aplicação de Cadeias de Markov para projeção de UCT, embora assumindo estacionariedade de processos de transição, oferece aproximação razoável para projeção decadal, especialmente quando complementada por autômatos celulares que incorporam dependência espacial.

Limitações importantes incluem: (i) dados demográficos referidos a 2010, que podem não refletir mudanças na vulnerabilidade social ocorridas entre 2010-2020; (ii) resolução espacial de modelos digitais de

elevação que pode suavizar topografia em área montanhosa; (iii) simplificação da dinâmica hidrológica devido ao uso de dados pluviométricos e fluviométricos não calibrados *in situ* (restrição financeira de coleta de dados primários).

3.9 Implicações para gestão de riscos e ordenamento territorial

Os resultados indicam que a Microbacia do Rio Mato Grosso encontra-se em processo dinâmico de fragilização ambiental, com trajetória não-reversível sem intervenções ativas de mitigação. A integração de fragilidade com a suscetibilidade a deslizamentos de encosta e inundação e com a vulnerabilidade social gerou informação estratégica para a priorização de ações:

- Áreas de intervenção imediata (*hotspots* com sobreposição crítica): recomenda-se imediata implementação de instrumentos de proteção (zoneamento restritivo, restrição de expansão urbana) e obras estruturais de proteção (dissipadores de energia, canaletas de drenagem) em setores prioritários.
- Áreas de restauração ecológica: constituem oportunidades de restauração, especialmente em Áreas de Preservação Permanente (APPs). Programas de restauração com espécies nativas da Mata Atlântica, implementados com participação comunitária, poderiam elevar significativamente a taxa de infiltração e reduzir o escoamento superficial crítico em períodos de chuva intensa.
- Soluções Baseadas na Natureza: áreas prioritárias para mitigação podem incorporar: (i) restauração de matas ciliares (redução de erosão e melhoria de infiltração), (ii) implantação de sistemas de drenagem sustentável em áreas urbanas (redução de escoamento superficial), (iii) criação de corredores ecológicos (aumento de cobertura vegetal e conectividade de habitats), (iv) manejo de trilhas em áreas de recreação (redução de erosão localizada).

3.10 Articulação com políticas públicas

Os resultados reiteram a necessidade de reorientar o planejamento municipal de Saquarema. O Plano Diretor atual (2006, com limitadas atualizações em 2015) foi concebido em contexto de menor pressão urbana e não contempla adequadamente os cenários de fragilidade ambiental explicitados neste estudo. Recomenda-se:

- Revisão do zoneamento de macrozonas, com redefinição de áreas permitidas para expansão urbana excludente de zonas de alta e muito alta fragilidade estimada para t3;

- Implementação de instrumentos de proteção ambiental previstos no Estatuto da Cidade, como Área de Proteção Ambiental Municipal ou Reserva Particular do Patrimônio Natural em remanescentes florestais críticos;
- Integração com Política de Proteção Social: programas de reassentamento de população vulnerável em áreas de elevado risco, com financiamento federal de fontes como Fundo de Contingência para Calamidades Públicas;
- Articulação com o Comitê da Bacia Hidrográfica Lagos São João: inserção de resultados em instrumentos de gestão de bacia (Plano de Recursos Hídricos, Enquadramento de Corpos d'Água) para subsidiar políticas integradas de redução de riscos.

4 Considerações finais

A modelagem espacial de cenários de fragilidade ambiental revelou-se eficaz, replicável e de baixo custo, configurando-se como instrumento estratégico para a gestão de riscos no estado do Rio de Janeiro e em regiões de características similares. A integração com dados de suscetibilidades a deslizamentos e inundações, assim como com indicadores socioeconômicos, possibilitou identificar zonas de risco socioambiental que demandam intervenção prioritária para prevenção de desastres.

Os resultados indicam a Microbacia do Rio Mato Grosso para a adoção urgente de políticas preventivas que integrem: (i) planejamento territorial restritivo em áreas de alta e muito alta fragilidade ambiental, (ii) investimento em Soluções baseadas na Natureza (restauração ecológica, manejo de drenagem, entre outros), (iii) gestão do risco com foco em proteção social das populações vulneráveis, e (iv) fortalecimento de mecanismos participativos de governança ambiental.

Essa análise contribui para transição paradigmática de uma abordagem reativa de resposta a desastres (que predomina atualmente no Brasil) para uma cultura proativa de prevenção, mitigação e adaptação climática. Metodologicamente, oferece *framework* replicável para municípios e comitês de bacias hidrográficas com recursos limitados, baseando-se exclusivamente em dados abertos e ferramentas de Geoprocessamento livres, removendo barreiras de acesso às geotecnologias avançadas.

Pesquisas futuras deverão aprofundar: (i) incorporação de projeções de mudanças climáticas (dados IPCC) nos cenários de fragilidade, (ii) análise de capacidade de resiliência comunitária além de vulnerabilidade passiva, (iii) modelagem de possibilidades de intervenção de restauração ecológica com prognóstico de redução de fragilidade, e (iv) aplicação de *machine learning* para otimização de áreas prioritárias de mitigação considerando custos de intervenção e benefícios de redução de risco.

Referências

- AB'SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 144 p.
- AUTOR, ... 2023.
- CHELSEA – Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. **Downloads**. Disponível em: <https://www.chelsa-climate.org/datasets>. Acesso em: 31 ago. 2023.
- CREPANI, E. et al. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/laf/sap/artigos/CrepaneEtAl.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2026.
- GUERRA, A. J. T. Erosão de solos e movimentos de massa associados às encostas. *In*: GUERRA, A. J. T.; COELHO, M. C. N. (Org.). **Unidades de conservação: abordagens e características geográficas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. p. 83-108.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Clima**: 2002 Clima – 1:5.000.000. 2002. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/climatologia/15817-clima.html>. Acesso em: 15 abr. 2026.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Download**: Informações ambientais. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 15 abr. 2026.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Bases Cartográficas Contínuas**: BC25 - Rio de Janeiro (versão 2018, EDGV 3.0). Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 14 abr. 2026.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censos**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/censos>. Acesso em: 15 abr. 2026.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SAQUAREMA. **Plano Diretor Municipal de Desenvolvimento Sustentável**. Lei nº 71, de 08 de dezembro de 2021. 2023. Disponível em: <https://planodiretor.saquarema.rj.gov.br/wp-content/uploads/2023/05/Lei-Complementar-71-2021-Plano-Diretor-Municipal-de-Desenvolvimento-Sustentavel.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 8, p. 63-74, 1994. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>. Disponível em: https://revistas.usp.br/rdg/pt_BR/article/view/47327. Acesso em: 15 abr. 2026.
- SANTOS, J. O. Relações entre fragilidade ambiental e vulnerabilidade social na susceptibilidade aos riscos. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, n. 2, p. 75-90, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4215/RM2015.1402.0005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mercator/a/sHGwqmtgTYSq55cH6HXkT7B>. Acesso em: 15 abr. 2026.

SGB – Serviço Geológico do Brasil. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação**: município de Saquarema, RJ. Brasília: SGB, 2019. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/21438>. Acesso em: 15 abr. 2026.