

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TATUÍ

CLAUDIO MACHADO JUNIOR

Sorocaba

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TATUÍ

CLAUDIO MACHADO JUNIOR

ORIENTADOR: Prof. Dr. Emerson Martins Arruda

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia como requisito à obtenção do título de Mestre em Geografia. Linha de pesquisa: Estudos ambientais e análise espacial.

Sorocaba
2025

Machado Junior, Claudio

ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E AMBIENTAL DA BACIA

HIDROGRÁFICA DO RIO TATUÍ / Claudio Machado
Junior -- 2025.

125f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São
Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Emerson Martins Arruda

Banca Examinadora: André de Oliveira Souza, Kleython
de Araújo Monteiro

Bibliografia

1. Geomorfologia Ambiental. 2. Análise Sistêmica. 3.
Fragilidade Ambiental. I. Machado Junior, Claudio. II.
Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano - CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Humanas e Biológicas
Programa de Pós-Graduação em Geografia

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Claudio Machado Junior, realizada em 22/08/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Emerson Martins Arruda (UFSCar)

Prof. Dr. André de Oliveira Souza (UFOB)

Prof. Dr. Kleython de Araújo Monteiro (UFAL)

Dedico esta dissertação a todos aqueles que me fizeram nunca desistir e tornaram a vida mais leve para ser vivida, além daqueles que nunca deixaram de acreditar em um mundo ambientalmente saudável.

Agradecimentos

Agradeço a todos que estiveram ao meu lado pela paciência e amor empregados durante minha jornada, não só nesta pesquisa, mas durante toda a vida. À minha esposa Andressa, agradeço por cada segundo dedicado à minha e à nossa vida, pois sem todos esses momentos esta dissertação não teria se materializado; à minha mãe, Márcia, que me educou por muitas vezes sozinha e prezou pela minha vida em todos os momentos, agradeço por todo amor; ao meu pai, Claudio, que hoje mantenho uma amizade sincera, agradeço pelo apoio em todas as minhas escolhas, em especial ao meu ingresso na graduação em Geografia; aos meus avós maternos Helena e Domingos, agradeço por todo afeto, amor, cafés, almoços e momentos ao lado de vocês; aos meus amigos Gustavo e Larissa, que desde a graduação nesta mesma universidade, mesmo que de longe, estiveram presentes, agradeço por todo apoio, carinho e empatia; ao Barba, à Paola, Helena, ao seu Paulo (Rogério) e à dona Adriana, que estiveram ao meu lado em inúmeros momentos de amizade e carinho e que sempre me receberam em suas casas com a maior alegria e afeto; ao meu colega de trabalho e amigo André, sua esposa Tatiana e seu afilhado Matheo, agradeço por todas as vezes que me receberam em sua casa da melhor forma possível, além de todas as conversas sinceras e prazerosas; ao Tom, sua esposa Gabriele e à Melissa, agradeço por terem sido tão presentes na minha vida nos últimos meses e por terem me alegrado tanto; aos demais amigos e familiares que estiveram presentes nos momentos mais importantes da minha vida, agradeço por cada instante que se dedicaram à minha presença; ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Emerson Martins Arruda, agradeço por toda dedicação, tempo despendido no meu aprendizado, correções, conversas, risadas, cafés, reuniões e oportunidades concedidas desde a iniciação científica; a todos(as) os(as) meus colegas de trabalho, professores(as), coordenadores(as) e diretores(as), agradeço por estarem presentes todos os dias exercendo a profissão mais linda de todas, vivendo um sonho (como eu digo); a todos(as) meus(as) professores(as) do ensino básico e superior, agradeço pelo amor e empenho à profissão, pois me inspiro em vocês; e por último, agradeço a todos(as) os(as) servidores da Universidade Federal de São Carlos – *campus* Sorocaba, pelo trabalho prestado à comunidade.

Resumo

MACHADO JUNIOR, Claudio. Análise Geomorfológica e Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2025.

Este trabalho é uma pesquisa de geomorfologia ambiental que se pautou na análise geomorfológica da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, localizada na porção SE do estado de São Paulo entre os municípios de Tatuí, Itapetininga, Guareí e Quadra. Além da análise geomorfológica elaborada a partir da identificação de padrões das formas de relevo, a pesquisa também abordou os principais impactos ambientais que ocorrem na bacia hidrográfica integrando-os à análise de Fragilidade Ambiental. A metodologia utilizada no trabalho foi embasada a partir de referenciais teóricos da Geomorfologia e da Geografia, tratando da classificação taxonômica e dos níveis de abordagem do relevo. Optou-se pela utilização da Abordagem Sistêmica como fundamento conceitual para a problematização e interpretação dos dados observados. A metodologia adotada compreende o conjunto de técnicas e procedimentos aplicados durante a análise, servindo como base para a condução da pesquisa. Houve a revisão bibliográfica do tema, elaboração de mapas temáticos e trabalho de campo. Como resultado, constatou-se que na referida bacia hidrográfica têm-se 5 (cinco) unidades, cujas características diversas, em geral, estão relacionadas às diferentes rochas encontradas em seu território. Além disso, os próprios contatos litológicos impõem condicionantes à atuação da rede de drenagem da área, estabelecendo diferentes níveis de dissecação. Aspectos estruturais, como falhas e diques de diabásio, também influenciam no relevo regional e, conseqüentemente, na paisagem da bacia. Aliadas a essas características, foram observadas diferentes atividades relacionadas ao uso do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, enfocando elementos relacionados à área urbana, o impacto da impermeabilização e do escoamento superficial, que frequentemente resultam em eventos de inundação e movimentos de massa.

Palavras-chave: geomorfologia ambiental; bacia hidrográfica; análise geomorfológica; Rio Tatuí; paisagem; fragilidade ambiental.

Abstract

MACHADO JUNIOR, Claudio. Geomorphological and Environmental Analysis of the Tatuí River Watershed. Master's Dissertation. Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2025.

This work is an environmental geomorphology research that was based on the geomorphological analysis of the Tatuí River Watershed, located in the southeastern portion of the state of São Paulo between the municipalities of Tatuí, Itapetininga, Guareí, and Quadra. In addition to the geomorphological analysis elaborated from the identification of landform patterns, the research also addressed the main environmental impacts that occur in the watershed, integrating them into the analysis of Environmental Fragility. The methodology used in this work was based on theoretical references from Geomorphology and Geography, dealing with the taxonomic classification and levels of approach to relief. The Systemic Approach was chosen as the conceptual foundation for the problematization and interpretation of the observed data. The adopted methodology comprises the set of techniques and procedures applied during the analysis, serving as a basis for conducting the research. There was a bibliographic review of the theme, elaboration of thematic maps, and fieldwork. As a result, it was found that in the referred watershed there are 5 (five) units, whose diverse characteristics are, in general, related to the different rocks found in its territory. Furthermore, the lithological contacts themselves impose conditions on the action of the area's drainage network, establishing different levels of dissection. Structural aspects, such as faults and diabase dikes, also influence the regional relief and, consequently, the landscape of the basin. Allied to these characteristics, different activities related to land use were observed in the Tatuí River Watershed, focusing on elements related to the urban area, the impact of soil sealing and surface runoff, which frequently result in flood events and mass movements.

Keywords: environmental geomorphology; watershed; geomorphological analysis; Tatuí River; landscape; environmental fragility.

Lista de Tabelas

Tabela 1. Comparativo das principais teorias geomorfológicas evolutivas	21
Tabela 2. Descrição detalhada dos solos ocorrentes na Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, segundo o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo na escala de 1:100.000 (Rossi, 2017).....	65
Tabela 3. Graus de Fragilidade para a variável Uso e Ocupação do Solo	72
Tabela 4. Graus de fragilidade para a variável Pedologia	73
Tabela 5. Graus de fragilidade para a variável Declividade	73
Tabela 6. Graus de fragilidade para a variável Geologia	74
Tabela 7. Graus de Fragilidade Ambiental	75
Tabela 8. Graus de Fragilidade Ambiental espacializada	106

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Climograma de Tatuí (SP) - Período de 01/07/2002 a 02/04/2014.....	61
---	----

Lista de Figuras

Figura 1. Modelo teórico de contrastes no conceito de ciclos de erosão propostos por King (1956) à esquerda e Davis (1899) à direita, conforme James (1959) apud. VILLELA & NOGUEIRA (2011), p. 219. 1) vertente convexa; 2) escarpa; 3) acumulação de detritos; 4) pedimento; A) juventude; B) maturidade; C) senilidade .	22
Figura 2. Os sistemas antecedentes controladores do sistema geomorfológico na bacia hidrográfica	28
Figura 3. Bacia Hidrográfica e Sub-Bacia	30
Figura 4. Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí.....	48
Figura 5. Tipos de padrão da rede de drenagem quanto à estrutura geológica.....	49
Figura 6. Corte esquemático em perfil da geomorfologia do Estado de São Paulo. .	63
Figura 7. Fluxograma dos procedimentos metodológicos	68
Figura 8. Mapa Geológico da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí.....	79
Figura 9. Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí.....	81
Figura 10. Mapa de Relevo Sombreado da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí	83
Figura 11. Mapa de Declividade da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí	85
Figura 12. Mapa Pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí.....	87

Figura 13. Mapa de Índice de Concentração de Rugosidade do Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí	89
Figura 14. Mapa de Uso do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí	91
Figura 15. Mapa de Unidades de Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí	95
Figura 16. Forma de interflúvio alongado suavemente convexizado, pouco extenso e de vertentes retilíneas com bases côncavo-retilíneas. (23°18'57.62"S, 47°49'41.93"O)	96
Figura 17. Perfil topográfico de um setor da Unidade I.	96
Figura 18. Recorte do perfil da Formação Tatuí. (23°18'56.24"S, 47°48'41.01"O)....	97
Figura 19. Forma de interflúvio alongado de topo suavemente convexizado, muito extenso e de vertentes retilíneas com bases convexas.	98
Figura 20. Perfil Topográfico de um setor da Unidade II.	98
Figura 21. Escarpa adaptada a falha e formas de colina de topos suavemente convexizados. (23°23'58.66"S, 47°55'55.94"O).....	99
Figura 22. Perfil topográfico de um setor da Unidade III com forma de escarpa.....	99
Figura 23. Modelo Digital de Terreno (MDT) da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí com destaque para a escarpa em sentido WSW-ENE.....	100
Figura 24. Interflúvio extenso com topo plano. (23°22'55.56"S, 48° 47°59'29.30"O)	101
Figura 25. 2º Perfil topográfico de um setor da Unidade III.	101
Figura 26. Forma de interflúvios alongados, extensos e de topo acentuado. - Unidade de Relevo IV (23°24'38.10"S, 47°54'59.13"O).....	102
Figura 27. Perfil topográfico de um setor da unidade IV.	102
Figura 28. Forma de Interflúvio extenso com topos suavemente convexizados (23°25'40.63"S, 48° 4'5.93"O)	103
Figura 29. Perfil topográfico de um setor da Unidade V.	103
Figura 30. Recorte do perfil da Formação Teresina para verificação de litologia. (23°,24'57.5" S, 48°, 02'35.8" O)	104
Figura 31. Mapa de Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí	105
Figura 32. Área de alagamento no bairro Dr. Laurindo em Tatuí (SP) em janeiro de 2023.	107
Figura 33. Área de pastagens e lavouras temporárias na Unidade de Relevo II.....	108

SUMÁRIO

Resumo.....	3
1. Introdução.....	12
2. Objetivos da Pesquisa.....	16
2.1. Objetivo Geral.....	16
2.2. Objetivos Específicos.....	16
3. Fundamentação Teórica.....	17
3.1. Evolução do pensamento teórico em geomorfologia.....	17
3.2. Geomorfologia, Paisagem e Bacia Hidrográfica: Fundamentos para uma análise integrada.....	26
3.3. Influências lito-estruturais na compartimentação do relevo e na rede de drenagem.....	34
3.4. Impactos ambientais associados à evolução da paisagem.....	39
3.5. A fragilidade ambiental como subsídio ao planejamento e gestão de bacias hidrográficas.....	42
4. Caracterização da Área de Estudo.....	47
4.1. Contexto Litológico da Área de Estudo.....	50
4.1.1. A Bacia Sedimentar do Paraná.....	50
4.1.2. O Grupo Itararé.....	52
4.1.3. Formação Tatuí.....	54
4.1.4. Formação Irati.....	56
4.1.5. Formação Teresina.....	58
4.2. Aspectos Climáticos da Área de Estudo.....	60
4.3. Geomorfologia Regional.....	62
4.4. Pedologia da área de estudo.....	64
5. Materiais e Métodos.....	67
5.1. Procedimentos Metodológicos.....	67

6. Resultados e Discussões	75
6.1 Análise Geomorfológica da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí.....	76
6.2 Análise da Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí	104
7. Considerações Finais.....	112
Referências Bibliográficas	114

1. Introdução

Ao decorrer da história humana, as sociedades se organizaram e se instalaram em lugares que foram favoráveis à sua existência, sempre buscando condições físicas e naturais que beneficiavam a sua moradia e forma de vida, sendo assim, buscaram primeiramente a proximidade aos rios e riachos pela necessidade da utilização da água e também ao tipo de relevo que fosse vantajoso à sua estadia, no caso, as bacias hidrográficas.

Os rios sempre tiveram um papel central no estabelecimento, na sobrevivência e no desenvolvimento das civilizações, e como resposta disso, temos hoje cidades inteiras construídas ao longo de cursos fluviais adentrando sua bacia hidrográfica, que muitas vezes é prejudicada pelas ações antrópicas sem considerar as consequências ambientais e sociais que podem ser causadas. Essas ocupações e suas influências no ambiente “[...] têm sido frequente motivo de preocupação na sociedade, o que tem levado ao aumento de pesquisas para qualificar e quantificar impactos da ocupação territorial.” (Gonçalves et. al., p. 797, 2011).

Ao longo do tempo, os espaços urbanizados brasileiros buscaram modificar e “superar” os cursos fluviais, alterando seus meandros, sua dinâmica e seu regime de carga e descarga para adequá-los ao desenvolvimento urbano. Contudo, os efeitos negativos dessas mudanças desenfreadas podem causar a entropia de um sistema. Essa problemática se agrava no Brasil, pois, apesar da grande riqueza hídrica, o desenvolvimento dos estudos de gerenciamento e manejo desses sistemas é principiante (Petts & Foster, 1985, p. IX, in: Geomorfologia Fluvial, STEVAUX & LATRUBESSE, 2017).

Com o avanço das cidades e o aumento das demandas econômicas, a pressão demográfica sobre as áreas marginais intensificou a necessidade dessas alterações desmedidas, que atualmente geram a degradação dos sistemas naturais e crises sociais. As áreas de várzea, antes ocupadas pela agricultura, deram lugar à “evolução” urbanizada, e os rios, que antes serviam ao plantio e ao transporte, hoje são utilizados para o abastecimento. Como consequência direta, a impermeabilização do solo pelas construções modernas reduz a infiltração e sobrecarrega os cursos fluviais pelo escoamento superficial, tornando mais frequentes as enchentes e inundações que prejudicam justamente as populações alocadas nas áreas de várzea.

A ocupação do solo, associada à falta de planejamento e a políticas ambientais inadequadas, vem ao longo do tempo gerando diversos reflexos negativos aos geossistemas, com implicações sociais e econômicas. Nesse cenário, o estudo e as análises geomorfológicas nos possibilitam os referenciais científicos e viabilizam projetos de planejamento socioambientais adequados aos princípios da sustentabilidade (BOTELHO & SILVA, 2011).

A construção do conhecimento geomorfológico sobre a área contribuirá também para o levantamento de dados histórico-geográficos da região, que poderão ser usados para futuras pesquisas. Por isso, foi utilizado o recorte espacial da bacia hidrográfica, pois seu uso como unidade de análise se torna imprescindível para a compreensão do desenvolvimento geomorfológico e ambiental da região. É a partir dela que podemos avaliar de forma integrada e sistêmica as ações humanas sobre o ambiente e seus impactos, além de contribuir para o esclarecimento de inúmeras questões geomorfológicas (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Nesse contexto, os cursos fluviais instituem um dos processos morfogenéticos mais ativos na esculturação do relevo (CHRISTOFOLETTI, 1974), influenciando o comportamento mecânico dos solos e rochas (CUNHA & GUERRA, 2008) e tornando possível o diagnóstico de diversos elementos da bacia.

Ademais, podemos avaliar qualitativa e quantitativamente a sustentabilidade, a fragilidade e os riscos ambientais (AQUINO; PALETTA; ALMEIDA, 2017), informações que servem para o correto planejamento integrado às políticas de urbanização. As análises de suscetibilidade, portanto, podem ser consideradas importantes instrumentos para auxiliar gestores e planejadores a tomarem decisões que visem ao manejo sustentável dos ambientes da bacia (Rodrigues et al., 2020).

A análise geomorfológica que fundamenta esta dissertação de mestrado parte do pressuposto de que as características morfológicas do relevo são formas resultantes de processos erosivos e de acumulação ao longo do período Quaternário em associação com os controles estruturais. Com base nisso, a pesquisa buscou identificar os estágios e as particularidades da esculturação da superfície, compreendendo que a análise dos processos morfodinâmicos é crucial. Essa abordagem contribuiu decisivamente tanto para a interpretação da disposição espacial e do significado dos depósitos sedimentares quaternários, quanto para o estudo da evolução da paisagem em interação com a sua configuração morfoestrutural.

Aprofundando a análise, considera-se a bacia hidrográfica como a principal responsável pela dissecação do relevo (CHRISTOFOLETTI, 1980). Visto que ela envolve toda a zona que capta o escoamento, a rede de drenagem e a estrutura geológica estão intrinsecamente relacionadas. Conseqüentemente, os processos morfogenéticos advindos destes fatores modelam o terreno, resultando em uma grande diversidade de formas que se transformam ao longo do tempo e do espaço, influenciadas por combinações de componentes como a ação hidrológica, o clima, a cobertura vegetal, a litologia e as ações antrópicas (ROSS, 2010).

Dessa maneira, é impraticável considerar o relevo e a bacia de drenagem como dois fenômenos separados, pois são membros de um sistema aberto em interação contínua (CHRISTOFOLETTI, 1979). É preciso considerar, ainda, que essa dinâmica é perpassada por uma série de outros elementos físico-naturais e sociais que influenciam a qualidade ambiental da área de estudo (BOTELHO; SILVA, 2004).

Diante desse cenário, fica evidente a relevância de uma análise que integre os componentes geomorfológicos e geoambientais. A compreensão aprofundada da dinâmica do recorte espacial é a base indispensável para avaliar as transformações na paisagem e promover um manejo mais consciente e sustentável. A análise da bacia hidrográfica do Rio Tatuí foi pautada em uma abordagem sistêmica e estruturada na identificação das formas de relevo e dos processos pretéritos que formaram seu substrato; e, em seguida, na análise dos impactos ambientais decorrentes das alterações ocorridas na bacia.

A análise ambiental auxilia no planejamento, que, com base na bacia hidrográfica, destaca-se como uma ferramenta importante para viabilizar a elaboração de propostas que objetivam preservar os recursos naturais, além de classificar suas unidades espaciais e identificar problemas e seu estado de conservação.

A escolha da bacia hidrográfica do Rio Tatuí como recorte de estudo representa, portanto, uma continuação de uma pesquisa de iniciação científica (2018-2019), na qual uma análise preliminar já indicava que o território da bacia carecia de estudos geoambientais aprofundados. A presente pesquisa visa preencher essa lacuna, fornecendo uma análise detalhada que colabora para a elaboração de propostas de uso e ocupação compatíveis com as potencialidades e limitações da área, permitindo a avaliação de sua Fragilidade Ambiental.

Em suma, assim como utilizada nesta pesquisa, de acordo com Souza e Arruda (2017), a abordagem ambiental é uma temática relevante aos estudos acadêmicos

recentes, pois apresentam perspectivas conceituais novas e propõem diferentes metodologias científicas, influenciadas pelos avanços técnicos, relacionadas às análises integradas da paisagem, permitindo que ela seja interpretada de acordo com os diversos elementos que a constituem.

2. Objetivos da Pesquisa

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é a análise dos aspectos geomorfológicos da bacia hidrográfica do Rio Tatuí, as alterações urbanas que a modificaram e sua relação com a Fragilidade Ambiental da área.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos envolvem o mapeamento das unidades geomorfológicas, a análise espacial do uso e da ocupação da área, a elaboração do mapa de Fragilidade Ambiental e os levantamentos dos principais problemas ambientais da bacia hidrográfica.

3. Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica desta dissertação está organizada em um percurso que parte dos conceitos gerais para os mais aplicados. O capítulo inicia com uma revisão sobre a evolução do pensamento em geomorfologia, abordando seu desenvolvimento histórico e suas principais ideias. Na sequência, são definidos os conceitos de paisagem e bacia hidrográfica, apresentados como elementos centrais para uma análise integrada.

A partir dessa base, a revisão avança para a discussão sobre os processos físicos, com foco em como as rochas e as estruturas geológicas (lito-estruturais) influenciam a divisão do relevo e a organização da rede de drenagem. A revisão segue com a abordagem dos impactos ambientais, entendidos como resultado da interação entre a evolução da paisagem e as ações humanas. Por fim, o capítulo se encerra com a análise do conceito de Fragilidade Ambiental e sua aplicação como ferramenta para o planejamento territorial.

Sendo assim, a revisão bibliográfica desta pesquisa foi elaborada em decorrência da análise de um vasto conjunto de publicações científicas e técnicas. A base da pesquisa foi consolidada por meio de livros, capítulos e artigos de periódicos que abordam os conceitos centrais e estudos de caso pertinentes em geomorfologia. Esta base foi complementada por investigações aprofundadas provenientes de teses, dissertações e trabalhos publicados em anais de eventos, que trouxeram contribuições específicas e detalhadas à análise da bacia hidrográfica. O suporte prático e normativo foi garantido pela consulta a manuais técnicos, relatórios institucionais, mapas geológicos e geomorfológicos, além de documentos legais relevantes à área de estudo.

3.1. Evolução do pensamento teórico em geomorfologia

A Geomorfologia se estabelece como o ramo das geociências dedicado ao estudo das formas da superfície terrestre, investigando sua gênese, evolução e os processos que as modelam. O seu objeto fundamental de estudo é o relevo, compreendido não como um elemento estático da paisagem, mas como um produto dinâmico resultante da complexa e contínua interação entre forças endógenas, como

o tectonismo, e forças de origem exógenas, como o clima, a água e o vento. (Christofoletti, 1980).

"Na literatura especializada, principalmente nos dicionários técnicos e livros didáticos, a definição da Geomorfologia vem sempre acompanhada deste teor 'paisagístico' (no sentido de reconhecimento de um território), ou seja, a de que se trata de uma ciência que estuda as paisagens e suas evoluções no tempo e no espaço" (VILLELA, 2011, p. 30)

Historicamente, no final do século XIX a Geomorfologia encontrou sua primeira teoria unificadora nos trabalhos do geógrafo americano William Morris Davis, amplamente conhecido como o "pai" da geomorfologia. Sua proposta, conhecida como "Ciclo Geográfico" ou "Ciclo de Erosão", representou uma ruptura com a abordagem puramente descritiva que prevalecia até o momento, oferecendo um modelo explicativo e dedutivo para a evolução da paisagem.

Em sua obra "The Geographical Cycle" (1899), a teoria de Davis postulou que as formas do relevo são uma função de três variáveis interdependentes: estrutura, referindo-se à natureza e disposição das rochas; processo, que engloba os agentes de denudação, com especial ênfase na ação fluvial; e tempo, a duração sobre a qual os processos atuam na estrutura.

A paisagem é uma função da estrutura, do processo e do tempo. É evidente que todas as formas da superfície da Terra devem ser o resultado da ação de certos processos sobre uma determinada estrutura terrena, continuada por um certo período de tempo. (DAVIS, 1899, p. 481, tradução nossa).

Seu modelo dominou o pensamento geomorfológico por mais de meio século, pois sua força residia na capacidade de unificar observações díspares sob um único arcabouço teórico, fornecendo à Geomorfologia uma linguagem comum e um método sistemático, elevando-a de um campo de estudos descritivos a uma ciência explicativa.

Entretanto, o primeiro grande desafio à dominância da teoria davisiana surgiu da escola alemã de pensamento, notadamente com os trabalhos de Penck (1924). O autor rejeitou a premissa central de Davis de um soerguimento rápido e inicial seguido por um longo período de calma tectônica. Ao invés disso, propôs um modelo mobilista, no qual as formas de relevo são o produto de um antagonismo contínuo entre as taxas de soerguimento (forças endógenas) e as taxas de denudação (forças exógenas). Consequentemente, o perfil das vertentes (côncavo, retilíneo ou convexo) não indicaria uma "idade" do relevo, mas sim a natureza da atividade tectônica em curso (desacelerada, estável ou acelerada) (PENCK, 1953). Desta forma, essa abordagem representou uma mudança fundamental, deslocando o foco do tempo (a variável central de Davis) para a dinâmica das forças tectônicas.

Outra crítica contundente ao modelo davisiano veio de Lester C. King (1953) com a sua Teoria da Pediplanação. O processo central de sua teoria é o recuo paralelo das vertentes, onde as encostas recuam mantendo seu ângulo, deixando para trás uma superfície de erosão suavemente inclinada chamada pedimento, sendo que a junção de pedimentos forma um pediplano. King (1953) diferencia seu modelo do de Davis ao afirmar que a peneplanície é formada pelo rebaixamento das vertentes, enquanto o pediplano é formado pelo seu recuo paralelo. King deu prioridade a processos mais comuns em climas com sazonalidade marcada (semiáridos), além de atribuir um papel decisivo aos soerguimentos epirogenéticos na criação de múltiplos níveis de aplainamento.

Por conseguinte, no Brasil, embora o modelo davisiano tenha sido inicialmente adotado, especialmente sob a influência da missão de geógrafos franceses na década de 1930, as teorias de Penck, e sobretudo, de King, mostraram-se mais adequadas para interpretar a realidade geomorfológica do país. A visita e os trabalhos de Lester C. King ao Brasil na década de 1950, que resultaram na publicação de "A Geomorfologia do Brasil Oriental" (1956), foram um marco, pois seus conceitos de pediplanação e recuo paralelo de vertentes ofereceram um arcabouço teórico mais poderoso para explicar as vastas superfícies aplainadas (chapadas e tabuleiros) e os relevos residuais (inselbergs) tão característicos do território brasileiro.

Essa nova perspectiva foi rapidamente incorporada por geógrafos brasileiros como Aziz Ab'Sáber e João José Bigarella, que se tornaram fortes críticos do modelo davisiano e os principais difusores da teoria da pediplanação no país, lançando as bases para uma escola de pensamento geomorfológico brasileira.

A partir do século XX, a Geomorfologia passou por uma significativa reorientação teórico-metodológica. A abordagem clássica, fundamentada no Ciclo de Erosão de William Morris Davis (1899), foi progressivamente questionada por uma nova geração de pesquisadores. As críticas centravam-se em seu caráter predominantemente qualitativo, dedutivo e subjetivo, que privilegiava a reconstrução histórica em detrimento da análise de processos físicos mensuráveis. Em contrapartida, emergiu a demanda por maior objetividade e rigor científico, conforme consolidado na literatura por autores como Christofolletti (1980).

Essa busca por rigor científico deu origem à "Revolução Quantitativa". Um dos primeiros passos notáveis foi dado pelo hidrólogo e geomorfólogo Robert E. Horton, que propôs uma forma de analisar matematicamente a evolução e a composição das

bacias de drenagem (HORTON, 1945). Contudo, foi o geomorfólogo Arthur Strahler quem se tornou o grande líder desse movimento, defendendo que a paisagem não deveria ser apenas descrita com palavras, mas decifrada com números. (STRAHLER, 1952). A missão de Strahler era clara e foi expressa de forma contundente em um de seus principais trabalhos:

O objetivo do presente estudo é substituir por declarações quantitativas e rigorosas as descrições qualitativas que têm dominado a geomorfologia, a fim de que a disciplina possa ascender ao nível de uma ciência exata. Declarações descritivas e genéricas sobre o estágio de desenvolvimento de uma paisagem devem ser substituídas por parâmetros adimensionais que possam ser medidos e comparados objetivamente. (STRAHLER, 1952, p. 1118, tradução nossa).

Seguindo essa premissa, a paisagem passou a ser tratada como um conjunto de variáveis mensuráveis, com o desenvolvimento de índices como a ordem dos canais, a densidade da drenagem e a análise hipsométrica, representando uma ruptura fundamental com a tradição davisiana.

O marco dessa nova fase foi o artigo "Geomorphology and General Systems Theory", de Richard J. Chorley (1962), que criticou o ciclo de Davis por tratar a evolução do relevo como um sistema fechado, que caminha para um fim inevitável (a peneplanície) sem interagir com o mundo exterior. Em oposição, Chorley defendeu que a realidade geomorfológica se alinha muito melhor a outro modelo:

Os sistemas geomórficos são quase invariavelmente sistemas abertos, tendendo a um estado de equilíbrio (steady state) através da autorregulação. [...] A grande vantagem de tratar os problemas geomorfológicos em seu contexto de sistemas abertos é que os modelos resultantes parecem se aproximar muito mais da realidade física do que os modelos de sistema fechado. (CHORLEY, 1962, p. 138-139, tradução nossa).

Essa visão de um sistema aberto, em constante troca de matéria e energia com seu entorno, resgatou o conceito de equilíbrio dinâmico, que havia sido sugerido por G. K. Gilbert e foi revitalizado por John T. Hack (1960). Sob essa ótica, a forma de uma colina ou de um rio deixou de ser vista como um indicador de sua "idade" e passou a ser entendida como um reflexo funcional do balanço entre os processos atuantes e a resistência dos materiais. Se um fator muda, como o clima ou a atividade tectônica, o sistema se autoajusta para encontrar um novo estado de equilíbrio (HACK, 1960).

Essa visão funcional e sistêmica, que valorizava o processo em detrimento da história, rapidamente se tornou o novo paradigma, sendo amplamente disseminada em obras influentes como *Models in Geography*, editada por Chorley e Peter Haggett (1967).

Tabela 1. Comparativo das principais teorias geomorfológicas evolutivas

Característica	Ciclo Geográfico (Davis, 1899)	Desenvolvimento de Vertentes (Penck, 1924)	Pediaplanção (King, 1956)	Equilíbrio Dinâmico (Hack, 1960) (Chorley, 1962)
Proponente Principal	William Morris Davis	Walter Penck	Lester Charles King	John T. Hack / Richard J. Chorley
Conceito Central	Evolução cíclica e sequencial do relevo através de estágios (Juventude, Maturidade, Senilidade).	Antagonismo contínuo entre soerguimento e denudação, refletido na forma da vertente.	Recuo paralelo das vertentes e formação de superfícies de erosão (pediplanos).	Sistema aberto onde a forma é um ajuste funcional e em equilíbrio com os processos atuais.
Visão da Tectônica	Soerguimento rápido e inicial, seguido de longa estabilidade.	Atividade contínua e variável, cuja taxa influencia diretamente a morfologia.	Soerguimentos epirogenéticos episódicos que geram múltiplos níveis de aplainamento.	Parte do fluxo de energia que entra no sistema, ao qual as formas se ajustam.
Evolução da Vertente	Rebaixamento e arredondamento progressivo com o tempo (declive decrecente).	A forma (convexa, retilínea, côncava) depende da taxa de soerguimento.	Recuo paralelo, mantendo o ângulo de inclinação constante.	A forma da vertente está em equilíbrio com os processos e materiais atuais; não "evolui" em estágios.
Produto Final	Peneplanície (relevo suave e rebaixado próximo ao nível de base).	Relevo primário ou Relevo final, dependendo da dinâmica tectônica.	Pediaplano (vasta superfície de erosão com relevos residuais, <i>inselbergs</i>).	Não há um "produto final"; a paisagem é um estado estacionário dinâmico, não

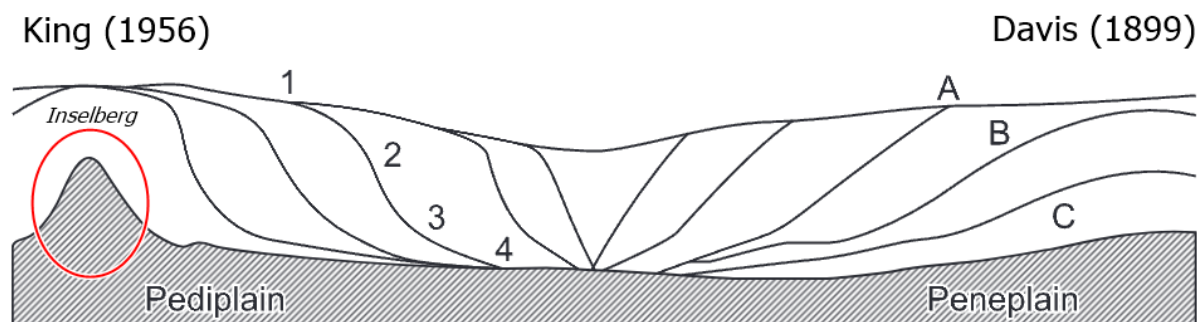
				um estágio terminal.
Visão do Tempo	Histórica e linear (variável chave).	Relacionado à dinâmica tectônica.	Cíclico, mas com ciclos interrompidos por tectônica.	Atemporal (o foco é no presente).

Fonte: Elaborado com base em Abreu (1983), Casseti (2006), Christofolletti (1980), Davis (1899), Hack (1960), King (1956) e Penck (1924).

Dessa forma, em síntese, o estudo do relevo começou a tomar forma com a teoria do Ciclo Geográfico de William M. Davis (1899), que foi a primeira grande ideia a unificar o campo ao explicar a paisagem como um resultado da estrutura, do processo e do tempo. Embora essa teoria tenha sido dominante por muito tempo, como aqui anteriormente citado, ela foi desafiada por outros modelos como o de Penck (1924), que focou na contínua disputa entre o soerguimento das rochas e seu desgaste, e o de King (1956).

Segundo o modelo de King (1956), após as vertentes serem desenvolvidas ao longo de vales ou escarpas, os processos erosivos fariam com que estas recuassem paralelamente em direção à montante, mantendo uma inclinação relativamente constante. Na base dessas escarpas, o acúmulo de detritos erodidos daria origem a uma rampa suave de baixa inclinação, o pedimento. Com o passar do tempo, a união lateral de múltiplos pedimentos resultaria numa extensa superfície aplainada, identificada como pediplano, sobre a qual os relevos residuais (*inselbergs*) permaneceriam em destaque, seja pela maior resistência de suas rochas, seja por se localizarem em divisores de água menos erodidos.

Figura 1. Modelo teórico de contrastes no conceito de ciclos de erosão propostos por King (1956) à esquerda e Davis (1899) à direita, conforme James (1959) apud. VILLELA & NOGUEIRA (2011), p. 219. 1) vertente convexa; 2) escarpa; 3) acumulação de detritos; 4) pedimento; A) juventude; B) maturidade; C) senilidade



Fonte: Adaptado de JAMES (1959) apud. VILLELA & NOGUEIRA (2011, p. 219). Organizado pelo autor.

Penck, em sua obra traduzida para o inglês em 1953, relacionou as formas de relevo a uma síntese da interação contínua entre os processos endogenéticos e os processos exogenéticos. Para ele, a paisagem seria o resultado de uma variação de forças que atuam ao mesmo tempo, gerando as formas de denudação e seus depósitos correlativos. O autor também postulou um princípio para a evolução das vertentes: o do aplainamento progressivo, afirmando que

“nenhuma parte de qualquer superfície na Terra, não importa quanto a denudação trabalhe sobre ela, pode em algum momento tornar-se um conjunto unicamente íngreme; pode apenas tornar-se mais aplainado, pois a lei mais importante seguida durante o desenvolvimento das formas denudacionais é este princípio do aplainamento”. (PENCK, 1953, apud. VILLELA & NOGUEIRA, 2011, p. 219).

Em um segundo momento, a maior mudança ocorreu na metade do século XX com a revolução quantitativa, quando Strahler (1952) passa a defender o uso de métodos quantitativos no lugar de apenas descrições qualitativas da paisagem. Em seguida, a Teoria dos Sistemas, com autores como Chorley (1962) e Hack (1960), consolidou a visão da paisagem como um sistema aberto em equilíbrio dinâmico, onde a forma do relevo reflete os processos que acontecem no presente, e não em um estágio de “idade”.

Ademais, posterior à revolução quantitativa, sobre o conceito de geomorfologia, Christofolletti (1974, p. 1) cita que

“A Geomorfologia é a ciência que estuda as formas de relevo. As formas representam a expressão espacial de uma superfície, compondo as diferentes configurações da paisagem morfológica. É o seu aspecto visível, a sua configuração, que caracteriza o modelado topográfico de uma área.”

Complementando, Casseti (2005) ressalta que a Geomorfologia precisa ser analisada sob o viés de um conhecimento específico que investiga as formas de relevo buscando entender a relação entre o pretérito e o presente, levando em consideração seus processos de modificação temporal. O autor também enfatiza a necessidade das pesquisas sobre o relevo para analisar a ocupação do espaço condicionada pelas morfologias da paisagem. Traçando uma análise sob o viés histórico da geomorfologia, o autor também cita que a geomorfologia surgiu e se fortificou através da “[...] vinculação dos campos de interesse da geografia e da geologia.” (CASSETI, 2005, p. 1), sendo que

A Geomorfologia tem como objeto de estudo o relevo, ou seja, as formas da superfície terrestre e os processos que as criam e as modificam. O relevo é

um importante elemento da paisagem, refletindo as interações entre os agentes internos e externos que atuam na superfície da Terra" (CASSETI, 2008, p. 3).

Neste mesmo princípio, Guerra (2018) define a Geomorfologia enquanto o estudo das formas de relevo, considerando também os processos pretéritos formadores e os materiais envolvidos neste processo, como as rochas e o solo. Portanto, em suas publicações enfatiza que "Geomorfologia é a ciência que estuda as formas do relevo terrestre, suas gêneses e evolução, assim como os processos que as criam e que as transformam" (GUERRA, 1978, p. 7).

Diante do exposto, as várias contribuições dos autores aqui citados contribuem para o desenvolvimento do pensamento geográfico, assim, a pluralidade complementar de conceitos se faz presente em diversas publicações atuais que abordam temas de suma importância para a sociedade.

Nesse mesmo sentido, Ab'Sáber (1969, s/p) difundiu a ideia da Geomorfologia tripartite, na qual elaborou a divisão dos níveis de abordagens geomorfológicas nos estudos. Na publicação em questão, o autor cita primeiramente que "[...] a Geomorfologia é um campo científico que cuida do entendimento da compartimentação da topografia regional, assim como a caracterização e descrição, tão exatas quanto possíveis, das formas de relevo de cada um dos compartimentos estudados." (s/p). Posteriormente, descreve o segundo nível incluindo a busca pelas "[...] informações sistemáticas sobre a estrutura superficial das paisagens referentes a todos os compartimentos e formas de relevo observados." (s/p). E no terceiro nível, faz uma das mais importantes observações para a geomorfologia moderna: a geomorfologia precisa observar e analisar também a fisiologia da paisagem, com seus processos morfoclimáticos e pedogênicos atuais, incluindo as ações antrópicas predatórias, ou seja, precisa analisar todos os elementos que compõem a paisagem atualmente, pois as formas de relevo, solo e subsolo, dependem efetivamente da atuação conjunta dos fatores que os compõem.

Em resumo, o artigo de Aziz Ab'Sáber apresenta um conceito de geomorfologia que enfatiza a importância do estudo das formas de relevo como evidências da história geológica e climática do Quaternário. O autor destaca a necessidade de se considerar a interação entre fatores geológicos, climáticos e biológicos na compreensão da dinâmica do relevo, e propõe uma abordagem multidisciplinar para o estudo da geomorfologia. O artigo citado contribuiu para o avanço da compreensão dos processos que moldam o relevo terrestre e suas implicações ambientais.

É importante também frisar que historicamente a geomorfologia adotou a abordagem sistêmica proposta originalmente por Von Bertalanffy (1950) em sua *Teoria Geral de Sistemas (TGS)* e adaptada por outros geomorfólogos, muito difundida no Brasil por Antonio Christofolletti (1974). Desde então, o conceito de sistema foi aplicado em inúmeros fenômenos que interagem na paisagem, classificando também os sistemas como fechados ou abertos a depender da influência de seus elementos e do recebimento de energia externa de acordo com a teoria.

Richard J. Chorley (1962) em sua publicação *Geomorphology and General Systems Theory*, explica que muitas tentativas de introdução da teoria geral de sistemas na geomorfologia foram realizadas por autores como Strahler (1950), Culling (1957) e Hack (1960), que realizaram feitos muito notáveis, mas que surgem em um momento em que a abordagem convencional da geomorfologia na época estava em perigo, o que explicou dizendo que os geomorfólogos olhavam e analisavam mais os detalhes que a amplitude geomorfológica, ou seja, todos os integrantes do sistema.

Chorley (1962), enquanto discípulo de Bertalanffy, argumenta que o estudo da geomorfologia deve ser feito dentro de um quadro sistemático apropriado que permite correlações e associações. Ele afirma que é essencial ter uma base fundamental para a investigação e que mesmo as abordagens mais qualitativas para a área têm operações de pensamento dentro de um quadro lógico geral, embora em um sentido inconsciente. Por fim, o autor destaca a importância de escolher o tipo adequado de sistema para estudo. Ele discute os sistemas fechados e abertos e conclui que a maioria dos sistemas geográficos são do tipo aberto, assim como a bacia hidrográfica, unidade de análise que será estudada durante este trabalho. Segundo ele, "problemas de limites e problemas de associação entre unidades areais e suas inter-relações estão muito próximos do cerne das investigações geográficas". (CHORLEY, 1962, p. 8)

Dentro desta abordagem ampla, é necessário entender também a discussão acerca da geomorfologia fluvial, outro ramo desta ciência que, de acordo com Stevaux e Latrubesse (2017), se relaciona com áreas da química, física, história, sociologia, biologia, ecologia e outras para compreender os processos geomorfológicos dos rios tanto nas extensões longitudinais, verticais e temporais, e que será de suma importância para a realização deste projeto.

Destarte, vale ressaltar que nesta dissertação de mestrado o conceito de geomorfologia utilizado será o de Ab'Sáber (1969) na qual a define como tripartite,

como discutido anteriormente, mas sem deixar de lado todas as contribuições às quais também foram mencionadas, incluindo a multipluralidade de conceitos discutidos historicamente na geomorfologia. Essencialmente, também será utilizado o conceito de geomorfologia fluvial proposto por Stevaux & Latrubesse (2017), no qual contempla a orientação e o embasamento teórico dos estudos que serão realizados.

3.2. Geomorfologia, Paisagem e Bacia Hidrográfica: Fundamentos para uma análise integrada.

O papel da Geomorfologia na análise da paisagem e das bacias hidrográficas é fundamental para a caracterização, identificação e compreensão da dinâmica do espaço geográfico. É a partir dela que podemos entender os processos e as dinâmicas ambientais responsáveis pela transformação do relevo. Sendo assim, Christofolletti (1974, p. 1) define a geomorfologia como “[...] a ciência que estuda as formas de relevo”, as quais “[...] representam a expressão espacial de uma superfície, compondo as diferentes configurações da paisagem morfológica”. A análise dessas formas e de seus processos oferece, portanto, o conhecimento sobre a dinâmica dos agentes transformadores da topografia atual, revelando um cenário de múltiplas interações que exige uma abordagem metodológica adequada para sua compreensão.

Para dar conta da complexidade dessas interações, a abordagem sistêmica, proposta por Von Bertalanffy (1950) e consolidada na geomorfologia por autores como Strahler (1950; 1952), é uma ferramenta essencial. Christofolletti (1974) reforça a importância de analisar os elementos do relevo e suas inter-relações, demonstrando o vasto número de variáveis integradas aos sistemas geomórficos. Essa visão é compartilhada por outros pesquisadores, como Tricart (1977), Sotchava (1978) e Stevaux & Latrubesse (2017), que utilizam a abordagem sistêmica para a elucidação de problemáticas ambientais.

A análise geomorfológica, sob essa ótica, fundamenta-se na compreensão de que as formas da paisagem são um produto da interação entre forças de origens distintas. Conforme a abordagem clássica de Penck (1953), o modelado resulta da atuação conjunta de forças geradas no interior da crosta, definidas como processos endógenos, e daquelas impulsionadas pela ação climática, que constituem os processos exógenos. Aprofundando essa concepção, Gerasimov (1959 apud MESCERJAKOV, 1968) estabeleceu uma distinção hierárquica, na qual os fatores

endógenos geram as feições de maior escala (a morfoestrutura), enquanto os fatores exógenos atuam sobre essa base, esculpindo as formas de menor grandeza (a morfoescultura). Esse arcabouço teórico explica a esculturação da paisagem em escala geológica, mas a dinâmica atual exige a inclusão de um novo agente: o ser humano.

Além de considerar esses processos naturais que operam em escala geológica, é imprescindível integrar à análise as transformações mais recentes, especialmente as ocorridas no período Quaternário, que foram intensificadas pelas atividades antrópicas. Essa integração sistêmica entre elementos naturais e humanos é crucial para entender a configuração atual do relevo. O sistema fluvial, por exemplo, possui uma hierarquia e sensibilidade tão complexas que qualquer ação humana, direta ou indireta, pode se propagar espacial e temporalmente por longos períodos, gerando impactos de natureza e intensidade variadas que, muitas vezes, só podem ser plenamente compreendidos pela Geomorfologia Fluvial (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017).

Sendo assim, no contexto geomorfológico, Ab'Sáber (1969) trata a Geomorfologia em três níveis de abordagem: em primeiro nível, a Geomorfologia é o campo científico das observações e das análises topográficas que caracterizam e descrevem as formas de relevo. Em segundo nível, a geomorfologia busca informações sistemáticas acerca da estrutura superficial das paisagens observadas no primeiro nível, ou seja, reúne informações cronogeomorfológicas sobre a sequência de processos paleo-climáticos e morfoclimáticos quaternários do recorte espacial de análise. Ao final, no terceiro nível, o geógrafo trata do que ele chama de "Geomorfologia moderna", a que analisa a fisiologia da paisagem através do entendimento dos processos morfoclimáticos e pedogênicos atuais, incluindo as atividades antrópicas que também modificam a fisiologia da paisagem através de seus processos atuantes.

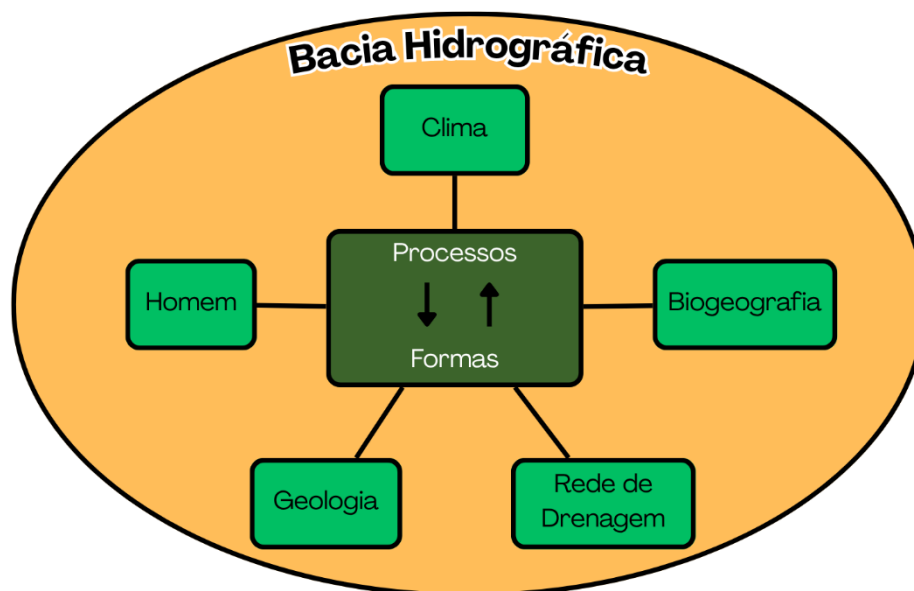
Posto isto, a aplicação de uma abordagem integrada, que contemple os diferentes níveis de análise propostos por Ab'Sáber (1969) e a dinâmica sistêmica da paisagem, exige a definição de uma unidade espacial de análise integrada. Esta unidade deve ser capaz de refletir a complexa interação entre os processos morfogenéticos, as estruturas geológicas e as ações antrópicas. Nesse sentido, a bacia hidrográfica se apresenta como o recorte ideal para a operacionalização de tais estudos. Compreendida não apenas como uma área de captação de água, mas como

um geossistema que integra os componentes físicos, biológicos e sociais, ela permite a análise articulada dos fenômenos, desde a esculturação do relevo até os impactos ambientais decorrentes do uso e ocupação do solo. Sua delimitação, baseada em critérios naturais dos divisores de água, oferece uma base objetiva para o planejamento, sendo reconhecida tanto científica quanto legalmente como a unidade fundamental para os estudos ambientais, como será analisada posteriormente.

Segundo a Lei Federal de nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, a bacia hidrográfica é a unidade territorial utilizada para fins de planejamento e gestão dos recursos hídricos nacionais. Por fazer parte muitas vezes de territórios conflitantes e áreas de interesse dispares, muitos elementos devem ser levados em consideração quando se trata de sua análise.

Como esta pesquisa se trata de uma pesquisa geográfica, o recorte espacial de análise escolhido foi a bacia hidrográfica, justamente por integrar elementos do meio físico e antrópico e suas relações, que podem ser refletidas na própria bacia.

Figura 2. Os sistemas antecedentes controladores do sistema geomorfológico na bacia hidrográfica



Fonte: Modificado de Christofolletti (1980). Organizado pelo autor.

Então, sabendo que a bacia hidrográfica é a principal responsável pela dissecação do relevo de uma determinada área (por envolver toda área que capta o escoamento pluvial e fluvial), o estudo e a análise desta se torna fundamental para a compreensão do desenvolvimento geomorfológico da região. É fundamental para os

estudos ambientais, que partindo de sua análise, concederá uma base de resultados para a elaboração de um plano de manejo/gestão dos recursos naturais de maior qualidade.

Ao adotar a bacia hidrográfica como unidade de análise, é possível avaliar de maneira integrada as ações humanas sobre o ambiente e seus impactos no equilíbrio hidrológico. Essa abordagem contribui significativamente para os estudos ambientais ao integrar os elementos da paisagem e suas inter-relações de forma sistêmica. (BOTELHO & SILVA, 2004).

Dessa forma, Barrella et al. (2001) definem a bacia hidrográfica como

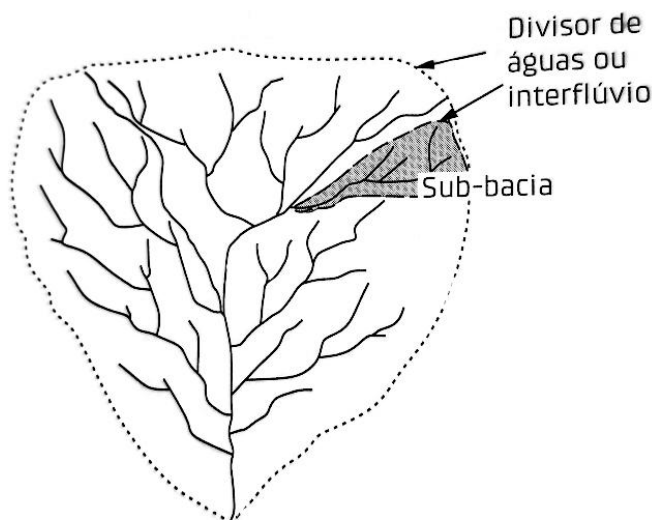
um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formada nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas das chuvas, ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático.

Já Zanella et al. (2013) caracterizam a bacia hidrográfica como unidade de investigação de comportamento sistêmico. Nesta unidade existem variáveis naturais e humanas, endógenas e exógenas, atreladas a ela, e que estão sempre em interação dinâmica. o que justifica a importância da bacia hidrográfica como unidade de pesquisa, planejamento e gestão territorial pela possibilidade de visualização e entendimento concreto das inter-relações entre os seus componentes.

De acordo com Souza e Fernandes (2000), uma bacia hidrográfica é uma área geográfica natural delimitada por divisores de água, sendo que toda a água da chuva que cai nessa área é coletada por um curso d'água principal e seus afluentes. Essas bacias se conectam com outras maiores, formando assim as sub-bacias. Os termos “bacia de captação”, que se refere à coleta de águas pluviais, e “bacia de drenagem”, que é a área por onde os cursos d'água escoam, também estão relacionados ao tema.

Segundo Guerra (1993), uma bacia hidrográfica é composta por terras que são drenadas por um rio e seus afluentes. Este conjunto inclui não apenas as cabeceiras ou nascentes, mas também os divisores d'água, os cursos d'água principais, os afluentes e os subafluentes.

Figura 3. Bacia Hidrográfica e Sub-Bacia



Fonte: Stevaux & Latrubesse, p. 60, 2017.

Em síntese, a bacia hidrográfica é compreendida como uma unidade espacial fundamental para a análise geomorfológica, pois funciona como o sistema que coleta, armazena e transporta a precipitação e os sedimentos. Por essa razão, as intervenções humanas em qualquer ponto da bacia tendem a impactar o sistema como um todo, o que a torna um recorte essencial para estudos ambientais com abordagem integrada, considerando as dinâmicas físicas, sociais e econômicas (IBGE, 2009).

Dessa forma, ao analisar as diferentes conceituações da bacia hidrográfica, é possível observar que ela é compreendida como uma importante unidade territorial e de estudo. É complexa, dinâmica e essencial para estudos ambientais, geográficos, geomorfológicos e de recursos hídricos.

Sabendo disso, portanto, a análise das bacias hidrográficas nos levará ao entendimento e ao esclarecimento de inúmeras questões geomorfológicas, pois os cursos d'água instituem um dos processos morfogenéticos mais ativos e dinâmicos na esculturação da superfície terrestre ao longo dos anos (CHRISTOFOLETTI, 1974), influenciando também no comportamento mecânico dos mantos de solo e rochas. Portanto, se configura como imprescindível nas caracterizações e reconhecimento das feições morfológicas (CUNHA; GUERRA, 2008).

Stevaux e Latrubesse (2017) destacam que a bacia hidrográfica passa por transformações contínuas, as quais estão diretamente associadas à redução progressiva do relevo em decorrência da denudação continental. Dessa forma, a bacia hidrográfica e suas características específicas — como padrão e densidade da drenagem, dimensão e configuração dos canais, além do estoque e transporte de sedimentos — são elementos fundamentais para a compreensão dos processos geomorfológicos e hidrológicos que moldam o ambiente. Ressaltam ainda que esses elementos são

“... resultado de uma série de fatores de controle que podem ou não variar com o tempo, e o produto final não necessariamente depende da redução do relevo, mas sim de intervenções extrínsecas, como tectonismo e mudança climática”. (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017, p. 231).

Salientam também que nos últimos milênios a intervenção antrópica deve ser estritamente considerada na avaliação de causas das mudanças de um sistema fluvial. Sendo assim, é essencial incluirmos este fator em nossas análises ambientais e geomorfológicas, visto que todos eles estão relacionados e se afetam (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017).

O sistema fluvial, como qualquer sistema geomórfico, possui um vasto número de variáveis, cujos fenômenos integrantes (hierarquia, sensibilidade, inter-relações) são extremamente complexos, de forma que a ação antrópica, em um determinado grau, pode se disseminar tanto espacialmente, por extensas distâncias, quanto temporalmente, por um grande período de tempo após a intervenção destes (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017, p. 257).

Nesse contexto, a compreensão da dinâmica fluvial exige uma abordagem interdisciplinar que considere não apenas os processos naturais, mas também as interações entre esses processos e as atividades humanas. A bacia hidrográfica enquanto unidade de análise permite integrar os aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos, oferecendo uma visão holística essencial para o planejamento e gestão sustentável dos recursos hídricos.

Diante disso, a aplicação de técnicas e metodologias que priorizem a conservação do sistema fluvial torna-se imprescindível, garantindo que a exploração dos recursos hídricos ocorra de maneira equilibrada, sem comprometer a resiliência e a funcionalidade do ambiente. Essa perspectiva é fundamental para promover a coexistência harmoniosa entre sociedade e natureza, minimizando os impactos antrópicos e preservando a integridade dos geossistemas fluviais.

Mediante a instauração e desenvolvimento de um manejo conservativo dos recursos naturais, poderá ser possível utilizar os recursos biológicos e físicos do rio de forma sustentável. Poderá levar a uma tentativa de harmonização e balanceamento das diferentes operações que o homem impõe ao meio ambiente a seu próprio benefício (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017, p. 274), alterando tanto o rio quanto os outros elementos constituintes da bacia.

Conseqüentemente, a partir da bacia hidrográfica podemos distinguir o estado dos integrantes de seu sistema hidrológico (solo, água, ar, vegetação, etc.) e seus respectivos processos (infiltração, escoamento, erosão, assoreamento, inundação, contaminação, etc.) para avaliarmos o equilíbrio do sistema e também a sua qualidade ambiental. Nesse sentido, para Botelho & Silva (2004), a bacia hidrográfica pode ser entendida então, como um reflexo das ações antrópicas sobre o espaço e seus constituintes em um certo momento.

Para complementar, Botelho & Silva (2004) destacam que os níveis de qualidade ambiental são dinâmicos e variáveis tanto temporal quanto espacialmente, estando intrinsecamente relacionados às formas de apropriação e utilização dos recursos naturais pela sociedade. Eles ressaltam que essas variações são influenciadas por diferenças econômicas e culturais, que determinam as práticas e os impactos decorrentes da interação humana com o meio ambiente.

Diante disso, a qualidade ambiental é compreendida como um reflexo das relações socioeconômicas e culturais estabelecidas em cada contexto, evidenciando a complexidade e a interdependência entre os sistemas naturais e sociais.

Logo, a qualidade ambiental deve ser considerada não somente como o resultado da soma das qualidades de cada constituinte do ambiente, mas como condição estritamente vinculada à qualidade de vida das populações, incluindo aquelas que se alocam em áreas de risco nas bacias hidrográficas, consideradas como áreas de suscetibilidade a inundações, enchentes e deslizamentos, ou seja, margens de rios, mananciais e encostas.

De acordo com Tavares et al. (2022, p. 646),

Colocando os recursos hídricos como foco de análise, salienta-se que, na medida em que os processos de degradação ambiental e uso desmedido se intensificam, desdobram-se conseqüências que vão desde a migração desse recurso para geossistemas mais bem conservados, pelo ciclo natural da água, até a disponibilidade e o comprometimento da qualidade desse recurso nos corpos hídricos; sinalizando que a gestão integrada de bacias hidrográficas assume uma importância cada vez mais notória. Nesse cenário, a teoria geossistêmica apresenta relevância de grande envergadura.

Em vista disso, a análise sistêmica dos componentes da bacia será pautada na Teoria Geral dos Sistemas, difundida no âmbito da geografia por Sotchava (1978). Sendo a bacia hidrográfica um sistema aberto, será possível analisar nela todos os elementos que a compõem e a modificam, isolada e conjuntamente para avaliar o nível de influência no ambiente.

Conforme destacado por Stevaux e Latrubesse (2017), as transformações nas bacias são impulsionadas por processos como a erosão, mudanças climáticas e intervenções humanas. Essas mudanças exigem uma abordagem integrada, que considere padrões de drenagem, transporte de sedimentos e os impactos ambientais decorrentes.

A análise da bacia hidrográfica enquanto unidade de estudo sistêmico permite então compreender os processos geomorfológicos e hidrológicos que moldam o relevo. Além disso, fornece subsídios para a gestão sustentável dos recursos naturais, contribuindo para o planejamento de ações que minimizem impactos negativos. (ZANELLA et al., 2013),

A qualidade ambiental, como ressaltam Botelho e Silva (2004), é reflexo das interações socioeconômicas e culturais. Ela desempenha um papel central na manutenção do equilíbrio ecológico e na qualidade de vida das populações que dependem desses recursos, por isso, também será utilizada como conceito fundamental nesta pesquisa.

Fica evidente, portanto, que a bacia hidrográfica não é apenas um recorte físico, mas um geossistema dinâmico onde a morfologia do relevo, a rede de drenagem e a qualidade ambiental estão intrinsecamente conectadas. A análise integrada, fundamentada na abordagem sistêmica, permite articular a base lito-estrutural e os processos morfogenéticos de longa duração com as transformações aceleradas impostas pelas atividades antrópicas. Ao adotar essa perspectiva, este trabalho busca não apenas diagnosticar as feições e os problemas da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, mas também compreender a complexa relação entre a fragilidade ambiental e os impactos socioambientais, fornecendo subsídios essenciais para um planejamento territorial mais consciente e sustentável.

3.3. Influências lito-estruturais na compartimentação do relevo e na rede de drenagem

Sabendo que a estrutura é a base onde se assentam os canais da rede de drenagem, que passam então a esculpir o relevo através de seus processos denudacionais, é também de suma importância conhecer a compartimentação da área de estudo para entender o funcionamento destes processos erosivos, ajudando a definir áreas fonte e depósitos correlativos.

Dessa maneira, o estudo do relevo é muito importante para as demais ciências e também para o estabelecimento de planos de manejo e gestão ambiental que favoreçam a proteção do referido recorte, pois nos permitirá definir a fragilidade do ambiente frente ao uso do solo e aos demais fatores naturais e humanos que o modificam.

Para definir as influências lito-estruturais na compartimentação do relevo, é preciso entender também a sua origem.

As forças endógenas (subdivididas em passivas e ativas) determinam a formação das feições de relevo através de seu condicionamento estrutural; a força ativa caracteriza-se pela força manifestada através da energia do interior da Terra e se evidencia pela dinâmica da litosfera por meio da tectônica de placas; logo, a força passiva é denominada pela força que apresenta resistência aos processos erosivos, e é definida pelos tipos de rochas e pelos diversificados modos como elas estão dispostas estruturalmente na superfície (ROSS, 2008).

Os processos exógenos agem na esculpturação das formas de relevo pela energia do calor solar presente na superfície da crosta continental terrestre pela atuação da atmosfera. São caracterizados pelo desgaste das rochas pela ação mecânica do ar, da temperatura e especialmente pelas ações físico-químicas da água em seus diversos estados (ROSS, 2010). Essas forças se interagem, resultando na formação e esculpturação das formas de relevo na paisagem (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Sobretudo, é preciso incluir juntamente aos processos exógenos as ações antrópicas, causadoras nos últimos milênios de grandes impactos ambientais por vezes irreversíveis, podendo ser consideradas na avaliação de causas das mudanças tanto em um sistema fluvial (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017) como geomorfológico, visto que a bacia de drenagem nunca é desatrelada ao relevo em que se procede.

Portanto, é impraticável considerar o relevo e a bacia de drenagem como dois fenômenos separados, pois são membros de um sistema aberto (a própria bacia de drenagem), e estão em interação contínua (CHRISTOFOLETTI, 1980). As litoestruturas que embasam a área de estudo e a bacia de drenagem as influenciam direta e indiretamente a partir de seus materiais e processos.

"A litoestrutura, portanto, relaciona-se aos tipos de relevo e de solos, fornecendo os alicerces para o primeiro e os minerais primários para o segundo" (VILLELA, 2011, p. 30).

Os processos erosivos causados pela atuação físico-química da água (processo exógenos) interagem direta e indiretamente com os tipos de rochas, definidos como representações das forças endógenas passivas justamente por sua resistência aos desgastes erosivos. Sua composição e sua estrutura definem a sua vulnerabilidade a estes processos erosivos gerados pela ação mecânica do ar, da temperatura e da água, fluvialmente disposta nos canais da bacia de drenagem em sua forma líquida, mas também em suas formas gasosa e sólida na atmosfera.

Stevaux & Latrubesse (2017) mencionam que quaisquer variações na estrutura geológica ou nos materiais da superfície (rocha e solo), afetam o padrão da rede de drenagem, visto que estes se relacionam diretamente, pois fazem parte de um sistema aberto.

Dessa forma, enquanto unidade hidrogeomorfológica, a bacia hidrográfica é um exemplo de sistema aberto, visto que recebe e troca energia com o exterior. Ou seja, um membro do sistema é capaz de influenciar todo o resto transferindo massa e/ou energia e criando as ligações entre estes elementos, que serão atingidos concomitantemente. (GILBERT, 1877; STEVAUX & LATRUBESSE, 2017).

Segundo Cunha e Guerra "[...] a bacia de drenagem tem papel fundamental na evolução do relevo uma vez que os cursos de água constituem importantes modeladores da paisagem [...]" (2008, p 354). Além disso, as bacias hidrográficas brasileiras dispõem de especificidades em função das características ambientais predominantes: o tipo de geologia, a distribuição das precipitações no espaço e no tempo, o solo dos terrenos e a forma de uso do solo/ocupação que atua de forma insaciável no sistema capitalista, fornecendo grandes quantidades de sedimentos ao leito dos rios (CUNHA, 2006) e modelando a paisagem.

Sendo assim, Christofolletti (1980) salienta que a forma dos canais é produto da ação exercida pelo fluxo d'água sobre os materiais rochosos que constituem o leito,

juntamente à suas dimensões que são manejadas pelo equilíbrio entre os processos erosivos degradacionais e depositam materiais na margem e em seu leito. Stevaux & Latrubesse (2017) lembram que estes processos também podem sofrer alterações devido às mudanças climáticas e tectônicas que influenciam a região da rede de drenagem ao longo do tempo geológico.

Portanto, a formação de uma rede de drenagem se dá através da necessidade de uma maior eficiência do escoamento de água (menor comprimento de pendente para maior velocidade de fluxo) em razão de uma menor energia despendida possível.

Sobretudo, a máxima eficiência de escoamento de água nunca é atingida na natureza pelo fato das condições locais da superfície como fragmentos de rochas, troncos e mudanças incisivas na erodibilidade (susceptibilidade do material à erosão) do solo provocarem a diminuição dos processos de incisão do canal e concentração de fluxo d'água, sendo os fatores antrópicos também contribuintes à redução da intensidade ou à não-instalação de uma rede de drenagem. (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017, p. 77-81).

Sendo assim, a vegetação desempenha um papel crucial no controle do escoamento superficial e na promoção da infiltração da água. Raízes de plantas aumentam a porosidade do solo, facilitando a infiltração e reduzindo o escoamento superficial. Folhagem e copa de árvores interceptam a chuva, diminuindo a energia das gotas de água e, conseqüentemente, a erosão do solo. A remoção da vegetação, muitas vezes resultante de atividades humanas como desmatamento e urbanização, pode levar a um aumento significativo no escoamento superficial e na erosão, comprometendo a sustentabilidade das bacias de drenagem.

De acordo com Stevaux & Latrubesse (2017), a capacidade de absorção e retimento temporário de água das rochas e do manto de solo intervém também nas características hidrológicas de uma bacia de drenagem, considerando que o escoamento direto é somente um integrante do escoamento total. A estrutura geológica que a embasa é outro dos fatores que influenciam o escoamento, sendo assim, dizem os autores “[...] a ocorrência de camadas inclinadas, fraturas e falhas pode aumentar ou reduzir a infiltração da água da chuva e, assim, influenciar o comportamento do escoamento total.” (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017, p. 89)

Visto que a rede de drenagem e a estrutura que a comporta sempre estarão relacionados, os processos morfogenéticos advindos destes fatores modela o terreno de acordo com suas características. E, sendo assim, o relevo apresenta uma

diversidade enorme de tipos de formas as quais por mais que pareçam estáticas e iguais, na realidade são dinâmicas e se manifestam ao longo do tempo e do espaço de modo diferenciado, devido às diversas combinações e interferências dos demais componentes do estrato geográfico (ROSS, 2010), como a ação dos sistemas hidrológicos, climáticos, cobertura vegetal, litologia, etc. (CHRISTOFOLETTI, 1980).

As formas de relevo integram e são o produto resultantes das interações existentes entre diversos processos, sendo eles: estrutura geológica, atividades endógenas (magmatismo e tectonismo), dinâmicas atmosféricas, hidrológicas, glaciológicas e biológicas, que esculturam, deformam e transformam de forma permanente a paisagem ao longo do tempo. A paisagem como um todo, seus processos e relações, formas e materiais, são constituídos pela totalidade de processos atuais e pretéritos pelos quais são dirigidos por fatores climáticos, estruturais, e não menos importante, sociais (antrópicos) – com suas diversas formas de uso do solo que contribuem para a transformação/degradação da superfície. (MELO et al., 2005). À vista disto, a análise integrada dos elementos da paisagem se faz necessária para identificarmos e caracterizarmos os componentes paisagísticos do supracitado recorte espacial de estudo, também inferindo nos estudos ambientais que servirão para identificar possíveis níveis de degradação ambiental.

Portanto, o relevo é somente um dos constituintes da litosfera e está intimamente associado às rochas que o sustenta, ao clima, aos processos de erosão que esculpem a superfície e com os tipos de solo que o recobrem. As diferenciações das formas do relevo são resultado, sobretudo, da atividade simultânea, nada obstante, desigual, das atuações climáticas de um lado e da estrutura da litosfera de outro, bem como, tanto o clima quanto a estrutura não se comportam sempre idênticos, mas em oscilações – não se modificam continuamente ao longo do tempo no espaço (ROSS. *In*: Geomorfologia do Brasil, 2006). A evolução/transformação dos sistemas hidrográficos está estritamente entrelaçada a influências lito-estruturais e às variações no regime climático, que resultam em feições morfológicas específicas alocadas sobre a paisagem.

As formas de relevo do Brasil são recentes, contrastando com a antiguidade de suas estruturas geológicas e formações rochosas. (ROSS, 2010). Sobretudo, situo aqui como elemento de grande importância a análise das formas e materiais quaternários, já postos como objetos de estudo desde o início deste trabalho por apresentarem fatores que se configuram como possíveis indicadores de degradação

e esculpuração da paisagem. Desta maneira, as feições geomorfológicas foram esculpidas pelos processos erosivos que sempre atuaram e continuam agindo sobre elas, logo, estão permanentemente sendo transformadas e reafeiçoadas todos os dias (ROSS, 2010).

Não menos importante, as formas de relevo constituídas por processos quaternários continentais são, segundo Melo (et al. 2005, p. 259, *in*: Quaternário do Brasil), as principais formas que ocorrem no meio tropical brasileiro, e conseqüentemente não devem ser esquecidas na análise da paisagem e do relevo, como as superfícies de aplainamento de maiores ou menores extensões, variados tipos de encostas, feições de erosão (ravinas, voçorocas, sulcos, pipings, colapsos, etc.) e feições de acumulação, como as rampas colúvio-aluviais, leques e terraços aluviais.

Ainda de acordo com os autores, a análise das formas e materiais quaternários é crucial para a análise, compreensão e entendimento das dinâmicas paisagísticas. Além disso esta análise constitui também um dos critérios de classificação e cartografia do relevo, que nos permitem deduzir, sobretudo com a análise destes, a vulnerabilidade de seus processos erosivos, o comportamento das águas subsuperficiais, a ocorrência de minérios ou materiais de empréstimo, o comportamento (estabilidade, permeabilidade, reação à carga etc.) dos materiais superficiais, contribuindo em suma para uma análise ambiental de maior qualidade.

Desse modo, o estudo do relevo é de suma importância para o desenvolvimento de planos e projetos que demandam cada vez mais revelar os possíveis impactos ambientais que serão subseqüentes a mudanças climáticas, hidrológicas, antrópicas, etc. (MARQUES, 2007, p. 25).

Logo, a interpretação e análise da paisagem é constituída pela classificação cronológica de seus componentes e pela identificação das implicações das interações de feições e materiais obtidos com processos atualmente vigentes, (MELO et al., p. 259, *in*: Quaternário do Brasil, 2005). Tais processos repercutem também na bacia de drenagem, direta ou indiretamente, tendo como exemplo as condições climáticas, a cobertura vegetal e a litologia, considerados como fatores que controlam a morfogênese do relevo. Os fenômenos interferentes no relevo regulam o tipo de material a ser propiciado aos rios e aos outros meios de transporte de material detrítico, sobretudo além disto, de acordo com o tipo de material originado na fonte

(forma de relevo), será o tipo de material que se sucede no ambiente de sedimentação. (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Sendo assim, é necessária a integração das unidades lito-estruturais na análise da compartimentação do relevo e da rede de drenagem, visto que estas possuem influência direta e indireta sobre os integrantes da paisagem, definindo sua susceptibilidade aos processos erosivos e modelando suas formas, que se tornam unidades de análise no referido estudo de caracterização. Com isso, a análise e o estudo da geodinâmica endógena não poderá ser desagregada da Geomorfologia uma vez que a origem e a evolução das formas presentes na superfície adviriam dos agentes internos através de seus fenômenos geológicos.

3.4. Impactos ambientais associados à evolução da paisagem

A compreensão do relevo, tradicionalmente alicerçada na interação de forças endógenas e exógenas ao longo do tempo geológico, demanda hoje a incorporação da ação antrópica como um agente geomorfológico de primeira grandeza, pois as transformações na paisagem, impulsionadas pelas relações sociais de produção, adquirem uma intensidade e velocidade sem precedentes sob a égide do modo de produção capitalista, que instrumentaliza os recursos naturais e a própria Terra para a acumulação de capital. Essa perspectiva é fundamental para a análise dos impactos ambientais, que como apontado por Casseti (1991), se intensificam com o crescimento das forças produtivas que estruturam este sistema.

A ação humana, portanto, deixa de ser um fator secundário para se tornar um processo geológico dominante na atualidade, uma concepção consolidada internacionalmente. Segundo Peloggia (2005, p. 24), "[...] um dos aspectos mais significativos e certamente o mais evidente da ação do homem sobre a superfície da Terra é a modificação do relevo".

No Brasil, Ab'Sáber (1969) já apontava para a necessidade ao propor, em seu terceiro nível metodológico de análise, o estudo da "fisiologia da paisagem", a necessidade de compreendermos a atual configuração da paisagem em relação ao clima, aos processos pedogenéticos e morfoclimáticos atuais considerando também as atividades humanas, pois estas variações de fisiologia podem ser alteradas e determinadas por ações antrópicas predatórias, que em sua grande maioria correspondem em ações irreversíveis ao equilíbrio do sistema ambiental "(...) imitando

até certo ponto os acontecimentos de maior intensidade, relacionados às variações climáticas quaternárias.” (AB’SÁBER, 1965, pp. 147-148 apud AB’SÁBER, 1969).

Sendo assim, o autor alerta que as ações antrópicas predatórias poderiam alterar o equilíbrio do sistema ambiental de maneira irreversível. Essa visão é complementada pela abordagem sistêmica do geógrafo francês Jean Tricart (1977), que defendia uma análise integrada e ecológica da paisagem. Para ele, era necessário estimar o impacto das ações técnico-econômicas do homem sobre o geossistema, pois a intervenção humana frequentemente desestabiliza o equilíbrio dinâmico do meio, acelerando processos como a erosão a taxas muito superiores às naturais e desencadeando uma série de reações em cadeia por todo o sistema.

A aplicação deste conhecimento se torna então uma missão central para a geografia e para a geomorfologia, como defendida por Christofolletti (1980, p. 104), “a geomorfologia é uma ciência plena de aplicações, que visa a tornar as paisagens mais benéficas para a humanidade”. Essa aplicabilidade se manifesta, sobretudo, no planejamento ambiental e na gestão do território, uma vez que as intervenções antrópicas no meio físico, especialmente no contexto da expansão urbana e das atividades agrárias, resultam transformações profundas na paisagem.

Para Lencioni (2020), a produção do espaço insere-se na lógica da acumulação capitalista, onde a própria cidade e o território se tornam mercadorias, levando a uma ocupação frequentemente desordenada e predatória, pois a expansão urbana, por exemplo, promove a intensa impermeabilização do solo com asfalto e concreto. Essa alteração impede a infiltração da água pluvial, aumentando exponencialmente o escoamento superficial, e o resultado é a sobrecarga dos sistemas de drenagem, o que eleva a frequência e a magnitude de enchentes e inundações nas áreas mais baixas da bacia hidrográfica, como as planícies de inundação.

Sendo amparado pela legislação brasileira e regulamentado pela resolução CONAMA nº 001 de 23 de janeiro de 1986 publicado no Diário Oficial da União em 17 de fevereiro de 1986, o conceito de impacto ambiental refere-se a

[...] qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: I – a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II – as atividades sociais e econômicas; III – a biota; IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V – a qualidade dos recursos ambientais.

A expansão urbana exige interferências no meio físico, resultando em transformações significativas na paisagem. Entre essas interferências estão a construção de pontes, o aterramento de corpos hídricos, a retificação de canais fluviais e a remoção da vegetação ciliar. Tais ações afetam o equilíbrio e a dinâmica do ambiente natural, e se não forem planejadas adequadamente, podem causar perturbações severas e consequências prejudiciais ao ambiente, como os impactos ambientais. (Silva et al., p. 151, 2017)

Portanto, o uso inadequado do solo urbano tem acelerado os processos erosivos nas microbacias resultando em movimentos de massa para os canais fluviais, causando o assoreamento dos leitos e aumentando as enchentes nas planícies de inundação. Em áreas densamente habitadas, esses problemas podem acarretar prejuízos materiais significativos e até a morte de cidadãos.

Outro problema acarretado pela intensa urbanização é a impermeabilização dos solos, que tem sido frequente motivo de discussão em publicações da grande área da geografia. Com o crescimento acelerado das cidades, a impermeabilização dos solos tem se tornado cada vez mais frequente para dar acessibilidade aos veículos e às pessoas, mas torna invisível a necessidade do escoamento adequado das águas pluviais.

Eventos climáticos como enchentes e inundações têm se tornado cada vez mais frequentes a ponto de fazer parte do cotidiano de quem reside em uma grande metrópole cada vez mais impermeabilizada. Acompanhado dos eventos climáticos e das alterações antrópicas na paisagem, surgem as feições erosivas e a perda de solos nas áreas urbanas.

Apesar de concentrarmos a discussão nas áreas urbanas, as atividades agrárias nas áreas rurais também modificam a paisagem causando impactos negativos. “Essas atividades têm se mostrado crescentemente como fortes depredadoras dos recursos naturais” (ROSS, p. 225, 2003), visto que a partir do aperfeiçoamento das técnicas de colheita e plantio, utilizam a modernização como justificativa para a utilização de adubos químicos, defensivos agrícolas (inseticidas e herbicidas) e maquinários em áreas de monocultura.

Os defensivos agrícolas prejudicam o solo, de certo modo que, ao serem infiltrados e escoados pelas águas da chuva, podem contaminar os rios e seus afluentes causando a morte de organismos vivos no sistema em que está inserido. Os maquinários como tratores e colheitadeiras, por sua vez, se não utilizados de forma

adequada, podem compactar o solo e prejudicar o escoamento superficial aumentando as feições erosivas.

Em razão disso, a busca pela transformação da paisagem com a minimização dos impactos ambientais precisa ser o objetivo geral da sociedade atual. Caso esse objetivo não seja almejado por aqueles que detém os meios de produção, o nível de degradação do ambiente será irreversível em pouco tempo.

Em suma, a interação das forças endógenas e exógenas ao longo do tempo geológico, somada às ações antrópicas, tem moldado a paisagem de maneira acelerada e muitas vezes prejudicial. O modo de produção capitalista, que utiliza intensamente os recursos naturais para o acúmulo de capital, intensifica os problemas e impactos ambientais, como enfatizado por Casseti (1991) e Ab'Sáber (1969).

A legislação brasileira, por meio da resolução CONAMA nº 001 de 1986, define claramente o conceito de impacto ambiental, reforçando a necessidade de um planejamento urbano consciente para mitigar os efeitos negativos das intervenções humanas na paisagem, conforme apontado por Silva et al. (2017).

Portanto, é imperativo que a sociedade adote práticas sustentáveis e busque a transformação da paisagem com foco na minimização dos impactos ambientais, sob pena de enfrentar consequências irreversíveis a curto prazo.

3.5. A fragilidade ambiental como subsídio ao planejamento e gestão de bacias hidrográficas

Este capítulo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica aprofundada sobre o tema da Fragilidade Ambiental aplicada a bacias hidrográficas, com foco na metodologia proposta por J. Ross em 1994. Para tanto, será apresentado o arcabouço teórico-conceitual que fundamenta a análise da fragilidade, detalhando suas variáveis e sistemas de classificação. Em seguida, serão examinados diversos estudos de caso que aplicam e, frequentemente, adaptam este modelo em diferentes contextos hidrográficos no Brasil. A discussão se estenderá a uma análise crítica da metodologia, comparando-a com outras abordagens e destacando sua evolução e limitações.

A fragilidade ambiental pode ser compreendida como a vulnerabilidade de um geossistema à ação humana. Dependendo de suas características naturais, um ambiente pode ser mais ou menos sensível a esses impactos e, quando as atividades

humanas quebram o equilíbrio desse sistema, ele precisa se adaptar às novas condições para sobreviver. (RATCLIFFE, 1971).

De forma mais específica, a Fragilidade Ambiental pode ser definida como uma metodologia de investigação que avalia a vulnerabilidade de um ambiente a sofrer processos de degradação – como erosão, assoreamento de rios, deslizamentos de massa e contaminação hídrica – quando submetido a pressões, sejam elas de origem natural, ou, mais significativamente, antrópica. Sendo que

"A análise da fragilidade do ambiente é uma proposta de investigação cujo princípio básico é definir os diferentes níveis de fragilidade dos ambientes naturais, modificados ou não pelas atividades antropogênicas, em face o desenvolvimento das atividades humanas". (SANTOS, 2015, p. 77).

O seu objetivo enquanto metodologia é fornecer uma análise integrada e sintética dos diversos componentes ambientais, representando-os espacialmente no território através de cartografia temática. Esta abordagem permite avaliar as potencialidades e restrições do meio ambiente de forma integrada, compatibilizando as características naturais com as formas de uso e ocupação propostas futuramente ou já existentes.

"O reconhecimento das fragilidades ambientais perpassa, necessariamente, pelos levantamentos de solos, clima, rochas, minerais, águas, flora, fauna e demais componentes da natureza; no entanto, a análise da fragilidade exige que esses componentes sejam avaliados de forma integrada, ancorados numa perspectiva sistêmica e holística de modo a envolver a complexidade destas com as atividades humanas." (SANTOS, 2015, p. 78)

No Brasil, a proposta metodológica de Ross (1994) não emerge de um vácuo teórico, mas representa uma evolução e uma aplicação pragmática dos conceitos de Ecodinâmica, desenvolvidos pelo geógrafo francês Jean Tricart em sua obra seminal de 1977. A Ecodinâmica de Tricart é, em si, uma aplicação da teoria sistêmica ao estudo da dinâmica da superfície terrestre, constituindo a matriz intelectual sobre a qual a análise de fragilidade foi construída.

Tricart (1977) propôs uma taxonomia dos ambientes naturais fundamentada no seu grau de estabilidade morfodinâmica, focando na relação dialética entre os processos de pedogênese (formação de solos) e de morfogênese (esculturação do relevo). A sua classificação visa diagnosticar o estado de equilíbrio do sistema natural, distinguindo três categorias principais de ambientes:

Os Meios Estáveis, que são ambientes onde os processos pedogenéticos superam os morfogenéticos. Nestas condições, há um desenvolvimento e aprofundamento dos solos, indicando uma estabilidade relativa do sistema. Tricart

associa estes meios ao conceito de bioestasia, um estado de equilíbrio biológico que favorece a conservação da paisagem.

Meios Instáveis: Ambientes onde a morfogênese é dominante, com processos erosivos intensos que impedem ou revertem a formação de solos. Estes meios são associados à resistasia, um estado de ruptura do equilíbrio biológico que acelera a degradação do relevo.

Meios Intergrades: Representam as situações de transição entre os dois estágios-limite, refletindo a dinâmica contínua e as flutuações naturais do meio ambiente.

A análise ecodinâmica, portanto, valoriza os processos geomorfológicos atuais com uma finalidade eminentemente conservacionista, buscando compreender a funcionalidade dos geossistemas para subsidiar uma gestão mais racional dos recursos.

Se Tricart (1977) forneceu a base filosófica e teórica, foi o geógrafo brasileiro Jurandyr Luciano Sanches Ross (1994) quem introduziu, adaptou e sistematizou o conceito de fragilidade ambiental no Brasil, tornando-o uma ferramenta analítica e aplicada. Seu artigo publicado em 1994 é um marco divisor de águas, propondo uma metodologia para avaliar empiricamente a fragilidade sob o prisma da Teoria Geral dos Sistemas proposta por Sochava (1978) e das Unidades Ecodinâmicas de Tricart (1977).

De acordo com Amaral e Ross (2009), o propósito de se estudar a fragilidade ambiental é identificar as áreas mais propensas à degradação. Esse conhecimento serve de base para o planejamento de ações que orientem e limitem o uso da terra, visando prevenir ou minimizar problemas que afetem a qualidade do ambiente.

O autor (Ross, 1994) efetivamente traduziu um robusto diagnóstico ecológico numa ferramenta empírica e pragmática. Ele transpôs a ideia de estabilidade/instabilidade de Tricart para o conceito de "fragilidade", que é inerentemente preditivo e orientado para a gestão, avaliando não apenas o estado atual, mas a fragilidade do ambiente a intervenções futuras. Desta forma, ele construiu uma ponte essencial entre a geografia física teórica e as necessidades prementes do planejamento territorial ambiental, criando um método que poderia ser sistematicamente aplicado por órgãos públicos para subsidiar políticas de uso e ocupação do solo.

Para tanto, Ross (1994) discute também a divisão da fragilidade em duas partes: a fragilidade potencial e a fragilidade emergente.

A fragilidade potencial refere-se à suscetibilidade inerente do ambiente, determinada exclusivamente pelos seus fatores naturais. É uma análise da fragilidade “em potencial” da paisagem, considerando apenas as suas características genéticas como o relevo, os solos, a geologia e o clima, pois "A fragilidade de um ambiente é maior ou menor em função de suas características genéticas". (ROSS, 1994, p. 63). Seu resultado é um mapa que representa os fatores de estabilidade ou instabilidade de uma determinada área, independentemente da ação humana. Ela serve como base para entender a resiliência natural do sistema.

As variáveis genéticas do sistema são necessárias para este resultado, pois

“As paisagens possuem características específicas, resultados da combinação de variáveis como declividade, curvatura da superfície, tipos de solo e diferentes usos da terra. Portanto, acabam apresentando maior ou menor fragilidade aos processos erosivos, necessitando de cuidados pertinentes aos resultados observados” (CARDOSO; MOROZ CACCIA GOUVEIA, 2019, p. 164)

A fragilidade emergente, por sua vez, resulta da interação dinâmica entre a fragilidade potencial e as atividades humanas. É a fragilidade que “emerge” quando as diversas formas de uso e ocupação do solo são sobrepostas às condições naturais do terreno. A análise da fragilidade emergente torna explícito o grau de equilíbrio ou desequilíbrio gerado pelas intervenções humanas, avaliando se as práticas correntes estão em harmonia ou em conflito com a capacidade de suporte do ambiente.

Assim, “O mapeamento da fragilidade ambiental permite avaliar as potencialidades do meio ambiente de forma integrada, compatibilizando suas características naturais com suas restrições”. (KAWAKUBO et al., 2005, p. 2203). Para Ross (1994), a premissa para se realizar estudos integrados de um território é a compreensão de como a dinâmica do ambiente natural funciona, independente de haver ou não interferência das atividades humanas.

Apesar de sua ampla aplicabilidade nos estudos ambientais, a proposta de Ross (1994) não está isenta de críticas. A principal limitação deste modelo reside na ponderação das variáveis, especificamente na centralidade atribuída ao relevo, seja pela declividade ou pela dissecação, na determinação da fragilidade potencial. (SPÖRL, 2007).

Spörl (2007) aponta que, esse modelo pode gerar resultados que não refletem a realidade do campo. Ela cita ainda um exemplo:

“nem sempre uma área que apresenta um relevo mais dissecado é de fato mais frágil, ou ao contrário, nem sempre uma área de relevo plano é realmente mais estável. Pois a fragilidade depende também dos tipos de rocha, solos, uso da terra/cobertura vegetal e do regime de chuvas. Isto quer dizer que a valorização do relevo (1º dígito) no modelo sugerido por Ross (1994) pode definir uma fragilidade muito forte para uma área muito dissecada, mas que na realidade as demais variáveis poderiam amenizar sua vulnerabilidade, ou ainda, poderia determinar uma fragilidade muito fraca para uma área de relevo estável, mas que as outras variáveis poderiam acentuar sua vulnerabilidade.” (SPÖRL, 2007, p. 97)

A autora pondera que a valorização excessiva do relevo, pode, portanto, superestimar a fragilidade de uma área muito dissecada, mas com rochas e solos resistentes, ou subestimar a fragilidade de uma área plana, mas com solos extremamente erodíveis e sob uso intensivo. Essa tensão entre a simplicidade do modelo, que o torna uma ferramenta de planejamento acessível, e sua rigidez científica, que pode comprometer a acurácia, representa um paradoxo central na análise do modelo durante o campo.

A decisão de qual peso atribuir a um determinado tipo de solo ou classe de declividade é frequentemente baseada na experiência do pesquisador ou em tabelas predefinidas, o que Spörl (2007) classifica como uma avaliação “geralmente arbitrária e subjetiva”. (p. 97).

Modelos alternativos como o de Crepani et al. (2001), tentam contornar este problema sugerindo uma ponderação igualitária entre as variáveis, mas, no entanto, essa abordagem também pode ser problemática, pois pode “mascarar” o efeito de uma variável criticamente instável ao fazer sua média com outras mais estáveis (SPÖRL, 2007). A evolução para métodos como o AHP e a Lógica Fuzzy é uma resposta direta a essa necessidade, pois eles oferecem caminhos para aumentar o rigor metodológico e reduzir a arbitrariedade, mantendo a utilidade da análise de fragilidade como ferramenta de diagnóstico. (SPÖRL, 2007; SPÖRL & ROSS, 2004; MANGANHOTTO, SANTOS & OLIVEIRA FILHO, 2010; FERREIRA & SILVA, 2020).

Mesmo assim, a proposta de fragilidade emergente se mostra adequada à aplicação em bacias hidrográficas, pois é possível analisar de forma integrada as classes de fragilidade atribuída aos elementos do sistema. Por mais que as variáveis sejam atribuídas pelo autor, a análise do campo é feita para justificar a escolha dessas classes, dando mais valor à proposta de fragilidade ambiental que será gerada como resultado do trabalho desenvolvido. (PEREIRA, ROCHA & AQUINO, 2023; MARTINS DE SOUSA & RODRIGUES DO NASCIMENTO, 2015)

4. Caracterização da Área de Estudo.

A área de estudo delimitada é a Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, que possui área total de 324,43km² inserida entre os municípios de Tatuí, Guareí, Quadra e Itapetininga, todos pertencentes ao estado de São Paulo.

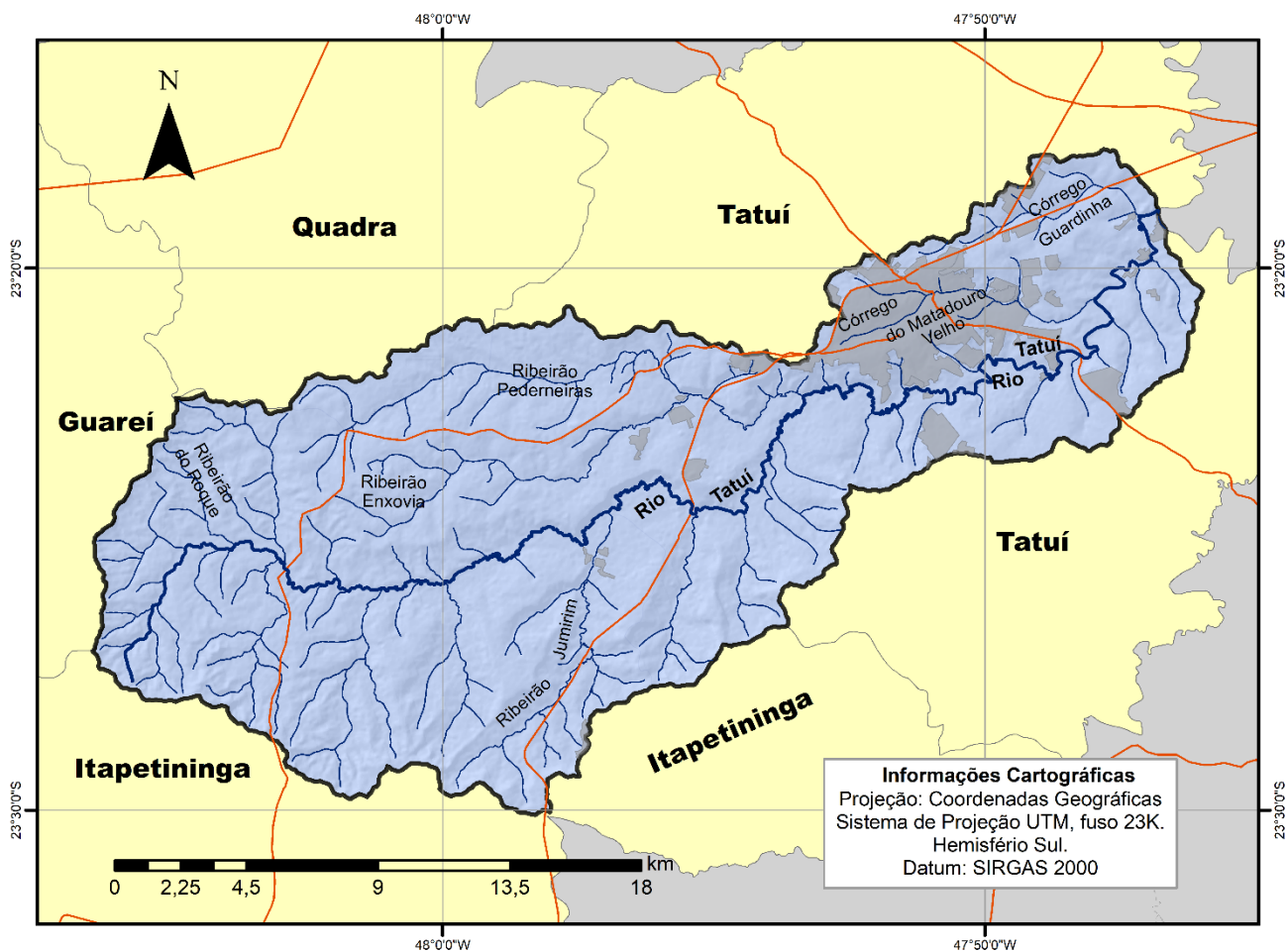
O Rio Tatuí é afluente do Rio Sorocaba, que ajustou seus meandros na região criando o modelado de colinas suavemente convexas, próprias da Depressão Periférica Paulista. Sua nascente está localizada nas coordenadas 23.37'72 S, -48.08'01 O e sua confluência à -23.31'59 S, -47.77'797 O, encontrando o Rio Sorocaba.

Está localizada na porção centro-oeste do estado de São Paulo, com suas nascentes situadas próximo ao Trópico de Capricórnio. O município de Tatuí, que abriga a maior parte da bacia, possui uma área territorial total de 524,60 km².

Do ponto de vista da gestão de recursos hídricos, a bacia está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 10 (UGRHI 10), denominada Sorocaba e Médio Tietê. Esta UGRHI é uma das mais complexas do estado, com uma área de drenagem total de 11.829 km² e uma população estimada em mais de 2 milhões de habitantes. É subdividida em seis sub-bacias, e a Bacia do Rio Tatuí pertence à sub-bacia do Baixo Sorocaba, que também inclui outros municípios como Sarapuí e Capela do Alto.

A gestão integrada desta unidade é de responsabilidade do Comitê de Bacia Hidrográfica Sorocaba e Médio Tietê (CBH-SMT), um colegiado formado em 1995 com representantes do estado, dos municípios e da sociedade civil, cujas principais preocupações iniciais foram a poluição do Rio Tietê e a proteção do reservatório de Itupararanga. As principais atividades econômicas na UGRHI 10 são diversificadas, com um forte componente industrial em sua porção metropolitana (setores automotivo, de papel e celulose, refinarias de petróleo) e um setor primário robusto, com destaque para o cultivo de cana-de-açúcar, citros e a pecuária, atividades estas que marcam profundamente a paisagem da Bacia do Rio Tatuí.

Figura 4. Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí

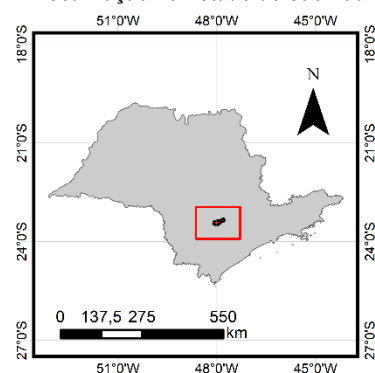


Legenda

I. Convenções Cartográficas

- Bacia do Rio Tatuí
- Áreas Urbanizadas
- Municípios da Bacia
- Municípios do Estado de São Paulo
- Rio Tatuí
- Hidrografia da Bacia do Rio Tatuí
- Rodovias Estaduais

III. Localização no Estado de São Paulo



Legenda

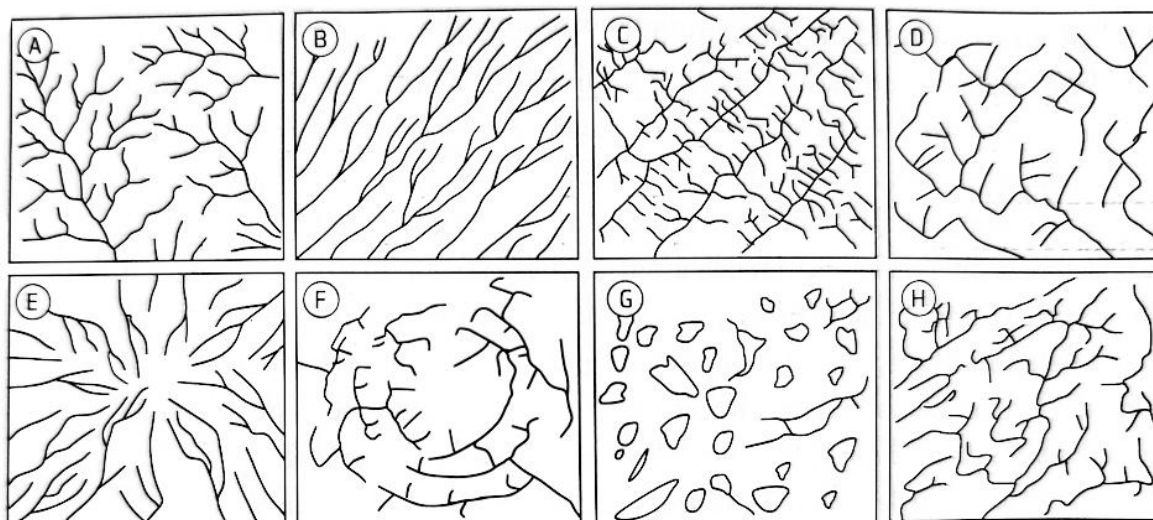
- Bacia do Rio Tatuí
- Estado de São Paulo

Base de Dados

Limites Municipais e Estadual: IBGE (2022)
 Área Urbana: IBGE (2019)
 Rodovias: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes (2016)
 Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí: Carta Topográfica na escala 1:10.000 (IGC-SP, 1970)
 Hidrografia: Agência Nacional de Águas (2017)

Sua rede de drenagem é classificada como dendrítica (A) (Figura 4), visto que possui uma forma de árvore com ramificação invertida, com os galhos marcando os cursos de sua gênese, confluindo para o sistema coletor principal. Este padrão evidencia a presença de rochas sedimentares horizontais, estruturas de resistência uniforme ou de rochas cristalinas (Stevaux & Latrubesse, 2017, p. 69-70), o que se confirmou a partir da elaboração do mapa temático da geologia do município.

Figura 5. Tipos de padrão da rede de drenagem quanto à estrutura geológica.



Tipos de padrão da rede de drenagem quanto à estrutura geológica: (A) dendrítico; (B) paralelo; (C) treliça; (D) retangular; (E) radial; (F) anular; (G) multibacia; (H) contorcido. Sua explanação pode ser encontrada no Quadro 2.2

Fonte: Stevaux & Latrubesse, p. 70, 2017. Modificado de Howard (1967).

O Município de Tatuí – SP instalou-se sobre a bacia hidrográfica do Rio Tatuí (tal qual o fez adquirir seu substantivo próprio) com a justificativa da utilização dos cursos fluviais para suprir as necessidades dos antigos moradores (abastecimento para a agricultura), mas com a evolução da cidade, a chegada das indústrias e o adensamento populacional, a utilização para agricultura deu lugar ao abastecimento das fábricas e da rede hídrica domiciliar, o que fez com que esses espaços menos valorizados, como vertentes com grau de declividade acentuada nas áreas de várzea fossem ocupados, levando à impermeabilização dos solos adjacentes aos corpos hídricos e gerando frequentes eventos de inundação, enchentes e deslizamentos.

Além disso, o abastecimento público de água depende diretamente dos mananciais superficiais, sendo os rios Tatuí e Sarapuí as principais fontes de captação, operadas pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP).

Sendo assim, além de buscar a compreensão da dinâmica geomorfológica da bacia hidrográfica, este trabalho busca importantes contribuições nos estudos de processos pretéritos que caracterizam paleoambientes e que são responsáveis pela organização espacial e comportamento da rede de drenagem perante sua bacia, contribuindo também nas ações de futuros planos de manejo sustentáveis da bacia hidrográfica para o município.

4.1. Contexto Litológico da Área de Estudo

Segundo Ross e Moroz (2011), a região da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí (vide Mapa 1) está localizada na Bacia Sedimentar do Paraná, onde predominam unidades litológicas de idade paleozoica, caracterizadas por origens distintas. A estratigrafia da área é composta exclusivamente por sedimentos, incluindo arenitos, argilitos, siltitos, folhelhos, silixitos, diamictitos e ritmitos, pertencentes ao Grupo Itararé, às Formações Tatuí, Irati, e Teresina, além dos Depósitos Aluvionares (Aluviões).

A área da bacia possui uma grande diversidade de litologias, das quais condicionam os fluxos e o tipo de padrão de drenagem que ela apresenta. Pertencentes à Bacia Sedimentar do Paraná, a estratigrafia da área é predominantemente composta por rochas sedimentares, as quais foram desgastadas pelo curso do Rio Tatuí.

Quanto ao processo e ambiente de deposição de origem destas litologias, vale destacar que eles estão diretamente associados às dinâmicas espaço-temporais relacionadas à formação da Bacia Sedimentar do Paraná. Esses processos refletem as transformações geológicas e ambientais que ocorreram ao longo do tempo, moldando a composição e a disposição das rochas na região.

Para especificar e entender de modo mais profundo a geologia da área, foi realizada a revisão bibliográfica de cada uma das unidades litológicas.

4.1.1. A Bacia Sedimentar do Paraná

Sabendo que as litologias da área da bacia hidrográfica do rio Tatuí estão associadas à Bacia Sedimentar do Paraná, entende-se que ela é uma extensa área sedimentar localizada na América do Sul, abrangendo partes do sul do Brasil, leste do

Paraguai, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, com uma área total de aproximadamente 1,5 milhão de quilômetros quadrados.

Sua forma é alongada no sentido norte-sul, e seus limites atuais são marcados por processos erosivos associados à evolução geotectônica do continente durante os períodos Mesozoico e Cenozoico. A região leste da bacia, que inclui áreas do Sudeste brasileiro e do Uruguai, foi intensamente afetada pela erosão devido ao soergimento da crosta terrestre relacionado à formação do rifte do Atlântico Sul. Estima-se que, nessa região, a erosão tenha removido até 2.500 metros de sedimentos (ZANOTTO, 1993 apud MILANI et al., 2007, p. 265).

Segundo MILANI et al. (2007), o registro estratigráfico da Bacia do Paraná é composto por uma sequência de sedimentos e rochas magmáticas que atingem uma espessura máxima de aproximadamente 7 mil metros. O depocentro estrutural da bacia, onde se concentra a maior parte desses sedimentos, coincide geograficamente com a região da calha do rio que dá nome à bacia.

Na revisão da literatura sobre a Bacia Sedimentar do Paraná, autores como Zálan et al. (1990) e Milani et al. (1994) discutem a formação da bacia, destacando que ela surgiu a partir da sobreposição de diferentes camadas sedimentares. Zálan et al. (1990) sugerem que a bacia foi formada pela sobreposição de pelo menos três bacias sedimentares distintas. Já Milani et al. (1994) e Milani (1997) propõem que o preenchimento da bacia pode ser dividido em seis unidades principais, chamadas de supersequências de segunda ordem. Essa divisão foi baseada nos conceitos da Estratigrafia de Sequências de Vail (et al., 1977), que agrupa conjuntos de rochas em intervalos de tempo de dezenas de milhões de anos, separados por superfícies de descontinuidades regionais.

As Supersequências identificadas são: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo).

As três primeiras Supersequências são compostas por sedimentos que refletem ciclos de avanço e recuo do mar (transgressões e regressões) durante o Paleozoico, ligados a variações no nível relativo do oceano. Já as demais Supersequências são formadas principalmente por sedimentos continentais, associados a rochas ígneas, depositados em ambientes terrestres (MILANI et al., 2007).

4.1.2. O Grupo Itararé

Como uma das litologias identificadas na área da bacia do rio tatuí, o Grupo Itararé foi inicialmente definido por Petri (1964) e Rocha-Campos (1967), tendo sua nomenclatura mantida até os dias atuais, conforme destacado por Mattos (2012). Esta unidade litoestratigráfica situa-se na base da sequência Permo-Carbonífera da borda leste da Bacia do Paraná, representando um importante registro sedimentar resultante de sucessivos avanços e recuos de geleiras durante o período de glaciação que afetou o paleocontinente Gondwana (SAAD, 1977).

De acordo com Arab et al. (2009), o Grupo Itararé constitui um testemunho do período glacial de idade permocarbonífera na Bacia Sedimentar do Paraná, abrangendo ambientes tanto terrestres quanto marinhos de profundidade moderada, e englobando processos que deram origem a diversas fácies sedimentares.

Saad (1977) salienta que é provável que a sedimentação do Grupo Itararé tenha sido influenciada não apenas por processos glaciais, mas também por fatores tectônicos regionais associados ao desenvolvimento da Bacia Sedimentar do Paraná, uma bacia intracratônica. O autor identifica em seus estudos sobre a história tectono-sedimentar do Grupo Itararé, quatro fases distintas em sua formação: A primeira fase é caracterizada por intensa atividade tectônica, principalmente na região centro-sul, conforme evidenciado por Petri & Fulfaro (1967; 1971). Esses movimentos tectônicos resultaram no alinhamento estrutural do Paranapanema, que dividiu a Bacia do Paraná em duas sub-bacias.

A segunda fase, conforme descrito pelo autor (Saad, 1977), é marcada pelo recrudescimento das condições tectônicas, com o retorno de atividades tectônicas de maior intensidade. As evidências indicam que durante esse período ocorreu um levantamento gradual e contínuo da borda nordeste da Bacia até o final da deposição do Grupo Itararé, refletindo a interação entre os mecanismos tectônicos e os efeitos glaciais na evolução da bacia.

Na terceira fase, o autor observa a deposição da porção superior da sequência Itararé, com predomínio de sedimentação continental na região nordeste, que gradativamente assume características mais marinhas em direção ao sul. Essa transição sugere uma mudança nos ambientes deposicionais, influenciada tanto por fatores tectônicos quanto por variações climáticas e glaciais.

Por fim, a quarta fase, representada pela Formação Tatuí (o conjunto superior da sequência), é descrita como um período de relativa calma tectônica, evidenciada pela sedimentação fina e homogênea dessa unidade. Soares (1972, apud Saad, 1977), sugere que o início do ciclo pós-glacial pode ter sido marcado por processos erosivos e retrabalhamento dos sedimentos previamente depositados, refletindo a estabilização do sistema deposicional após os eventos glaciais e tectônicos que moldaram a evolução da bacia.

Desse modo, com base em uma revisão bibliográfica sobre o arcabouço litoestratigráfico do Grupo Itararé, diversos autores (Rocha-Campos, 1967; Santos, 1979; Santos, 1987; Santos et al., 1996; Saad, 1977; Gama Jr et al., 1980; Gama Jr et al., 1992; Stevaux et al., 1986; Perinotto, 1987; Caetano-Chang, 1984; Souza, 1986; Canuto et al., 2001; Mattos, 2012) caracterizam essa unidade como uma das mais heterogêneas em termos de associações de fácies sedimentares. Essa diversidade é resultado da integração de complexos sistemas deposicionais, que incluem depósitos glaciais terrestres, ambientes marinhos proximais, sistemas costeiros (especialmente deltaicos), leques aluviais, planícies de *outwash* (formadas pela deposição de sedimentos no término de geleiras), além de sistemas de plataformas, leques subaquosos e sedimentação marinha distal. Essa variedade de ambientes reflete as múltiplas influências glaciais, tectônicas e marinhas que atuaram durante a deposição do Grupo Itararé.

Em resumo, o Grupo Itararé destaca-se pela sua complexidade litoestratigráfica, marcada por uma ampla gama de fácies sedimentares que abrangem desde sistemas glaciais terrestres até ambientes marinhos distais. Essa heterogeneidade é resultado da interação de processos glaciais, tectônicos e marinhos, que moldaram a deposição dessa unidade ao longo do tempo. A síntese dos trabalhos citados reforça a importância do Grupo Itararé como um registro geológico significativo, que documenta a transição entre diferentes sistemas deposicionais durante o período Permo-Carbonífero na Bacia do Paraná.

Portanto, segundo Mattos (2012, p. 7)

“Esta grande variação faciológica é decorrente do forte controle tectonossedimentar imposto pela glaciação na Bacia do Paraná que, associada ao ciclo transgressivo/regressivo durante o Paleozóico, controlou a variação do nível do mar interior da Bacia do Paraná.”;

Ainda de acordo com o autor, o Grupo Itararé é considerado a unidade mais espessa da Bacia do Paraná, com aproximadamente 1500 metros próximos ao

depocentro, sobrepondo um hiato deposicional que sucede os estratos devonianos da Supersequência Paraná e as rochas do embasamento Pré-Cambriano/Eopaleozóico. (Mattos, 2012).

No âmbito da sua litologia, como já mencionado aqui, o Grupo Itararé é caracterizado por uma grande complexidade e variedade faciológica, “[...] composta por arenitos, conglomerados, diamictitos, folhelhos e ritmitos com clastos caídos de *icebergs*.” (MATTOS, 2012, p. 18)

No entanto, PETRI et al. (1992) destacam que, em estudos realizados por SOARES et al. (1977), foram identificados, na região do médio Tietê, três pacotes litológicos sobrepostos estratigraficamente nesta unidade. O pacote inferior é composto por folhelhos rítmicos, ritmitos, diamictitos, arenitos, arenitos conglomeráticos e conglomerados. Já o pacote intermediário apresenta diamictitos, ritmitos e siltitos. No pacote superior é possível encontrar predominantemente arenitos e diamictitos.

O ambiente de sedimentação do Grupo Itararé abrangeu paleoambientes deposicionais que variaram de sistemas fluviodeltaicos a marinhos plataformais, sofrendo influências diretas da glaciação permocarbonífera e da tectônica ativa. Esses processos se refletiram em movimentos de subsidência e soerguimento em áreas próximas ou no interior da bacia. Durante a deposição do Grupo Itararé, o paleocontinente Gondwana afastava-se gradualmente do polo Sul, o que resultou em uma mudança climática de condições glaciais para temperadas (MATTOS, 2012).

Sobretudo, Caetano-Chang (1984), em seus estudos, confirma a ocorrência de glaciação e destaca a complexidade do registro sedimentar associado à formação do Itararé como fatos incontestáveis. O autor apresenta diversas evidências de atividade glacial, como afloramentos, feições e testemunhos geológicos, localizados no estado de São Paulo. Entre esses registros, destacam-se a Rocha Moutonnée, no município de Salto, e o Ritmito de Itu, que servem como testemunhos marcantes desse evento glacial.

4.1.3. Formação Tatuí

Sendo predominante na área da bacia do Rio Tatuí, a Formação Tatuí é crono correlata às formações Rio Bonito e Palermo, na Região Sul do Brasil (CHAHUD, 2011).

Assine et al. (2003) caracterizaram a porção superior da Formação Tatuí, no centro-leste de São Paulo, como um trato de sistemas de mar alto, marcado pela progradação de sistemas aluviais costeiros sobre uma plataforma marinha predominantemente influenciada por ondas, com indícios de ação de marés. Eles propuseram que a origem dos sedimentos estaria localizada ao norte, com paleocorrentes direcionadas para o sul. Na mesma linha de pensamento, Barbosa-Gimenez e Caetano-Chang (2010) destacam que a Formação Tatuí representa o registro sedimentar do nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, integrando a sequência sedimentar do Grupo Tubarão, datado do período Permiano.

Além disso, a Formação Tatuí está presente apenas no Estado de São Paulo e é composta por sequências de siltitos, siltitos arenosos e arenitos finos local e significativamente micáceos (com biotita abundante) e piritosos, frequentemente calcíticos, predominando uma perfeita estratificação plano-paralela, sendo comum estruturas concrecionárias e lentes de sílex cinzento (Instituto Geológico, 1981). Entre essas camadas, observam-se intercalações de níveis conglomeráticos de origem flúvio-deltaica. (STEVAUX et al., 1986; ASSINE et al., 2003).

Em termos geológicos, os arenitos da Formação Tatuí foram depositados principalmente em ambientes costeiros, incluindo barras litorâneas e plataformas de sistemas flúvio-deltaicos, além de cunhas clásticas associadas a *fan-deltas*. (STEVAUX et al. 1986).

Dessa forma,

A Formação Tatuí é constituída predominantemente por pelitos, formando espessas camadas de siltitos argilosos e intercalando, subordinadamente, camadas de arenitos, calcários, folhelhos e sílex. Embora de ocorrência subordinada, os arenitos podem ser encontrados em toda extensão da Formação Tatuí, distribuindo-se desde a borda atual até porções mais centrais da bacia em São Paulo, e são portadores de valiosas informações para o entendimento da história diagenética da unidade. (BARBOSA-GIMENEZ, N. L.; CAETANO-CHANG, M. R., 2010, p. 68-69)

Barbosa-Gimenez (1996) e Barbosa-Gimenez & Caetano-Chang (1998) também destacam que os arenitos da Formação Tatuí são constituídos principalmente por quartzo e feldspatos, com quantidades menores de fragmentos de rocha e minerais acessórios.

4.1.4. Formação Irati

A Formação Irati, estabelecida por White (1908), é uma unidade litoestratigráfica de origem permiana e de significativa relevância na Supersequência Gondwana I (Milani, 1997). Sua litologia é composta principalmente por folhelhos negros e rochas carbonáticas associadas (Milani et al., 2007). O depósito dessa formação ocorreu durante três ciclos de 4ª ordem de variação do nível do mar, em um ambiente de mar restrito (Araújo et al., 2001, apud Costa, 2015).

Gomes (1959) destaca que, assim como em outras unidades litoestratigráficas da Bacia Sedimentar do Paraná, a Formação Irati é atravessada por soleiras de composição básica, datadas do período pós-triássico. Segundo Petri & Fúlfaro (1983), essas soleiras apresentam espessuras que variam de alguns metros até aproximadamente 200 metros (apud COSTA, 2015).

De acordo com Araújo et al. (2000), as soleiras são marcadas por seu efeito térmico, que influencia a maturação da matéria orgânica e, conseqüentemente, a migração de fluidos.

Souza et al. (2008) classificam a Formação Irati como parte integrante do sistema petrolífero Rio Bonito/Pirambóia, o que a torna alvo de diversos estudos no campo da geologia do petróleo.

A Formação Irati está amplamente distribuída na Bacia do Paraná, tendo se depositado sobre uma área de cerca de 1.000.000 km². No Brasil, sua ocorrência abrange os estados de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (HACHIRO, 1996).

De acordo com Mendes et al. (1966), a Formação Irati é uma unidade basal subdividida do Grupo Passa Dois, de idade Permiana, que ocorre em extensas proporções na Bacia do Paraná. Os autores afirmam que o Irati representa uma fase redutora dentro de um amplo ciclo sedimentar, iniciado parcialmente após o Palermo e prolongado até o final da Formação Serra Alta. Especificamente no Estado de São Paulo, esse ciclo teria começado com a Formação Taquaral, estendendo-se até as fácies Paranapanema.

Autores como Maack (1947), Lange (1951) e Mendes et al. (1966) destacam uma estreita relação entre a Formação Irati e a Formação Serra Alta devido às suas litologias semelhantes. Segundo Mendes et al. (1966), ocorrem intercalações de lentes de folhelho não betuminoso, semelhantes às da Formação Serra Alta, dentro

da Formação Irati. Eles concluem que essa característica resulta das condições de sedimentação que já coexistiam durante a deposição dos folhelhos betuminosos do Irati.

Ao discutir a gênese da Formação Irati, Amaral (1967) ressalta que essa unidade se formou a partir da deposição de sedimentos finos, alternando entre calcários e argilosos, em um extenso lago situado em uma região plana e tectonicamente estável. A estagnação das águas desse lago criou um ambiente redutor, o que favoreceu a preservação da matéria orgânica.

Amaral (1967, p. 6) argumenta ainda que a presença de níquel nas cinzas do betume, combinada com a ocorrência de boro nos folhelhos, além da identificação de espículas de esponja e outros elementos, levou à conclusão de que o lago em questão mantinha uma conexão com o mar. O autor sugere ainda que durante a fase inicial de sedimentação da formação, as condições climáticas no Estado de São Paulo parecem ter sido caracterizadas por um clima quente e com baixa precipitação, evoluindo posteriormente para um período frio e chuvoso, com alternâncias entre fases quentes e secas.

No que tange às suas estruturas,

As principais estruturas tectônicas do Irati consistem em falhamentos, enquanto que as atectônicas consistem em pequenas e localizadas dobras produzidas por escorregamentos subaquáticos, que foram também responsáveis pela formação de brechas calcárias existentes ora em um, ora em três a quatro níveis pouco espessos de brecha calcária intraformacional [...] (AMARAL, 1967, p. 5).

Mendes et al. (1966) destacam que, do ponto de vista estratigráfico, a Formação Irati está posicionada acima do Grupo Tubarão, de idade permocarbonífera, e abaixo da Formação Estrada Nova, datada do período Permiano.

No Estado de São Paulo, a espessura média da Formação Irati varia entre 20 e 30 metros em afloramentos, mas aumenta para 40 a 50 metros em áreas mais centrais da bacia sedimentar, conforme observado em sondagens (AMARAL, 1967). Essa formação se destaca pela grande uniformidade de suas rochas em uma extensa área. Amaral (1967, p. 8) ressalta que tanto as rochas observadas nos afloramentos quanto as do centro da bacia apresentam uma impressionante consistência em sua composição.

De acordo com Amaral (1967), a litologia da Formação Irati é composta principalmente por folhelhos pretos, muitas vezes pirobotuminosos, e dolomitos, com variações na quantidade de calcita. O autor destaca que o metamorfismo térmico das

rochas calcárias, causado pela intrusão de corpos de diabásio, é evidenciado pela recristalização e pelo aumento da granulação. Já os folhelhos que compõem a litologia do Irati sofreram poucas alterações, limitando-se à perda de sua estrutura folheada e de sua coloração preta.

Além disso, a Formação Irati possui relevância econômica significativa. No Estado de São Paulo, as rochas calcárias dessa formação foram amplamente exploradas para uso como corretivo de solo e, no passado, para a produção de cal. Em menor escala, dependendo do tipo de calcário, essas rochas também são utilizadas como material de revestimento (AMARAL, 1967).

Em síntese, a Formação Irati apresenta características litológicas marcantes, como a presença de folhelhos pretos e dolomitos, além de evidenciar processos metamórficos associados à intrusão de diabásios. Sua importância econômica, especialmente no Estado de São Paulo, reforça sua relevância tanto para estudos geológicos quanto para aplicações práticas, destacando-se a exploração de calcários para fins agrícolas e industriais.

4.1.5. Formação Teresina

A Formação Teresina é a segunda litologia que mais predomina na bacia hidrográfica do Rio Tatuí, na porção que se localiza próximo às nascentes do Rio Tatuí.

Na síntese de estudos acadêmicos realizados por diversos autores, como Gordon Jr. (1947), Schneider et al. (1974), Zaine (1980), Petri & Coimbra (1982), Sousa (1985), Sousa et al. (1991), Andreis & Carvalho (2001) e Mendez Duque (2012), entre outros, que abordam a Formação Teresina, adota-se a nomenclatura litoestratigráfica proposta inicialmente por Gordon Jr. (1947) e posteriormente revisada por Schneider et al. (1974). Essa classificação subdivide o Grupo Passa Dois em quatro unidades principais: Formação Irati, Formação Serra Alta, Formação Teresina e Formação Rio do Rasto, presentes nas porções central e sul da Bacia Sedimentar do Paraná.

A Formação Teresina constitui parte da porção superior do Grupo Passa Dois, sendo descrita como uma sequência sedimentar composta principalmente por siltitos, intercalados com camadas de arenitos, calcários e silexitos. (MENDEZ DUQUE, 2012.)

Essa subdivisão reflete a complexidade e a diversidade dos processos sedimentares que ocorreram durante o Permiano na Bacia do Paraná. A Formação Teresina, em particular, destaca-se por sua composição litológica distinta, marcada por sequências de siltitos, folhelhos e arenitos, que indicam um ambiente de deposição transicional entre sistemas fluviais e marinhos rasos.

É importante ressaltar que a padronização da nomenclatura litoestratigráfica, como a proposta por Gordon Jr. (1947) e Schneider et al. (1974), é fundamental para a integração de dados em estudos geológicos. No entanto, avanços recentes em técnicas de análise sedimentar e datação radiométrica têm permitido refinamentos na caracterização dessas formações, sugerindo que revisões futuras podem ser necessárias para incorporar novos conhecimentos. Além disso, a Formação Teresina, assim como as demais unidades do Grupo Passa Dois, desempenha um papel crucial na compreensão das mudanças paleoambientais e paleoclimáticas que ocorreram durante o Permiano, oferecendo *insights* valiosos sobre a história geológica do Gondwana.

No que diz respeito ao sistema deposicional da Formação Teresina, as interpretações acadêmicas ainda apresentam divergências, uma vez que as discussões sobre o ambiente de sedimentação variam entre um contexto marinho e outro lacustre. Conforme Mendez Duque (2012), autores como Figueiredo Filho (1972), Lavina (1991), Rohn (1994) e Elias et al. (2000), entre outros, defendem que a Formação Teresina foi depositada em um ambiente marinho raso, caracterizado pela presença de planícies de maré. Por outro lado, Holz et al. (2010) apresentam evidências que sugerem um sistema deposicional de costa-afora a planície costeira, influenciado por eventos de tempestades, o que reforça a complexidade da interpretação do ambiente de sedimentação dessa formação.

Além disso, as variações na espessura da Formação Teresina também refletem sua diversidade deposicional. Segundo Meglhioratti (2006), na borda leste da Bacia do Paraná, as espessuras dessa formação variam entre 300 e 400 metros. No entanto, Holz et al. (2010) observam que, na parte central da mesma borda leste, a espessura é menor, oscilando entre 180 e 330 metros. Essas diferenças podem estar relacionadas a fatores como a proximidade de fontes sedimentares, a subsidência da bacia e as variações paleogeográficas durante o Permiano.

Essa divergência nas interpretações sobre o ambiente deposicional da Formação Teresina destaca a necessidade de estudos mais detalhados e integrados,

que levem em conta tanto as características litológicas quanto os aspectos paleoambientais e estratigráficos.

4.2. Aspectos Climáticos da Área de Estudo

Como este trabalho se trata de uma análise geomorfológica de uma bacia hidrográfica, a caracterização climática do recorte de estudo é fundamental para a compreensão de seus processos hidrológicos. Dessa forma, neste capítulo serão discutidos os aspectos climáticos da área de estudo de acordo com os dados coletados e materiais revisados.

A área que abrange a Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, segundo Mochizuki et al. (2007, p. 120),

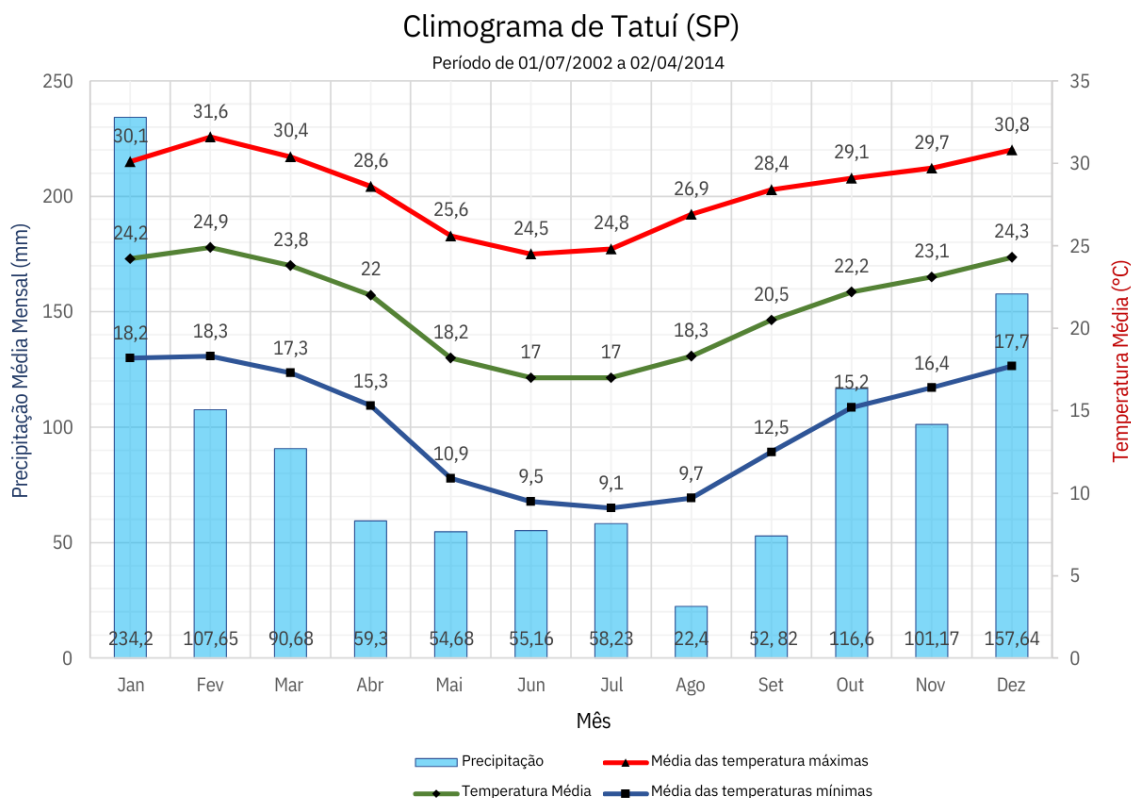
[...] “apresenta o clima tropical de altitude, que abrange as áreas mais elevadas dessa região, caracterizado por duas estações bem definidas, um verão chuvoso e um inverno mais seco, porém a característica mais relevante está nas temperaturas mais baixas, especialmente no inverno, em função da maior altitude e da influência das massas de ar mais frias.”

Ainda de acordo com os autores, a região do município de Tatuí (SP) integra a unidade climática VI nos estudos de Köppen, chamada “Percebe do Tietê”. Esta unidade se distingue por apresentar índices de pluviosidade no inverno inferiores aos observados nas porções mais ao norte do Estado.

Portanto, de acordo com a classificação climática de KÖPPEN, o clima da região é classificado como Cwa, ou seja, um clima mesotérmico úmido com inverno seco, característico de regiões subtropicais. (ALVARES et al., 2014).

Com relação à temperatura da região, de modo geral, Mochizuki et al. (2007) salienta que as estações são bem definidas. O período quente ocorre predominantemente entre setembro e março, com o trimestre mais quente compreendendo janeiro, fevereiro e março. Em contrapartida, as temperaturas mais baixas são registradas no período de maio a agosto.

Para confirmar as informações anteriores, foi elaborado um climograma com os dados disponibilizados pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAgro) no período de 2002 a 2014. A estação meteorológica de coleta selecionada foi a de Tatuí (SP), em razão do recorte de estudo se inserir em sua maior parte, no município.

Gráfico 1. Climograma de Tatuí (SP) - Período de 01/07/2002 a 02/04/2014

Fonte: Estação Meteorológica de Tatuí - CIIAgro (2025)
N = 11-12 anos de dados por mês

Elaborado em: 20/04/2025

Fonte: CIIAgro (2025). Elaborado pelo autor (2025).

A partir do climograma elaborado, verificou-se a confirmação da sazonalidade que rege o clima na região (Cwa): o verão é quente e úmido, concentrando a maior parte da precipitação anual, e o inverno é mais seco, de temperaturas amenas.

O período úmido estende-se de outubro a março, caracterizando-se por maiores volumes de chuva e de maiores temperaturas. O ápice da estação chuvosa ocorre nos meses de janeiro e dezembro, com precipitações que ultrapassam 150mm mensais. No bimestre de janeiro a fevereiro, são registradas as temperaturas mais altas do ano, com as médias máximas superando os 30°C e as médias mensais em torno de 24°C a 25°C.

Em oposição, o período de estiagem se manifesta entre os meses de abril e setembro. Há queda no volume de chuvas atingindo os menores valores em junho, julho e agosto, quando os índices pluviométricos ficam abaixo de 20mm. Acompanhando a redução da umidade, as temperaturas também declinam: julho se

destaca como o mês mais frio, com a temperatura média mínima mais baixa do ano (9,1° C).

A relação climática observada no climograma acima demonstra o comportamento clássico de um clima subtropical com inverno seco (Cwa), de acordo com Alvares et al. (2014, p. 713).

A classificação climática de Köppen designa a tipologia Cwa como um clima mesotérmico, no qual a sazonalidade da precipitação e da temperatura é um fator determinante. O critério principal (C) estabelece que a temperatura média do mês mais frio se situa entre -3°C e 18°C. A principal característica distintiva, indicada pela letra (w), é a presença de uma estação seca bem definida no inverno, em que a precipitação do mês mais seco é inferior a um décimo da registrada no mês mais chuvoso do verão. Adicionalmente, a letra (a) qualifica o verão como quente, exigindo que a temperatura média do mês mais quente seja superior a 22°C. Esse conjunto de fatores é sintetizada por Alvares et al. (2014, p. 713, tradução nossa) ao definir o Cwa como um clima “subtropical úmido, com inverno seco e verão quente”.

Ainda de acordo com Alvares et al. (2014, p. 724, tradução nossa) “O Cwa é um clima típico do sudeste do Brasil e cobre apenas 2,5% do território nacional”.

4.3. Geomorfologia Regional

Segundo Ross e Moroz (2011), a região onde está inserida a Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí está localizada na província geomorfológica da Depressão Periférica Paulista. Conforme Almeida (1967) e Cordani (2004), essa região foi estruturada a partir da borda leste da Bacia Sedimentar do Paraná, marcada por uma ruptura de aproximadamente 200 metros de declive que separa a unidade do Planalto Atlântico. Esse processo teve origem na tecto-orogênese Pré-Cambriana, que afetou a Plataforma Brasileira até, possivelmente, o Eopaleozóico.

Ab'Saber (1949) descreve a depressão periférica paulista (DPP) como um processo de formação de patamares de erosão, deprimidos e periféricos, localizados nas bordas de bacias sedimentares. Nesse contexto, o nível de base da unidade é estabelecido pela circundesnudação, enquanto as deposições perdem sua predominância para os processos denudacionais, que estão diretamente associados à hidrografia regional.

A Depressão Periférica Paulista (DPP) se estende por uma faixa de mais de 100 km com orientação SW-NE, encontrando-se, a noroeste, com os limites das

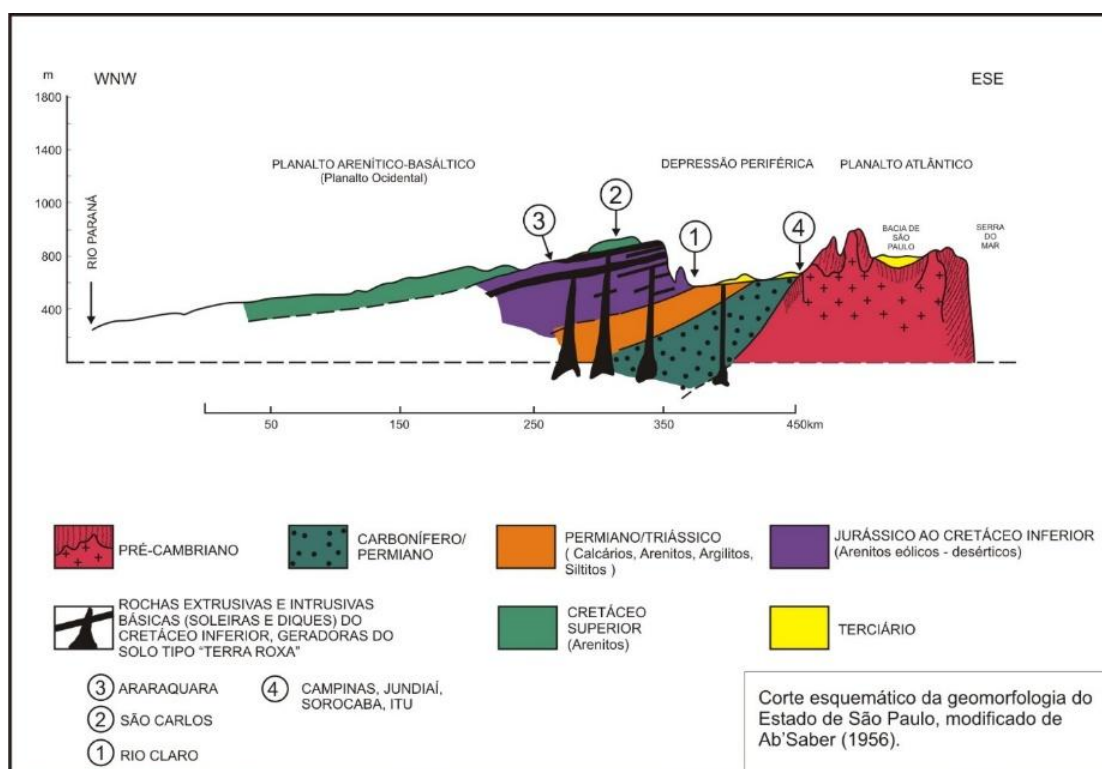
frentes de cuesta sustentadas pelos derrames vulcânicos mesozoicos (VILLELA, 2011).

Já segundo Vieira (1982), a Depressão Periférica Paulista (DPP) consiste em uma faixa deprimida situada entre as escarpas de diabásio e arenitos basálticos, que marcam sua borda ocidental, e o Planalto Cristalino Atlântico, que estabelece sua borda oriental.

De acordo com a classificação de Ross & Moroz (2011), a região onde está inserida a bacia hidrográfica do rio Tatuí localiza-se na Depressão do Médio Tietê, uma subdivisão morfológica da Depressão Periférica Paulista (DPP). Nessa área, o Rio Tietê, com sua extensa rede de drenagem, sobrepôs-se às estruturas e às últimas ações tectônicas cenozoicas, promovendo capturas por parte de seus afluentes e estabelecendo um padrão de drenagem que varia entre dendrítico a paralelo. Esse processo contribuiu para a formação do relevo colinoso e de topos extensos característicos da DPP (PENTEADO, 1976; ROSS & MOROZ, 2011; VILLELA, 2011).

A figura a seguir ilustra as unidades geomorfológicas do Estado de São Paulo, destacando a Depressão Periférica Paulista, onde se situa a região da bacia hidrográfica do rio Tatuí.

Figura 6. Corte esquemático em perfil da geomorfologia do Estado de São Paulo.



Fonte: Disponível em: <https://gen2011urc.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/05/compartimentosdorelevopaulista.jpg> Modificado de Ab'Saber. (1956)

Ab'Saber (1969) destaca que a macro-compartimentação geomorfológica observada atualmente no Brasil começou a se formar no período Cretáceo (há 145 milhões de anos) e se estendeu ao longo de todo o Cenozóico (desde 66 milhões de anos até os dias atuais). Esse processo foi impulsionado pelo soerguimento da plataforma e pela epirogênese pós-cretácea, que favoreceram o desenvolvimento de processos circundenudacionais.

Complementando essa perspectiva, Ross & Moroz (2011) afirmam que, enquanto ocorria o soerguimento do continente sul-americano, as ações erosivas atuaram no rebaixamento e na esculturação das superfícies mais expostas. Ao longo de milhares de anos, a combinação da neotectônica, da resistência dos diferentes tipos de litologia, das variações climáticas durante os períodos Terciário e Quaternário (seja de forma agressiva ou não) e da instalação de novas redes de drenagem (intensas ou não) resultou na grande diversidade de formas de relevo que hoje caracterizam o território brasileiro.

4.4. Pedologia da área de estudo

Como um dos elementos constituintes da bacia hidrográfica do Rio Tatuí, a pedologia local também precisa ser abordada para analisarmos o contexto geral de integração e a influência que ela possui sobre a bacia.

"Por assim dizer, relevo e solos caminham juntos na evolução da paisagem, grosso modo pelo balanço morfogênese/pedogênese" (VILLELA, 2011, p. 30). Dessa forma, é através do levantamento pedológico que obtemos informações morfológicas, físicas e mineralógicas das variações dos solos existentes, entendendo-o como um verdadeiro corpo natural, individualizado e com respostas distintas às práticas de manejo – que podem ser analisadas de forma integrada posteriormente. (Embrapa, 2003).

Especificamente na Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, segundo Rossi (2017), podem ser identificados os Latossolos Vermelhos Distróficos Típicos, os Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos Típicos e os Gleissolos Háplicos ou Melânicos Eutróficos ou Distróficos. A descrição de cada um dos tipos de solos encontrados na área da bacia, seguindo o manual de classificação de solos da Embrapa (1999)

menciona os códigos PVA33, PVA15, PVA11, PVA22, LV23, LV26, LV20 e GX11. (Rossi, 2017).

As descrições dos códigos supracitados estão apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 2. Descrição detalhada dos solos ocorrentes na Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, segundo o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo na escala de 1:100.000 (Rossi, 2017)

CÓDIGO SEGUNDO O MANUAL DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS DA EMBRAPA	DESCRIÇÃO DOS SOLOS
PVA33	Associação de ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado ou proeminente, textura média/argilosa, pouco profundo + CAMBISSOLO HÁPLICO A moderado textura argilosa + NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico/Distrófico, textura média.
LV23	Associação de LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura média, álico + LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, álico, ambos fase relevo ondulado e suave ondulado.
PVA15	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado ou proeminente, textura média, argilosa ou média/argilosa, fase relevo ondulado e forte ondulado.
GX11	GLEISSOLO HÁPLICO ou MELÂNICO Eutrófico ou Distrófico textura argilosa, fase relevo plano.
PVA11	Associação de ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO abruptico ou não abruptico, A moderado ou proeminente, textura arenosa/argilosa ou média/argilosa + NEOSSOLO LITÓLICO, A moderado, proeminente ou chernozêmico, textura média.
LV26	Associação de LATOSSOLO VERMELHO Distrofico típico, A moderado textura média, álico + LATOSSOLO VERMELHO Distroférico A moderado, textura argilosa, ambos fase relevo suave ondulado e ondulado.
PVA22	Associação de ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO típico, A moderado textura média ou média/argilosa + ARGISSOLO VERMELHO-

	AMARELO típico, A moderado textura média ou arenosa/média, ambos Distróficos, fase relevo ondulado.
LV20	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa ou muito argilosa, álico, relevo suave ondulado.

Os argissolos se concentram na parte oeste da bacia do Rio Tatuí, próximos às suas nascentes, enquanto os latossolos predominam no centro da bacia até a extensão de sua confluência, quando o Rio Tatuí encontra o Rio Sorocaba. Os gleissolos háplicos foram identificados em uma pequena área próxima ao leito do Rio Sorocaba, no limite da confluência do Rio Tatuí.

A ordem dos solos predominantes pertence aos Latossolos Vermelhos, que “envolvem solos cuja cor está centrada na matriz 2,5YR ou mais vermelhos na maior parte dos primeiros 100cm do horizonte B, incluindo-se BA.” (EMBRAPA, 2003, p. 52).

Ainda segundo a Embrapa (2003), os latossolos vermelhos são mais vermelhos que os Latossolos Vermelho-Amarelos e Amarelos em razão da maior concentração de óxidos de ferro na fração argila, principalmente hematita. São de origem de material pobre, logo, são solos pobres desde a sua gênese. Possuem perfis profundos (mais de 3 metros), bem drenados, constituídos por folhelhos, argilitos ou varvitos (PLANO DIRETOR DE CONTROLE DE EROSÃO RURAL, 2011, p. 10).

Quanto ao seu material de origem, podemos citar “principalmente o argilito, podendo ocorrer varvitos e folhelhos, e encontram-se na faixa delimitada como série Passa Dois, Tubarão e Itararé da Depressão Periférica.” (PLANO DIRETOR DE CONTROLE DE EROSÃO RURAL, 2011, p. 10).

Já os Argissolos Vermelho-Amarelos “são bem desenvolvidos, diferenciando dos Latossolos por apresentar um gradiente de textura em profundidade, como consequência de acúmulo de argila dos horizontes superiores.” (EMBRAPA, 2005).

Como os que ocorrem na área da bacia podem ser classificados como distróficos (Rossi, 2017), eles são caracterizados por sua baixa fertilidade e por possuírem textura média a argilosa. Geralmente são associados ao baixo teor de alumínio extraível.

Quanto aos Gleissolos Háplicos ou Melânicos, são classificados como solos minerais e hidromórficos, com grande influência do curso d’água. Ocorre geralmente em áreas deposicionais (planícies aluviais), como na planície próxima ao Rio

Sorocaba, na Bacia do Rio Tatuí. Apresenta uma diversidade de textura, tanto vertical quanto horizontal bem demarcada. (Embrapa, 2003)

5. Materiais e Métodos

Este capítulo contempla a metodologia de trabalho, que se baseia na Abordagem Sistêmica como fundamento conceitual para a problematização e interpretação dos dados. A metodologia é compreendida como o conjunto de técnicas e procedimentos aplicados durante a análise. São detalhadas as etapas da pesquisa, que incluem a revisão bibliográfica sobre o tema, a elaboração de mapeamentos temáticos (geologia, hipsometria, declividade, uso do solo e unidades de relevo), a realização de trabalhos de campo, e os métodos empregados para a análise da rede de drenagem, das formas de relevo e da Fragilidade Ambiental da bacia hidrográfica.

5.1. Procedimentos Metodológicos

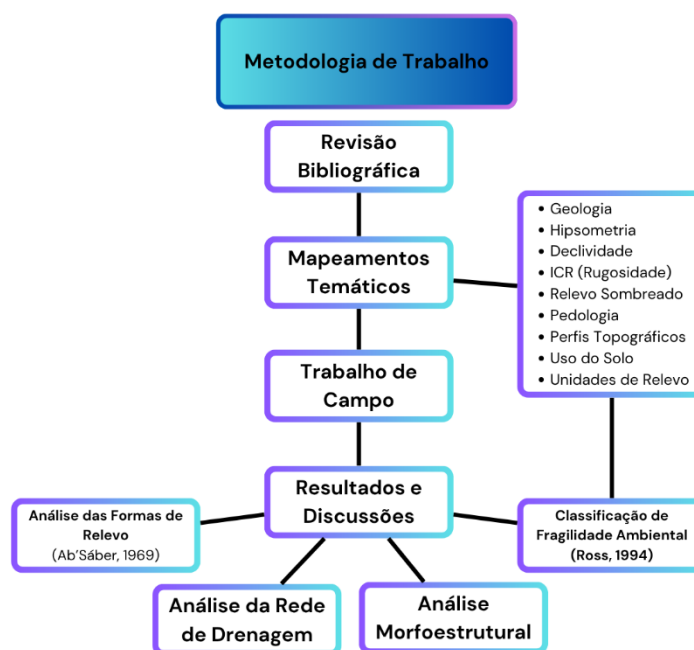
Decidiu-se pela adoção do método de Abordagem Sistêmica nesta pesquisa, compreendendo-o como a base conceitual que fundamenta a problematização e a interpretação dos fatos observados. Assim, a Metodologia é considerada como o conjunto de técnicas e procedimentos aplicados ao longo da análise apresentada.

Além disso, a Abordagem Sistêmica permite uma visão holística do objeto de estudo, integrando diversas variáveis e fatores que influenciam o sistema analisado. Essa perspectiva ampla e interconectada é essencial para compreender as complexidades e as interações entre os elementos naturais e antrópicos, proporcionando uma análise mais abrangente e detalhada da paisagem e suas transformações.

O método aplicado neste estudo tem origem na Teoria Geral dos Sistemas (Bertalanffy, 1950), derivada da termodinâmica, introduzida na Geografia mundial por Sothava (1978), que, influenciado pelo uso da teoria nas ciências naturais, define o conceito de Geossistema como "formações naturais" que seguem a dinâmica dos fluxos de matéria e energia, característicos dos sistemas abertos que, juntamente com os aspectos antrópicos, constituem um modelo global de entendimento da paisagem, inserindo, portanto, de maneira equitativa, o ser humano em sua interação com o meio natural e na formação e evolução da paisagem. Esta teoria foi introduzida inicialmente

na Geografia brasileira por Antonio Christofolletti (1974), que analisa a evolução da paisagem até sua configuração atual, considerando os elementos que compõem o sistema e as interações entre eles. Essa abordagem permite compreender como os processos naturais e antrópicos atuaram ao longo do tempo, moldando a paisagem que observamos hoje.

Figura 7. Fluxograma dos procedimentos metodológicos



Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de caracterizar a área de estudos, foram realizados os procedimentos de gabinete como a revisão bibliográfica e a organização da documentação cartográfica, reunindo as informações necessárias para a fundamentação e aprofundamento da pesquisa, que, em conjunto aos trabalhos de campo, serviram para obter os resultados aqui discutidos. Com relação à metodologia, a mesma está separada nas seguintes etapas:

Revisão Bibliográfica: foram consultados diversos documentos como artigos, dissertações, teses e livros a fim de obter a fundamentação sobre o tema, que foram fundamentais para a caracterização da área de estudo, tanto quanto os seus processos atuantes.

Mapeamentos temáticos: foram organizados os mapas de unidades de relevo, hipsometria, geológico, de declividade, uso do solo e os modelos digitais

tridimensionais do relevo. Os mapas foram elaborados com a base SRTM (30m) organizadas no software ArcGIS 10.8, utilizando a metodologia do IBGE (2009).

Mapa de relevo sombreado: O mapa de relevo sombreado foi criado a partir de imagens coletadas pelo projeto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission – 30m), que foram processadas no software ArcGIS 10.8 (ESRI, 2018) com o auxílio da ferramenta Hillshade. Essa técnica utiliza a direção da luz para criar um efeito que nos permite visualizar o terreno de forma mais próxima da realidade, como se estivéssemos observando a área de estudo de cima. As sombras geradas destacam as formas do relevo de maneira precisa, graças ao trabalho do software, que ajusta as melhores posições para criar uma representação fiel e detalhada da topografia.

Mapa de Unidades de Relevo: Para mapear as diferentes formas de relevo utiliza-se uma abordagem manual, combinando imagens geradas a partir do modelo hillshade, modelos tridimensionais e um mapa de índice de rugosidade do terreno. Esses materiais foram criados com base em dados da SRTM (30m) (*Shuttle Radar Topography Mission*). O foco principal foi analisar o terceiro nível (táxon) da classificação de relevo proposta por Ross (1992), seguindo as orientações técnicas do Manual Técnico de Geomorfologia do IBGE (2009).

Para garantir a precisão do mapeamento, foram aplicados os princípios básicos da fotointerpretação, que consistem em analisar imagens para identificar e delimitar as unidades de relevo. Além disso, foi realizado trabalho de campo ao longo da bacia para validar os resultados obtidos.

O mapa de índice de rugosidade foi elaborado com base na metodologia proposta por Sampaio e Augustin (2014). Essa metodologia considera a distribuição e a frequência das declividades (inclinações do terreno) para classificar e mapear as diferentes formas de relevo de maneira supervisionada.

Trabalhos de campo: foram realizados conforme o cronograma previsto no pré-projeto de pesquisa, aos quais foram de grande importância para coletar evidências visuais dos processos evolutivos da paisagem e de seus elementos.

Análise da rede de drenagem e das formas de relevo: Como bases metodológicas principais para a análise da bacia, foi utilizada a abordagem geossistêmica proposta por Christofletti (1974) que considera os elementos componentes do sistema e suas interações na síntese da evolução da paisagem até a configuração atual, uma vez que permite a adoção da bacia hidrográfica como unidade espacial de análise; as orientações de Stevaux & Latrubesse (2017), os níveis

de abordagem geomorfológica elaborados por Ab'Sáber (1969), os níveis taxonômicos do relevo concebidos por Ross (1992), e as contribuições de Botelho & Silva (2004) para a análise ambiental, que juntas também serviram para a análise morfoestrutural da área.

A classificação da Fragilidade Ambiental: A metodologia de Fragilidade Ambiental proposta por Ross (1994) é um modelo de análise empírica que se estrutura em duas etapas fundamentais e sequenciais: a determinação da Fragilidade Ambiental Potencial e, subsequentemente, a da Fragilidade Ambiental Emergente. O processo se baseia na integração de variáveis geoambientais, classificadas e sobrepostas com o auxílio de SIGs.

A etapa de fragilidade potencial refere-se à vulnerabilidade natural de um ambiente, considerando seus componentes físicos como geologia, geomorfologia, pedologia (solos) e pluviosidade. Essa análise busca identificar as áreas com maior ou menor predisposição a processos de degradação, independentemente da ação humana. O objetivo é compreender a sensibilidade intrínseca da paisagem, permitindo a criação de modelos de planejamento que considerem as limitações e potencialidades de cada área.

A fragilidade emergente, por sua vez, incorpora a ação humana a essa análise, avaliando como o uso e a ocupação da terra alteram a fragilidade natural. Ela resulta do cruzamento das informações de fragilidade potencial com os diferentes tipos de cobertura vegetal e atividades antrópicas. Dessa forma, a fragilidade emergente fornece um diagnóstico mais próximo da realidade ambiental, identificando áreas onde a intervenção humana intensificou a degradação e subsidiando a tomada de decisões para a implementação de políticas públicas de conservação e recuperação.

Um dos problemas centrais da utilização deste método é a ponderação das variáveis, que atribui um peso central ao relevo na determinação da fragilidade. Essa supervalorização pode gerar distorções, superestimando a fragilidade de uma área íngreme com rochas resistentes, ou subestimando a de uma área plana com solos muito erodíveis. Além disso, a atribuição de pesos para cada classe de solo ou declividade é descrita como um processo geralmente subjetivo, que depende da experiência do pesquisador, o que pode comprometer a acurácia dos resultados, porém, seguiu-se todas as etapas necessárias para a melhor definição possível da ponderação dos pesos das variáveis, consultando materiais técnicos e referenciais teóricos que desenvolveram trabalhos com esta metodologia.

Com isso, houve a busca ativa para mitigar essa deficiência por meio da validação em campo. Conforme justificado na metodologia, a análise *in loco* foi empregada como um critério fundamental para corroborar e justificar a escolha das classes de fragilidade. Dessa forma, o trabalho de campo não foi apenas uma etapa complementar, mas uma ferramenta de calibragem que conferiu maior robustez e aderência à realidade local ao modelo, buscando superar a rigidez teórica e dar mais valor à proposta de fragilidade ambiental que será gerada como resultado do trabalho desenvolvido

Assim, nesse trabalho, a análise da fragilidade emergente será utilizada como resultado final para integrar o estudo do relevo e a análise ambiental. A escolha por essa abordagem se justifica por ela fornecer um diagnóstico mais completo e realista das condições ambientais da área de estudo. Ao combinar a vulnerabilidade natural do terreno (fragilidade potencial) com os efeitos do uso e ocupação do solo promovidos pela ação humana, a fragilidade emergente permite identificar com maior precisão as zonas críticas e as pressões que efetivamente impactam a paisagem. Dessa forma, a análise integrada do relevo sob a ótica da fragilidade emergente oferecerá um subsídio robusto para o planejamento e a gestão territorial.

A operacionalização do modelo foi realizada por meio de técnicas de geoprocessamento, especificamente a álgebra de mapas, que permite a sobreposição e integração ponderada de diferentes planos de informação. Nesta etapa, foram selecionadas variáveis consideradas essenciais para a dinâmica da bacia: os componentes do meio físico, como o relevo (expresso pela declividade), os tipos de solo (pedologia) e as unidades geológicas (litologia), foram cruzados com a variável representativa da intervenção humana (uso e ocupação do solo), a fim de gerar um mapa síntese da fragilidade ambiental.

O procedimento para a integração das variáveis teve como passo fundamental a hierarquização de suas classes de atributos. Cada classe, seja de declividade, tipo de solo ou uso, foi avaliada conforme seu grau de contribuição para a instabilidade do sistema ambiental. Com base nessa avaliação, atribuíram-se pesos numéricos em uma escala ordinal que varia de 1 (Muito Baixa fragilidade) a 5 (Muito Alta fragilidade). Em consonância com a premissa de Ross (1994), essa ponderação estabelece uma relação inversamente proporcional entre o peso atribuído e a capacidade de suporte do ambiente. Dessa forma, valores mais elevados na escala indicam uma menor

resiliência natural ou uma maior pressão antrópica, resultando em um maior grau de fragilidade.

Uso e ocupação do solo: De acordo com Nascimento e Dominguez (2009), o uso e a ocupação do solo exercem influência sobre o meio ambiente, com a vegetação atuando como uma camada de proteção para a paisagem, logo, essa abordagem é fundamental, pois, como destacam Guerra e Cunha (2001), a remoção da cobertura vegetal para atividades como agricultura ou expansão urbana torna o solo desprotegido contra o impacto direto da chuva e do escoamento superficial. Essa vulnerabilidade intensifica os processos erosivos, o que acaba por degradar não apenas o solo, mas a paisagem de forma integral. Assim, sendo a paisagem, de acordo com Ab'Sáber (2003, p. 7), “[...] uma herança de processos fisiográficos e biológicos e patrimônio coletivo dos povos que historicamente as herdaram como território de atuação de suas comunidades.”, o uso do solo pode demonstrar graus de fragilidade importantes para a síntese final.

Nesse sentido, a classificação dessa variável seguiu os critérios estabelecidos por Ross (1994), que consideram o grau de proteção, seja ele forte ou fraco, que cada tipo de uso da terra pode oferecer, e eles estão dispostos na tabela abaixo:

Tabela 3. Graus de Fragilidade para a variável Uso e Ocupação do Solo

Tipo de uso	Grau de Fragilidade
Formação Florestal; Campo Alagado; Área Pantanosa; Aquicultura; Rio/Lago; Área Urbanizada	1
Pastagem	2
Outras Lavouras Perenes, Silvicultura	3
Cana-de-Açúcar, Soja, Café e Outras Lavouras Temporárias	4
Mosaico de Usos; Áreas Não Vegetadas e Mineração	5

Fonte: Adaptado de Ross (1994), SPÖRL (2007) e Franco et al. (2012)

Pedologia: Dentre as variáveis do substrato físico, o componente pedológico assume papel de destaque, visto que suas características intrínsecas controlam diretamente a erodibilidade, ou seja, a suscetibilidade do solo aos processos de

desagregação, transporte e deposição de partículas, medida que reflete a capacidade do solo de resistir aos processos já mencionados (GUERRA; CUNHA, 2017). Atributos como a textura, a estrutura, a porosidade e a permeabilidade determinam a capacidade de infiltração de água e a coesão das partículas, enquanto a consistência e a profundidade efetiva do perfil pedológico influenciam sua resistência à remoção pela erosão hídrica ou eólica. A análise integrada destes fatores, conforme destacado por estudos como os de Franco et al. (2012) e Calado (2020), justifica a inclusão da pedologia como um indicador indispensável na determinação da fragilidade ambiental.

Considerando cada tipo de solo encontrado na Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, eles foram classificados em razão da sua fragilidade, conforme as características de acordo com os itens citados supracitadamente. Foram atribuídos os seguintes pesos, conforme a tabela que segue.

Tabela 4. Graus de fragilidade para a variável Pedologia

Tipo de Solo	Grau de Fragilidade
Latossolo Vermelho	1
Argissolos Vermelho-Amarelos	3
Gleissolos Háplicos	5

Fonte: Adaptado de SPÖRL (2007) e Franco et al. (2012)

Declividade: A declividade é um dado topográfico essencial na análise do relevo, pois auxilia na identificação de áreas com potencial para processos erosivos, conforme aponta Spörl (2007). Ross (1994) afirma que o grau de inclinação das vertentes é um dos critérios mais importantes para analisar a dinâmica da paisagem, pois os terrenos íngremes, por sua instabilidade inerente e maior suscetibilidade a movimentos de massa e processos erosivos, impõem limitações significativas à ocupação humana. Franco et al. (2012) complementam essa ideia ao afirmarem que a inclinação da vertente pode acelerar tais processos. Com base nisso, os graus de fragilidade foram atribuídos seguindo a metodologia proposta por Ross (1994), e estão dispostos na tabela abaixo.

Tabela 5. Graus de fragilidade para a variável Declividade

Declividade (%)	Grau de Fragilidade
------------------------	----------------------------

3 a 6	1
6 a 12	2
12 a 20	3
20 a 30	4
> 30	5

Fonte: Adaptado de Ross (1994)

Geologia: Segundo Mariano (2021), a geologia se dedica ao estudo da composição, estrutura e componentes minerais do planeta, o que permite a identificação de sua origem e das transformações pelas quais passou ao longo do tempo. Ross (1994) salienta que, para analisar a fragilidade de um ambiente, é fundamental partir da resistência de seu substrato rochoso, então, para a análise em questão, a classificação dos graus de fragilidade geológica (Tabela 6) foi definida a partir das propriedades litológicas de cada formação.

Tabela 6. Graus de fragilidade para a variável Geologia

Geologia	Grau de Fragilidade
Teresina (Siltito Argiloso)	2
Tatuí (Siltito)	2,7
Irati (Calcário, Folhelho)	4,5
Itararé (Arenito, Diamictito, Folhelho, Ritmito)	4,7
Depósitos Aluvionares (Areia, Cascalho)	5

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001)

A pontuação da variável geologia foi fundamentada no estudo de Crepani et al. (2001), por meio da comparação entre as litologias descritas pelos autores e a correspondência mineralógica na área de estudo, utilizando o mapa geológico do CPRM (2006) como referência.

Após a definição dos graus de fragilidade para todas as variáveis (pedologia, uso e ocupação da terra, declividade e geologia), o mapa de fragilidade foi elaborado no software ArcGIS Desktop 10.8. Nesta etapa, os dados vetoriais foram convertidos para o formato matricial (raster), o que permitiu o cruzamento de seus atributos com a aplicação da equação abaixo:

Figura 8. Equação para aplicação da metodologia de Fragilidade Ambiental na Álgebra de Mapas

$$FA = ([P] + [UT] + [D] + [G]) / 4$$

FA: Fragilidade Ambiental;
P: Pedologia;
UT: Uso e ocupação da terra;
D: Declividade;

Adaptado de Ross (1994); Franco et al. (2012).; Souza (2023).

Os graus de fragilidade ambiental foram calculados pela soma dos pesos atribuídos a cada variável. Os valores obtidos nessa somatória foram, então, agrupados em cinco intervalos ou classes de fragilidade, conforme apresentado na tabela abaixo.

Tabela 7. Graus de Fragilidade Ambiental

Grau de Fragilidade	Classes
1 a < 1,5	Muito Baixa
1,5 a < 2,5	Baixa
2,5 a < 3,5	Média
3,5 a < 4,5	Alta
4,5 < 5	Muito Alta

Fonte: ROSS (1994). Adaptado de Franco *et al.* (2012)

6. Resultados e Discussões

O capítulo de resultados e discussões foi elaborado tendo em vista a sua divisão em duas seções principais: a análise geomorfológica e a análise ambiental. Inicialmente são listadas as informações sobre a contextualização dos aspectos físicos regionais no qual a bacia do Rio Tatuí está inserida. Posteriormente,

descreveu-se o relevo da área de estudo, com foco em suas formas, processos e feições predominantes. Buscou-se compreender como esses elementos interagiram ao longo do tempo para moldar a paisagem.

Na segunda parte que ainda será elaborada, será voltada à análise ambiental, explorando-se as interações entre os elementos físicos e bióticos, como a cobertura vegetal, os solos e os recursos hídricos, além de avaliar os impactos decorrentes das atividades humanas, quando presentes.

6.1 Análise Geomorfológica da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí

A Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí está inserida na unidade morfoescultural da Depressão Periférica Paulista (DPP), que foi constituída a partir da borda leste da Bacia Sedimentar do Paraná.

A DPP, de modo geral, “apresenta um relevo predominantemente colinoso e suave esculpido em rochas sedimentares paleozoicas e eomesozoicas, além de morros e serras isolados associados a intrusões de diabásio e falhas” (PINHEIRO et al., 2014, p. 49). De certo modo, o relevo da bacia do Tatuí também apresenta as mesmas características morfológicas que a DPP, assim como sua litologia, que é predominantemente sedimentar e datada do paleozoico.

Ross (1999) define esta unidade como um extenso corredor de terras baixas, resultado de um longo processo de erosão diferencial. Segundo o autor, a DPP representa

“uma área deprimida, elaborada por processos erosivos entre as rochas cristalinas do Planalto Atlântico e as rochas da Bacia Sedimentar do Paraná. Morfológicamente, se apresenta como um relevo de colinas suaves e médias, com vales pouco aprofundados” (ROSS, 1990, p. 59)

De acordo com a classificação de Ross e Moroz (2011), a Bacia do Tatuí está localizada na Depressão do Médio Tietê, uma unidade morfológica subdividida da Depressão Periférica Paulista. Nessa área, o relevo é marcado por processos naturais que transformam a paisagem ao longo do tempo. Segundo Ab’Sáber (1949), o nível de base, que é o ponto mais baixo para onde a água flui, é moldado principalmente pela ação dos rios e córregos locais. Esses cursos d’água, ao escorrerem, esculpem o terreno, desgastando as rochas e sedimentos, dando forma ao relevo. Nesse processo, a deposição de sedimentos perde força, enquanto a erosão e a ação da água passam a dominar, criando uma paisagem dinâmica e em constante transformação – processo denominado circundesnudação.

Introduzido por Ab'Saber (1949) nos estudos de Geomorfologia no Brasil a partir de um termo utilizado por geógrafos franceses, o conceito de circundesnudação descreve o processo de formação de patamares de erosão que se apresentam como áreas deprimidas e periféricas, localizadas nas bordas de bacias sedimentares. A partir dessa ideia, podemos entender como o Rio Tietê, com sua extensa e densa rede de drenagem, interage com as estruturas geológicas e as últimas ações tectônicas do Cenozoico. Esse processo resultou em capturas fluviais realizadas por seus afluentes, moldando um padrão de drenagem que varia entre dendrítico a paralelo, conforme destacado por Penteado (1976), Ross & Moroz (1997) e Villela (2011). Dessa forma, o Tietê e seus afluentes não apenas esculpiram a paisagem, mas também refletem a dinâmica geológica e hidrográfica da região ao longo do tempo.

Como o Rio Tatuí é um dos afluentes do Rio Sorocaba e conseqüentemente, do Rio Tietê, a hidrografia atuou na esculturação e no entalhamento do modelado colinoso da bacia, refletindo o mesmo modelo da Depressão do Médio Tietê. Ainda, como as litologias que embasam a área da bacia são predominantemente sedimentares, a erosão físico-química causada pela água foi incessantemente mais predominante sobre a paisagem, e o estabelecimento das redes de drenagem se fizeram presentes procedendo também as ações de desnudação e circundesnudação decorrentes, revelando ainda mais as características geológicas da área da bacia.

Partindo do primeiro nível de abordagem geomorfológica de Aziz Ab'Sáber (1969), a compartimentação topográfica, que consiste em realizar uma descrição topográfica regional, identificando a geologia dos setores de altimetria diferente e para a distinção de unidades morfológicas, será possível traçar uma discussão integrada acerca dos elementos que constituem seu relevo e a evolução deste conjuntamente aos outros níveis de abordagem propostos por Ab'Sáber agregados à taxonomia do relevo proposta por Jurandyr Ross (1992), a qual integra 6 níveis taxonômicos, do geral ao mais específico, à paisagem.

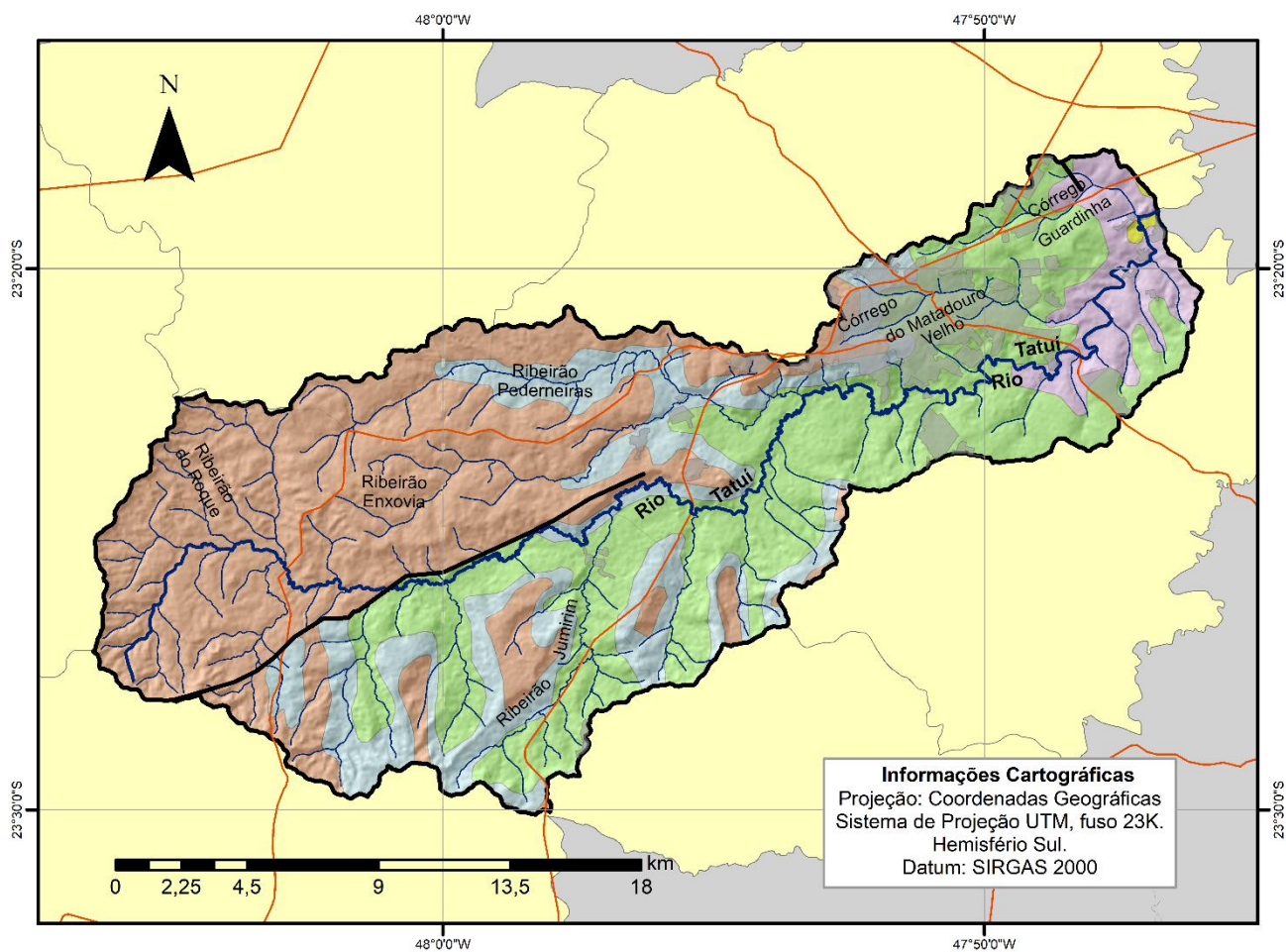
Dessa forma, foi organizado um mapa Geológico da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí a fim de identificar as diferentes unidades geológicas que embasam a sua área. Também foi possível identificar durante a elaboração do mapa, algumas estruturas (falhas) geológicas, que podem influenciar o relevo local e regional a partir de suas movimentações anteriores.

Notou-se que há a presença de uma estrutura geológica ao sudoeste (SSW) na bacia que é alocada em sentido WSW-ENE (oés-sudoeste - lésnordeste),

influenciando no sentido dos lineamentos de drenagem daquele local. A partir da análise das imagens e dos trabalhos de campo, foi possível identificar uma morfologia específica que hipoteticamente foi soerguida anteriormente a partir do movimento desta estrutura em questão. Classifiquei-a como uma pequena escarpa, pois a sua morfologia e altimetria é divergente das formas de relevo em seus arredores.

Também é perceptível que a diversidade de litologias é grande, e certamente foi influenciada pela estrutura geológica descrita anteriormente, pois, ao norte da estrutura, está presente a Formação Teresina, e ao sul, estão presentes as Formações Tatuí, Irati e Teresina. Percebe-se que a falha alterou a litologia da área e influenciou o curso do Rio Tatuí, mudando a sua direção.

Figura 9. Mapa Geológico da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí



Legenda

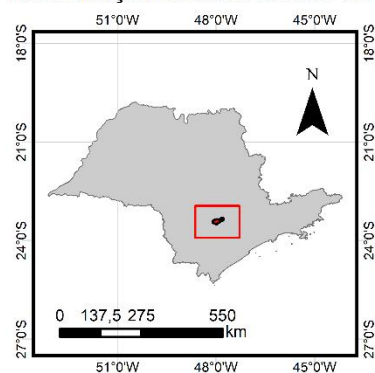
I. Unidades Geológicas

- Depósitos aluvionares
- Irati
- Itararé
- Tatuí
- Teresina

II. Convenções Cartográficas

- Bacia do Rio Tatuí
- Áreas Urbanizadas
- Municípios da Bacia
- Municípios do Estado de São Paulo
- Estruturas Geológicas
- Rio Tatuí
- Hidrografia da Bacia do Rio Tatuí
- Rodovias Estaduais

III. Localização no Estado de São Paulo



Legenda

- Bacia do Rio Tatuí
- Estado de São Paulo

Base de Dados

Limites Municipais e Estadual: IBGE (2022)
 Área Urbana: IBGE (2019)
 Rodovias: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes (2016)
 Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí: Carta Topográfica na escala 1:10.000 (IGC-SP, 1970)
 Hidrografia: Agência Nacional de Águas (2017)
 Geologia: CRPM (2012)

Considerando que todas as litologias que embasam a área de estudo são sedimentares, temos um ambiente pouco movimentado tectonicamente, em que é possível identificar setores de anomalias geomorfológicas facilmente a partir de análises visuais de imagens de satélite, geoprocessamento e trabalhos de campo locais.

A partir do Mapa Geológico da Bacia (figura 10) é possível notar a unidade geológica do Grupo Tubarão nas proximidades da confluência do Rio Tatuí, junto ao Rio Sorocaba. A formação do Grupo Tubarão é a mais antiga dentre as listadas na área da bacia, sendo caracterizada de idade Permocarbonífera (Arab et. Al., 2009).

De maneira geral, com base em análises visuais e referências bibliográficas, é possível observar que a vazão e a capacidade erosiva do Rio Sorocaba são mais intensas do que as de seus afluentes. Isso ocorre porque, ao longo do tempo, o rio se adaptou às unidades geológicas, removendo as camadas mais superficiais e recentes, o que também revela áreas onde se acumularam depósitos aluvionares.

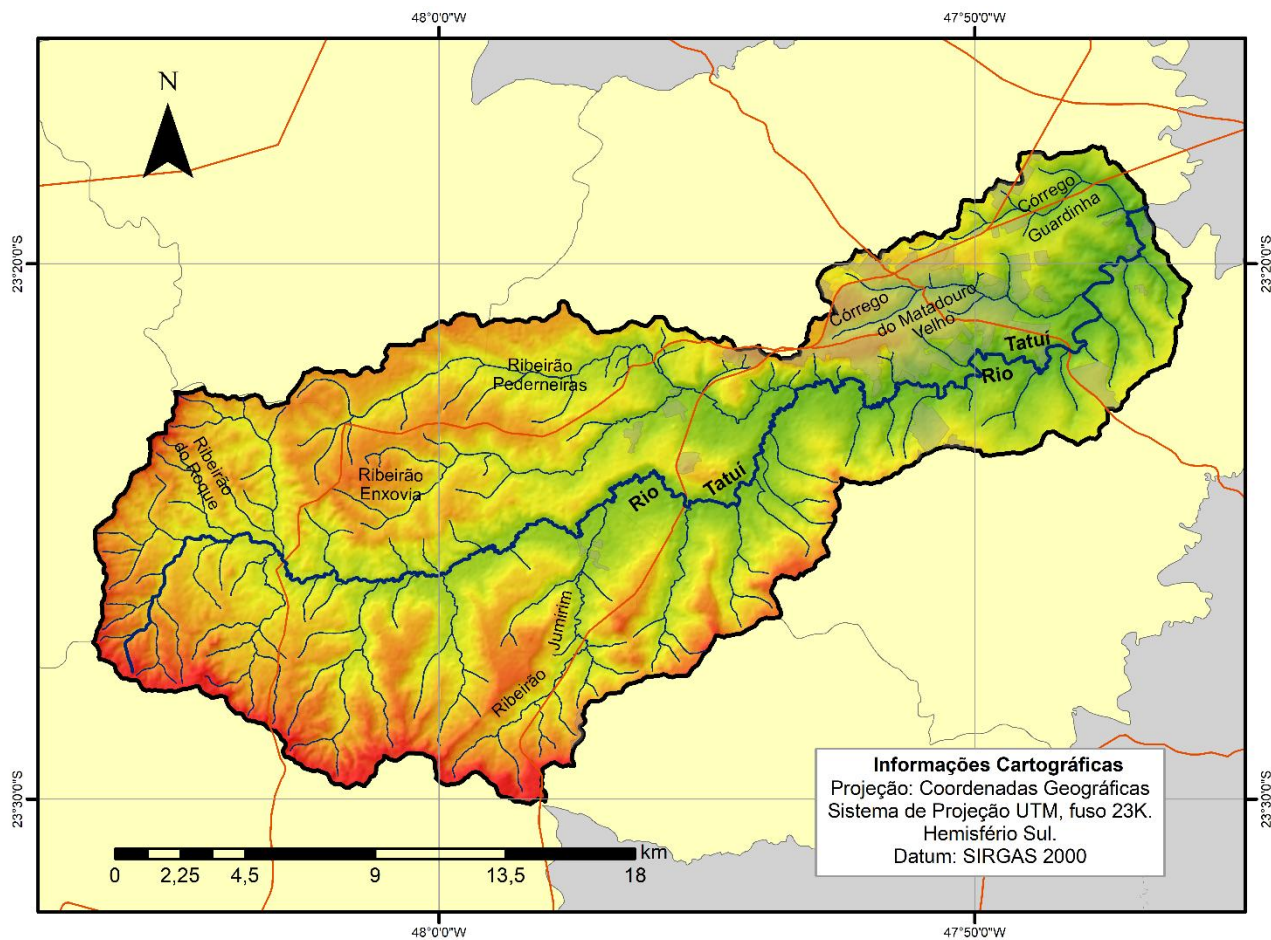
Assim como na área próxima aos aluviões foi identificado um ponto de maior erosão pela vazão do Rio Sorocaba, na porção sul da bacia é possível visualizar o poder erosivo dos afluentes do Rio Tatuí, que se instalaram na paisagem esculpindo as camadas da Formação Teresina até a Formação Tatuí, como uma relação cronológica da força do curso fluvial.

As outras litologias presentes na bacia estão ligadas ao período Permiano (Barboza-Gimenez & Caetano-Chang, 2010; White, 1908; Warren et. al, 2015), mas não é possível estabelecer uma relação clara entre elas com base na cronologia de sua formação, já que não há sobreposições evidentes. Além disso, os afluentes dos principais rios têm vazões reduzidas, o que torna difícil identificar elementos que ajudem a compreender a morfologia da região em grande escala, como a remoção de uma unidade litoestatigráfica específica.

De certa forma, as formações Teresina, Tatuí e Irati são as que mais se destacam na área da bacia, o que explica a predominância de solos argilosos encontrados no município – que dão origem ao grande interesse das indústrias cerâmicas instaladas na região pela retirada de matéria-prima.

Para entender a compartimentação topográfica da área da bacia e integrá-la à análise das unidades geológicas, foi organizado um Mapa Hipsométrico com a finalidade de identificar setores de altimetria diferentes na paisagem, e posteriormente, contribuir para que a divisão das unidades de relevo seja elaborada.

Figura 10. Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí



Legenda

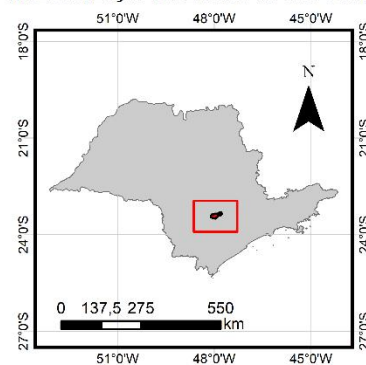
I. Classes Altimétricas



II. Convenções Cartográficas

- Bacia do Rio Tatuí
- Áreas Urbanizadas
- Municípios da Bacia
- Municípios do Estado de São Paulo
- Rio Tatuí
- Hidrografia da Bacia do Rio Tatuí
- Rodovias Estaduais

III. Localização no Estado de São Paulo



Legenda

- Bacia do Rio Tatuí
- Estado de São Paulo

Base de Dados

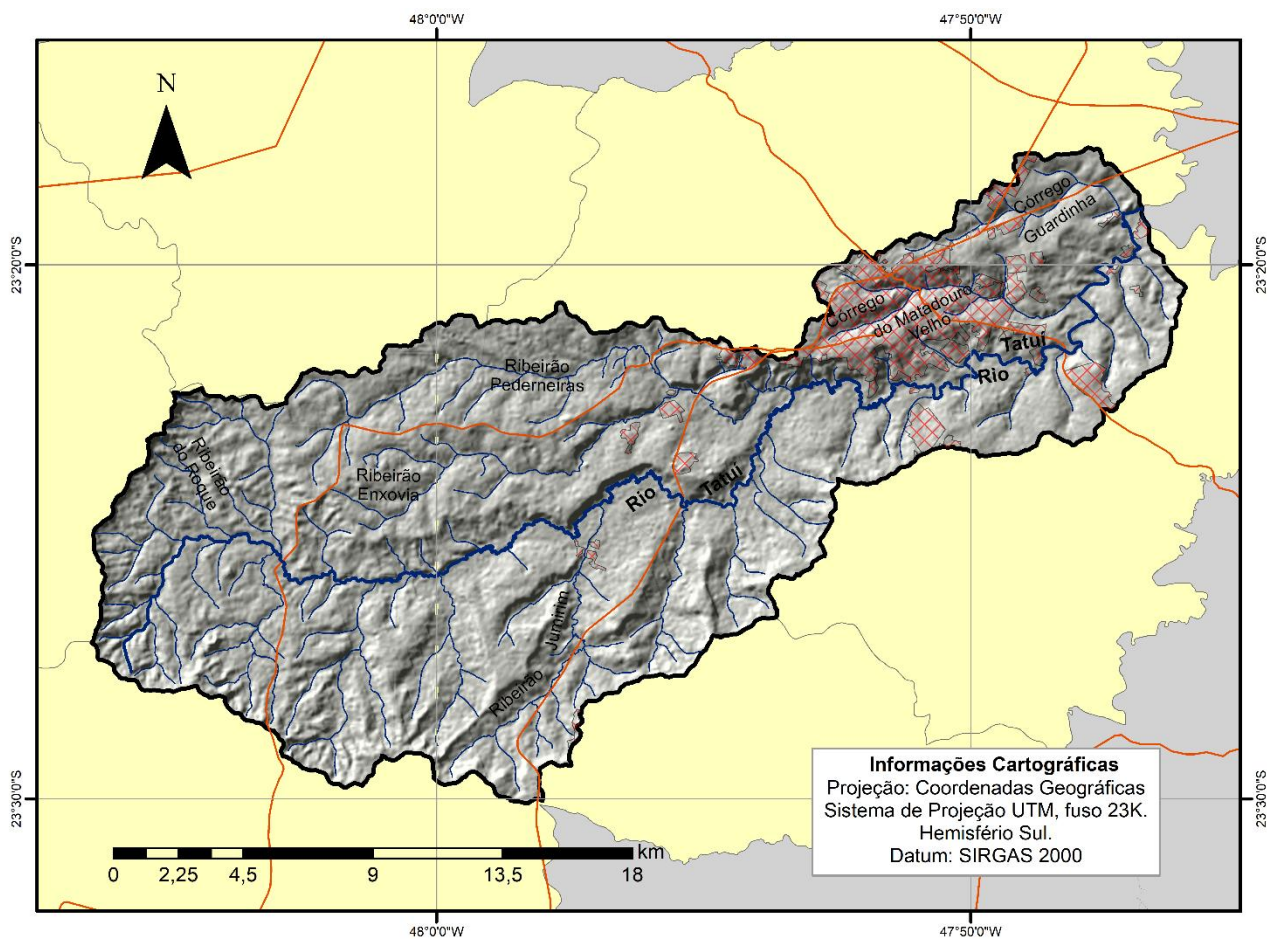
Limites Municipais e Estadual: IBGE (2022)
 Área Urbana: IBGE (2019)
 Rodovias: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes (2016)
 Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí: Carta Topográfica na escala 1:10.000 (IGC-SP, 1970)
 Hidrografia: Agência Nacional de Águas (2017)
 Altimetria: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

O mapa evidencia as diferentes classes altimétricas da bacia do Rio Tatuí, as quais estão divididas em três níveis. O setor de mais alto está situado à porção sul da bacia, nos limites da área da bacia, chegando a atingir 779m de altitude, representado pela cor vermelha. Nos setores oeste e central da área da bacia nota-se as altimetrias intermediárias, com variações de 600m até 650m de altitude. Evidenciando os setores de menor altimetria demarcados pela força e processos erosivos do Rio Tatuí, ao norte estão os maiores vales e planícies aluviais que variam de 518m a 600m de altitude, representados pelas cores de verde.

As áreas mais elevadas da bacia apresentam a cobertura da formação Teresina e Irati, enquanto as mais baixas apresentam as litologias da Formação Tatuí e Itararé nos fundos de vale e na confluência com o Rio Sorocaba, demonstrando uma relação de erosão fluvial de modo cronológico.

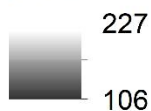
Posteriormente, foi organizado o Mapa de Relevo Sombreado da bacia para o reconhecimento dos padrões de formas de relevo e do modelado de forma geral, podendo demonstrar de modo mais detalhado as rugosidades geomorfológicas visuais do relevo, colaborando para a separação e criação do mapa das unidades de relevo manualmente.

Figura 11. Mapa de Relevo Sombreado da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí



Legenda

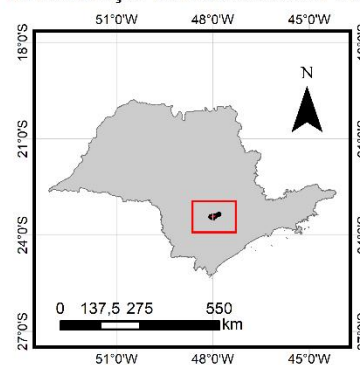
I. Relevo Sombreado



II. Convenções Cartográficas

- Bacia do Rio Tatuí
- Áreas Urbanizadas
- Municípios da Bacia
- Municípios do Estado de São Paulo
- Rio Tatuí
- Hidrografia da Bacia do Rio Tatuí
- Rodovias Estaduais

III. Localização no Estado de São Paulo



Legenda

- Bacia do Rio Tatuí
- Estado de São Paulo

Base de Dados

Limites Municipais e Estadual: IBGE (2022)
 Área Urbana: IBGE (2019)
 Rodovias: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes (2016)
 Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí: Carta Topográfica na escala 1:10.000 (IGC-SP, 1970)
 Hidrografia: Agência Nacional de Águas (2017)
 Altimetria: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

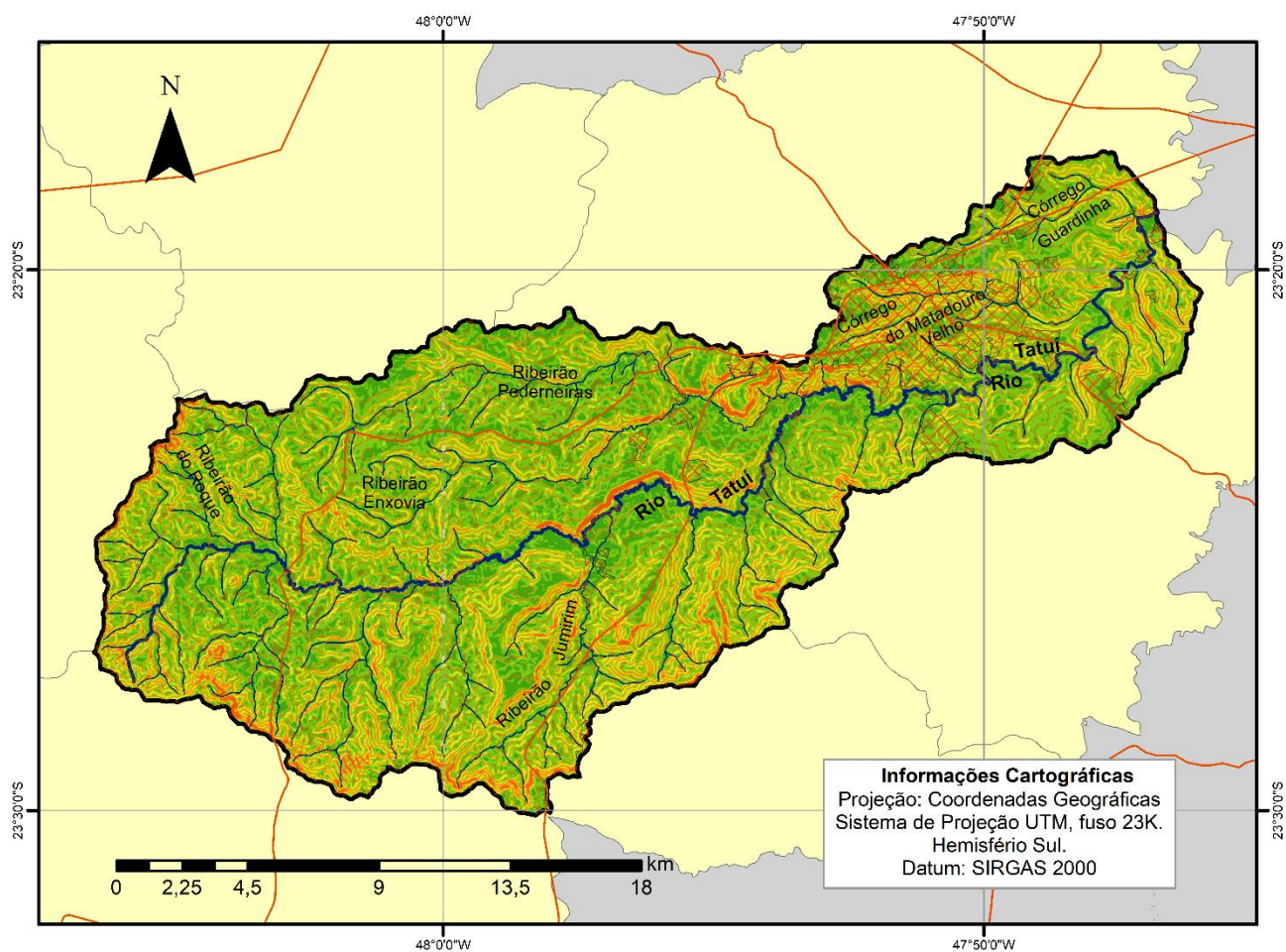
Na figura 8 podemos perceber por meio do sombreamento que o modelado colinoso da bacia se divide em partes visualmente identificáveis, graças às suas rugosidades. É possível notar áreas específicas onde o relevo aparece mais dissecado pela rede de drenagem, o que se reflete em padrões distintos. Esses padrões foram essenciais para a separação das unidades de relevo da bacia, especialmente quando combinados com a sobreposição aos outros mapas gerados por meio das ferramentas disponíveis no SIG utilizado. Essa abordagem nos permite compreender de forma mais clara e detalhada as características do terreno, conectando a análise técnica à percepção visual.

Nota-se que na porção sul da bacia, o padrão de relevo apresenta colinas suavemente mais convexizadas e topos mais definidos do que próximos à confluência do Rio Tatuí. Nesta área, os interflúvios possuem um padrão distinto se comparados ao resto da bacia, considerando ainda que estão próximos à estrutura geológica mencionada anteriormente e possível de identificar a partir do Mapa Geológico da Bacia (figura 6), criando a hipótese de que este padrão foi influenciado pela tectônica. Os interflúvios desta área possuem vertentes predominantemente côncavas, apresentando a característica coletora. É possível notar que os vales são acentuados, demonstrando a influência de maior vazão do curso fluvial, que foi alterado pela falha no sentido SW-NE que elevou a escarpa nesta área.

Na porção mais a oeste da bacia, nota-se que o padrão de relevo é mais dissecado em relação aos demais, apresentando interflúvios suavemente convexizados e menos alongados, com vertentes suavemente convexas. Já na porção norte, os interflúvios também são bem alongados, mas apresentam um padrão menos convexo que na porção sul. Suas vertentes podem ser caracterizadas como convexas. Aparentemente, a litologia da área apresentou maior resistência à vazão do Ribeirão Pederneiras e do Ribeirão Enxovia.

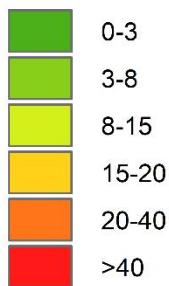
Ao nordeste da bacia, próximo à área urbana do Município de Tatuí, os interflúvios não são bem definidos, possuindo relevo suavemente convexizado. Suas vertentes podem ser caracterizadas como convexas, apresentando grande declividade. Ao sul da área urbana, na porção leste da bacia, existe outro padrão de relevo menos convexizado que os demais. Os interflúvios não são muito alongados, assim como na porção nordeste, mas os vales são bem definidos e as vertentes também podem ser classificadas como convexas.

Figura 12. Mapa de Declividade da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí

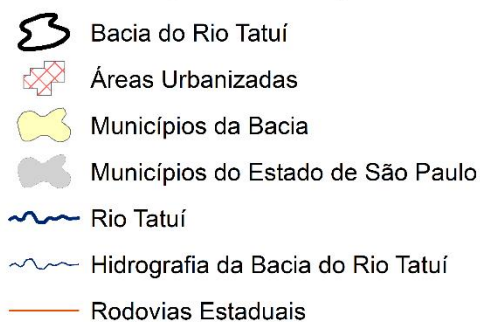


Legenda

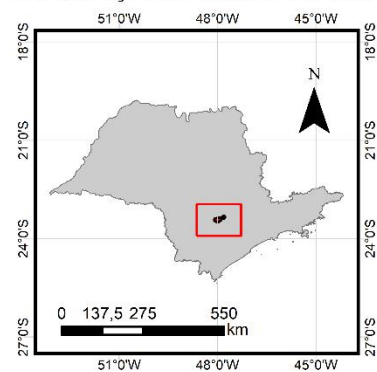
I. Declividade (%)



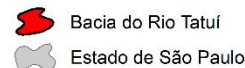
II. Convenções Cartográficas



III. Localização no Estado de São Paulo



Legenda



Base de Dados

Limites Municipais e Estadual: IBGE (2022)

Área Urbana: IBGE (2019)

Rodovias: Departamento Nacional

de Infra-Estrutura e Transportes (2016)

Bacia Hidrográfica do

Rio Tatuí: Carta Topográfica

na escala 1:10.000 (IGC-SP, 1970)

Hidrografia: Agência Nacional de Águas (2017)

Altimetria: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

O Mapa de Declividade evidenciou as diferentes classes percentuais de declividade presentes no modelado, das quais variam de 0% até a níveis superiores a 40%, em vertentes muito declivosas.

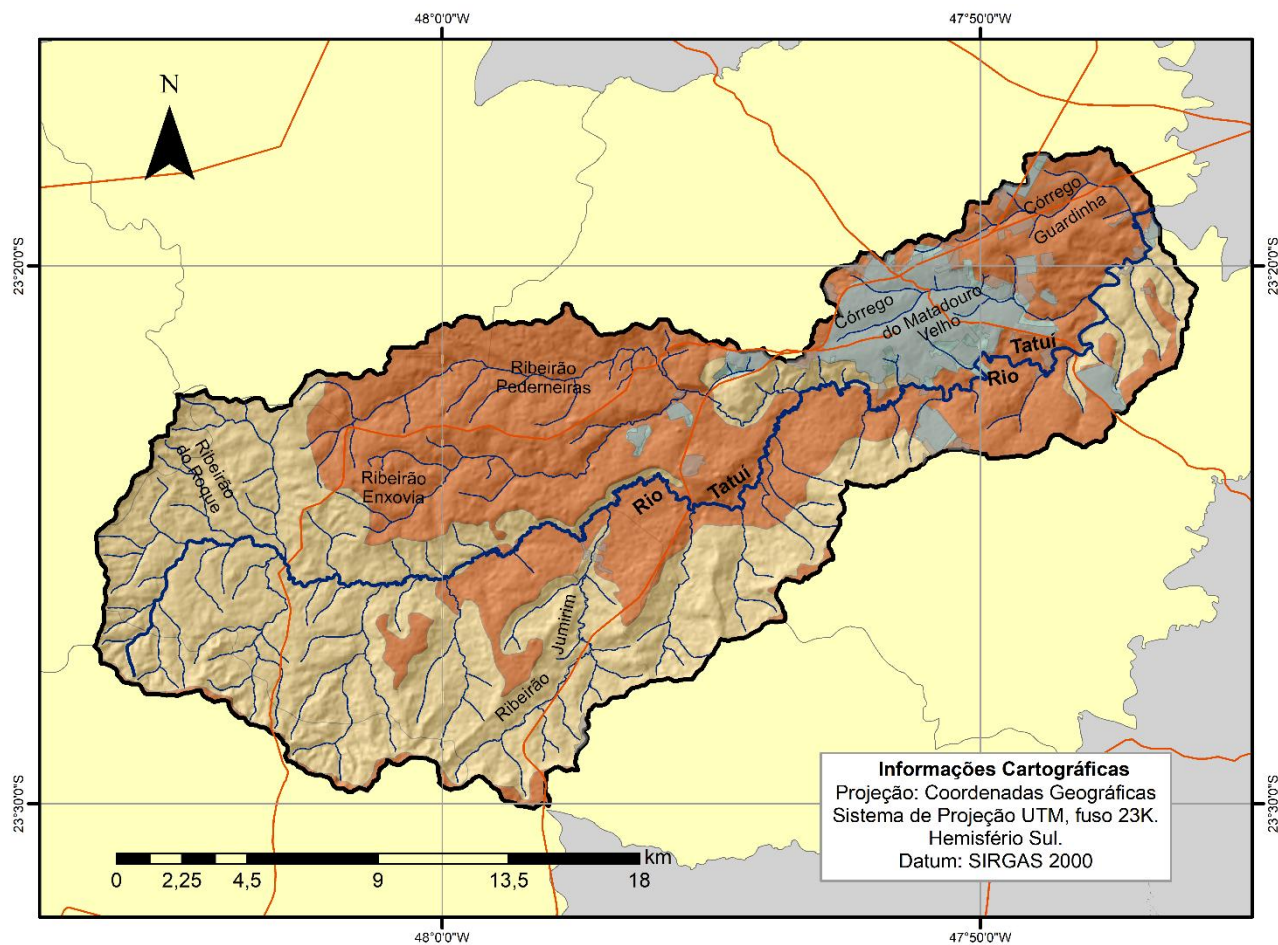
Nota-se que a área urbana do município de Tatuí (SP) foi construída em colinas de topos convexos com vertentes retilíneas e convexas que apresentam taxa de declividade de 12 a 30%, dificultando a mobilidade urbana e trazendo alguns problemas ambientais com a urbanização sem planejamento estratégico para conter futuros problemas ambientais como enchentes e inundações alavancadas pela impermeabilização das vertentes.

De certa forma, é possível observar que a porção sul e a nordeste da bacia apresentam vertentes com declividades mais acentuadas, enquanto na porção norte e oeste, o relevo é mais suave, com pouca inclinação. Percebe-se que a ação da água na esculturação do relevo foi mais intensa nas áreas de maior declive, especialmente pela proximidade de rios mais caudalosos, como o Rio Tatuí e o Rio Sorocaba. Esses cursos fluviais, com sua força erosiva, moldaram o terreno de forma mais expressiva nessas regiões, criando contrastes marcantes no modelado.

Com isso, para entender também a disposição dos tipos de solo que embasam a bacia, elemento importante na esculturação do relevo, foi organizado um mapa pedológico. O mapa abaixo utiliza a escala de 1:100.000 com a base elaborada por ROSSI (2017). A ausência de informações em escalas mais detalhadas dificulta o processo de identificação dos tipos de solos que ocorrem em áreas menores, mas de modo geral, o mapa contemplará os principais tipos de solos ocorrentes na bacia, para que sejam integrados na análise morfológica do relevo, já que a pedogênese e a morfogênese podem ocorrer simultaneamente na esculturação do relevo (QUEIROZ NETO, 2003).

Ao analisar e integrar a pedologia à geomorfologia, os processos vão nos permitir mostrar a participação dos processos superficiais na diferenciação lateral da cobertura pedológica e possibilitar a percepção do papel e a importância dos processos geoquímicos e pedológicos na evolução do relevo (QUEIROZ NETO, 2000)

Figura 13. Mapa Pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí



I. Solos (Rossi, 2017)

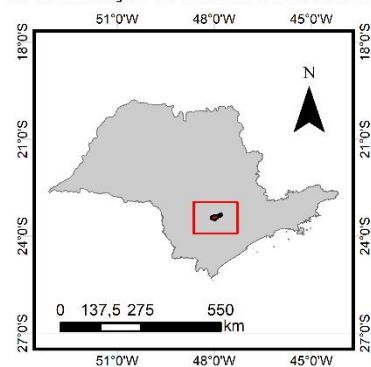
- Argissolos Vermelho-Amarelos
- Gleissolos Hápicos
- Latossolos Vermelhos
- Área urbana

Legenda

II. Convenções Cartográficas

- Bacia do Rio Tatuí
- Áreas Urbanizadas
- Municípios da Bacia
- Municípios do Estado de São Paulo
- Rio Tatuí
- Hidrografia da Bacia do Rio Tatuí
- Rodovias Estaduais

III. Localização no Estado de São Paulo



Legenda

- Bacia do Rio Tatuí
- Estado de São Paulo

Base de Dados

Limites Municipais e Estadual: IBGE (2022)
 Área Urbana: IBGE (2019)
 Rodovias: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes (2016)
 Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí: Carta Topográfica na escala 1:10.000 (IGC-SP, 1970)
 Hidrografia: Agência Nacional de Águas (2017)
 Pedologia: ROSSI (2017)

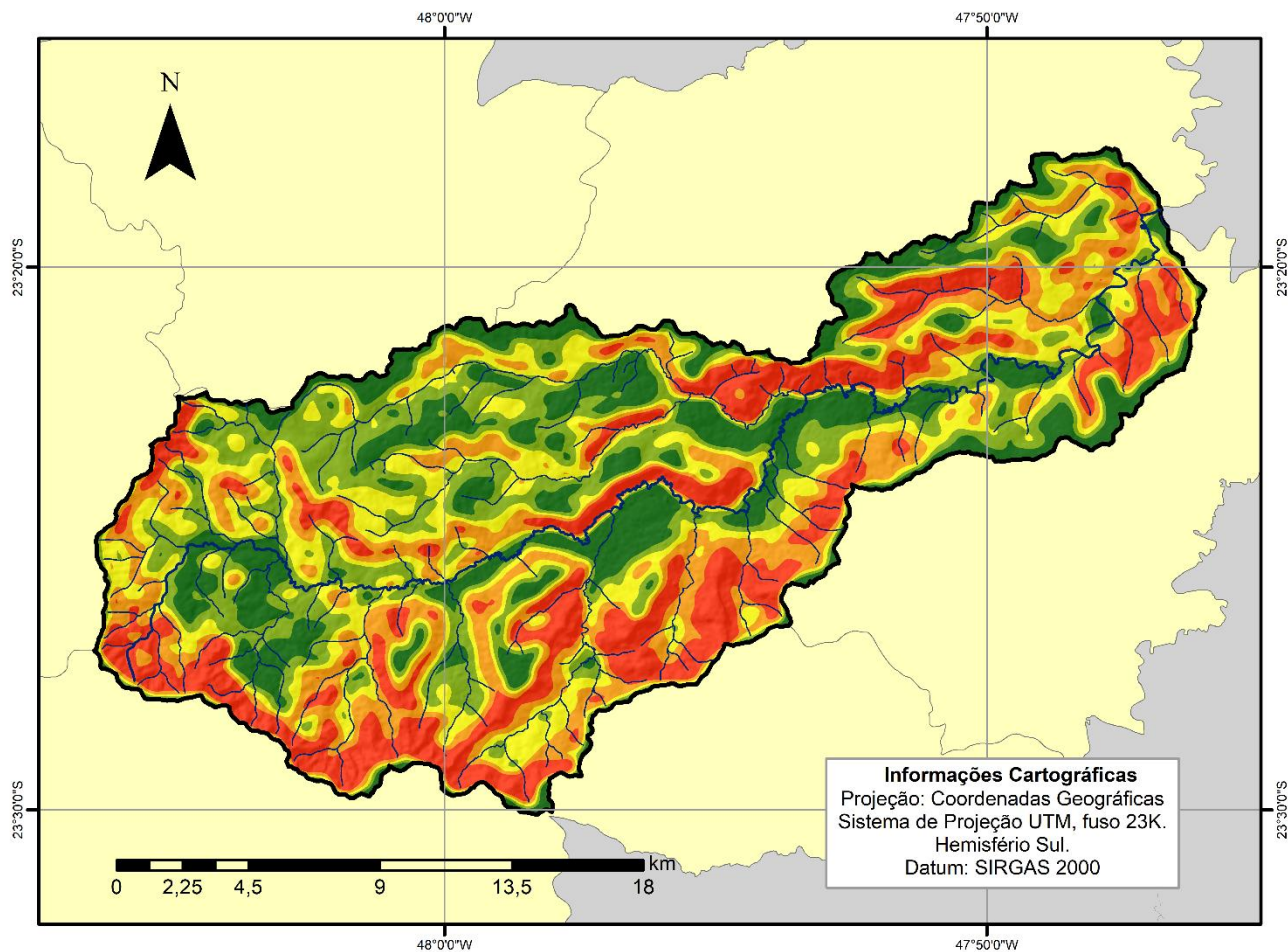
Após a produção dos mapas e das análises do relevo, foi possível identificar setores com características altimétricas e morfológicas distintas dentro do recorte da bacia.

Dessa forma, foram avaliadas diferentes propostas para dividir e classificar o relevo da Bacia do Rio Tatuí. Para isso, foi decidido combinar métodos tradicionais de mapeamento, como a identificação visual, com técnicas mais modernas através dos softwares de geoprocessamento. A divisão das unidades de relevo foi feita observando as diferenças nos padrões do terreno, utilizando um mapa de relevo sombreado (*hillshade*), que ajuda a visualizar as formas do relevo, e um mapa de índice de rugosidade, que foi criado com base em dados de declividade (inclinação do terreno).

Para facilitar a organização e o entendimento dessas diferenças, elaboramos um mapa que divide a área em unidades de relevo. Depois de identificar essas unidades por meio do mapeamento, realizamos trabalhos de campo para verificar e confirmar se as divisões propostas estavam corretas.

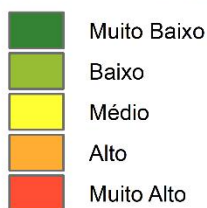
Posteriormente, essas unidades de relevo serão discutidas de forma breve, juntamente com a caracterização de cada uma de suas compartimentações e formas. Seguindo a proposta de Ab'Sáber (1969), busca-se a descrição do relevo, complementada pelos níveis taxonômicos de J. Ross (1992).

Figura 14. Mapa de Índice de Concentração de Rugosidade do Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí

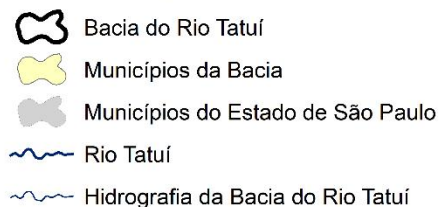


Legenda

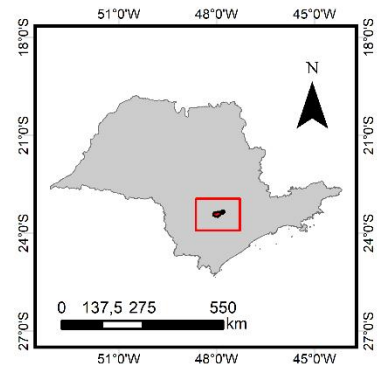
I. Índice de Concentração de Rugosidade



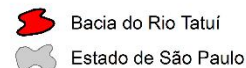
II. Convenções Cartográficas



III. Localização no Estado de São Paulo



Legenda



Base de Dados

Limites Municipais e Estadual: IBGE (2022)
 Bacia Hidrográfica do
 Rio Tatuí: Carta Topográfica
 na escala 1:10.000 (IGC-SP, 1970)
 Altimetria: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

Conforme abordado anteriormente no capítulo de procedimentos metodológicos desta pesquisa de mestrado, o mapa de unidades de relevo integra aspectos visuais delineados a partir dos mapeamentos realizados, do índice de concentração de rugosidade e ainda dos trabalhos de campo realizados ao longo da bacia.

O mapa de índice de concentração de rugosidade foi elaborado com 5(cinco) classes, das quais estão de acordo com a proposta de Sampaio e Augustin (2014), utilizando-se do índice local que se mostrou mais adequado para a área em comparação ao índice global, que resultou em um detalhamento mais generalizado no recorte da bacia.

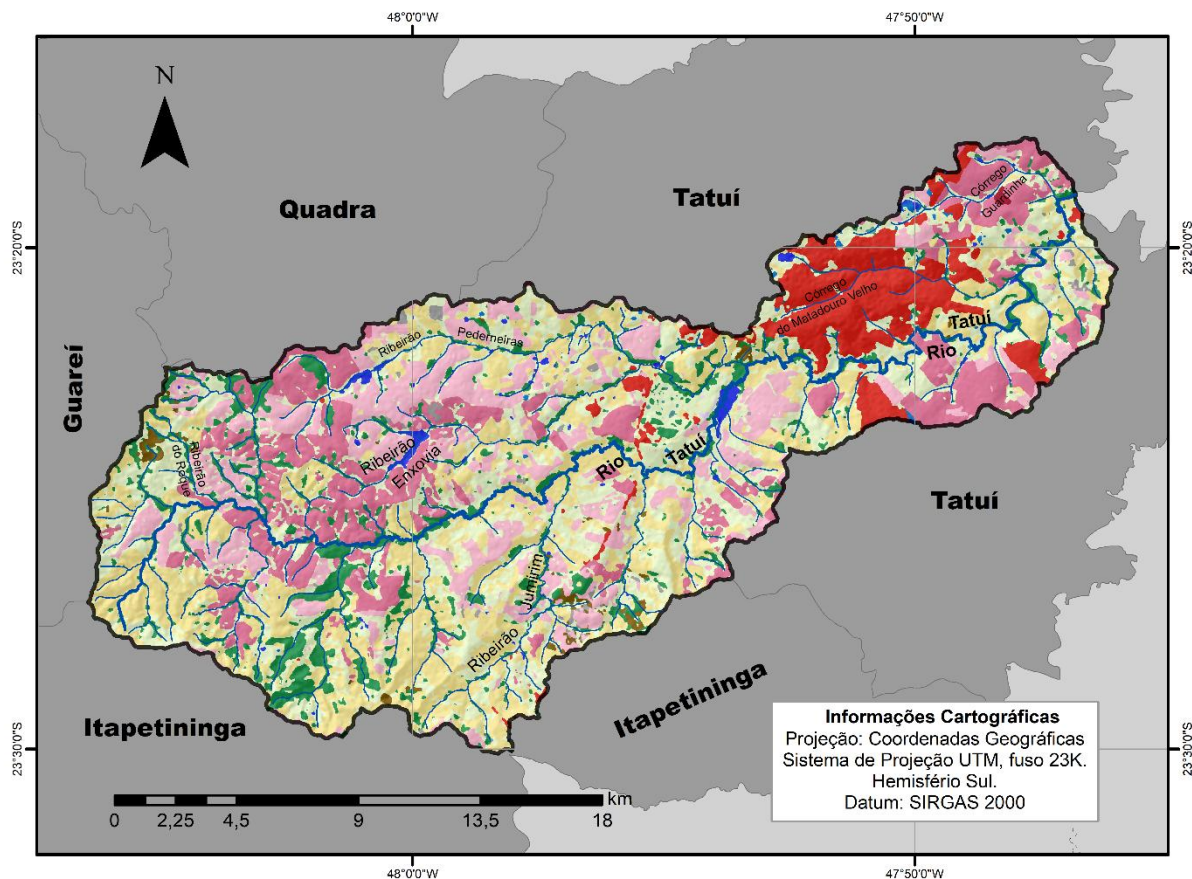
Os valores mais elevados de ICR (muito alto) são encontrados na porção sul da bacia, relacionados à formação Teresina e Irati, enquanto os valores mais baixos (muito baixo) estão relacionados principalmente aos vales e baixas encostas, com média espacialização ao longo do curso do Rio Tatuí e em colinas de topos planos, sendo relacionados à formação Tatuí. Os valores médios de ICR se caracterizam como uma faixa de transição entre os índices alto e baixo.

Outra produção importante para este trabalho é a análise do uso e cobertura da terra, que é uma ferramenta indispensável para a compreensão da dinâmica ambiental de uma bacia hidrográfica, pois revela a complexa inter-relação entre as atividades humanas e o meio físico. As formas de relevo, com suas variações de declividade, orientação de vertentes e tipos de solo, atuam como um fator condicionante primário, influenciando diretamente as potencialidades e limitações para a ocupação do solo, seja para agricultura, urbanização ou preservação. Em contrapartida, uma vez estabelecido, o uso da terra torna-se um poderoso agente geomorfológico, capaz de alterar taxas de infiltração de água, acelerar processos erosivos e de assoreamento, e redefinir a própria dinâmica das vertentes e da rede fluvial.

Nesse sentido, a elaboração de um mapa de uso e cobertura da terra para a Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí é um passo metodológico fundamental nesta dissertação. Este serve como um instrumento de diagnóstico para correlacionar as diferentes classes de uso com as unidades geomorfológicas que serão posteriormente identificadas. O objetivo é compreender como o relevo influenciou o padrão de ocupação atual e, principalmente, investigar como as atividades antrópicas estão interagindo com a vulnerabilidade e o potencial de cada compartimento da paisagem,

forneendo subsídios essenciais para a análise da dinâmica geomorfológica contemporânea.

Figura 15. Mapa de Uso do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí



Legenda

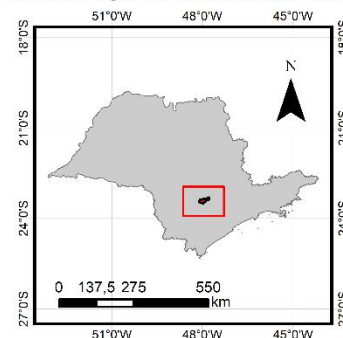
I. Convenções Cartográficas

- Rio Tatuí
- Hidrografia da Bacia do Rio Tatuí
- Bacia do Rio Tatuí
- Municípios da Bacia
- Municípios do Estado de São Paulo

II. Uso e ocupação do solo

- Aquicultura
- Café
- Campo Alagado e Área Pantanosa
- Cana-de-Açúcar
- Formação Florestal
- Mineração
- Mosaico de Usos
- Outras Lavouras Perenes
- Outras Lavouras Temporárias
- Outras Áreas Não Vegetadas
- Pastagem
- Rio/Lago
- Silvicultura
- Soja
- Área Urbanizada

III. Localização no Estado de São Paulo



Legenda

- Bacia do Rio Tatuí
- Estado de São Paulo

Base de Dados

Limites Municipais e Estadual: IBGE (2022)
 Área Urbana: IBGE (2019)
 Uso do solo: MAPBIOMAS (2023)
 Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí: Carta Topográfica na escala 1:10.000 (IGC-SP, 1970)
 Hidrografia: Agência Nacional de Águas (2017)



Com a análise do mapa de uso do solo (figura 16), é possível observar que a cobertura do uso do solo da bacia é bem diversificada, mas há uma predominância de pastagens em sua extensão. De modo geral, a bacia não é totalmente urbanizada, pois é observada a presença de outras atividades ao longo de seu recorte, mas podemos afirmar que ela é intensamente modificada pelas atividades antrópicas, com predomínio de usos ligados ao setor agropecuário.

A cobertura de pastagem, caracterizada por gramíneas, distribui-se de forma ampla pela bacia, ocupando desde os interflúvios de topografia suave até vertentes com declividades mais acentuadas, o que pode torna-la um fator central na dinâmica de infiltração da água e nos processos erosivos superficiais.

As atividades agrícolas, por sua vez, demonstram a relevância da bacia na produção de *commodities*, como por exemplo, a Cana-de-Açúcar, que ocupa extensas áreas contínuas, concentradas principalmente nos terrenos de relevo mais plano a suavemente ondulado, onde a mecanização é favorecida. Em paralelo, a Soja e outras Lavouras Temporárias e Perenes compõem o cenário agrícola muitas vezes em rotação de culturas ou em porções mais restritas da bacia.

Outra classe em destaque no mapa é a de Mosaico de Usos, que representa áreas de alta fragmentação onde diferentes cultivos, pastagens e pequenas edificações se unem. Essa classe é frequentemente associada à agricultura familiar e à transição entre o espaço rural e o urbano, refletindo uma dinâmica de ocupação da terra mais diversificada.

Os remanescentes de vegetação nativa, classificados como Formação Florestal, encontram-se altamente fragmentados e, em grande parte, restritos às margens da rede de drenagem do Rio Tatuí, funcionando como matas ciliares, ou em porções de relevo mais íngreme, onde o aproveitamento econômico é dificultado. Essa distribuição evidencia a pressão histórica do desmatamento e destaca a importância desses fragmentos para a manutenção da estabilidade das margens dos rios e para a conservação da biodiversidade.

A área urbanizada concentra-se na porção leste da bacia, correspondendo à mancha urbana do município de Tatuí, e é caracterizada pela alta impermeabilização do solo, o que intensifica o escoamento superficial e impacta diretamente o regime fluvial (STEVANUX & LATRUBESSE, 2017).

Pontualmente, foram notados também os polígonos de Mineração, proveniente das atividades das cerâmicas, comumente instaladas nesta região pela atratividade dos solos argilosos, propícios para a produção de tijolos e telhas, atraindo interesse econômico. Essa atividade promove alterações topográficas severas, além de danificar ambientalmente as áreas da bacia, por se tratar de uma extração de recurso natural não renovável.

De acordo com Balistieri e Aumond (1997), as argilas apresentam notável polivalência, constituindo a matéria-prima fundamental para diversos segmentos da indústria cerâmica. Na construção civil, são amplamente empregadas na produção de cerâmica vermelha, que abrange desde componentes estruturais (tijolos e telhas) até revestimentos (pisos e lajotas esmaltadas). Além das aplicações tradicionais, que incluem também a cerâmica branca para louças e azulejos e a cerâmica artesanal, as argilas são essenciais na formulação de cerâmicas técnicas de alto desempenho, como filtros siderúrgicos e ferramentas de corte de elevada dureza.

Nesse contexto, a mineração a céu aberto na bacia representa uma fonte de significativo impacto ambiental, cujas operações alteram drasticamente o relevo por meio da criação de cavas e da deposição de grande volume de rejeitos. Conforme aponta Ross (2008, p. 231), este material, quando exposto aos agentes intempéricos, é frequentemente carregado para a drenagem local, resultando na degradação e no comprometimento dos corpos hídricos próximos.

Outra classe identificada foram as áreas de Campo Alagado e Área Pantanosa, que, por sua vez, estão associadas às planícies fluviais do Rio Tatuí e seus principais afluentes, representando ambientes naturais de alta importância para a regulação hídrica e que sofrem pressão direta do avanço das atividades no entorno.

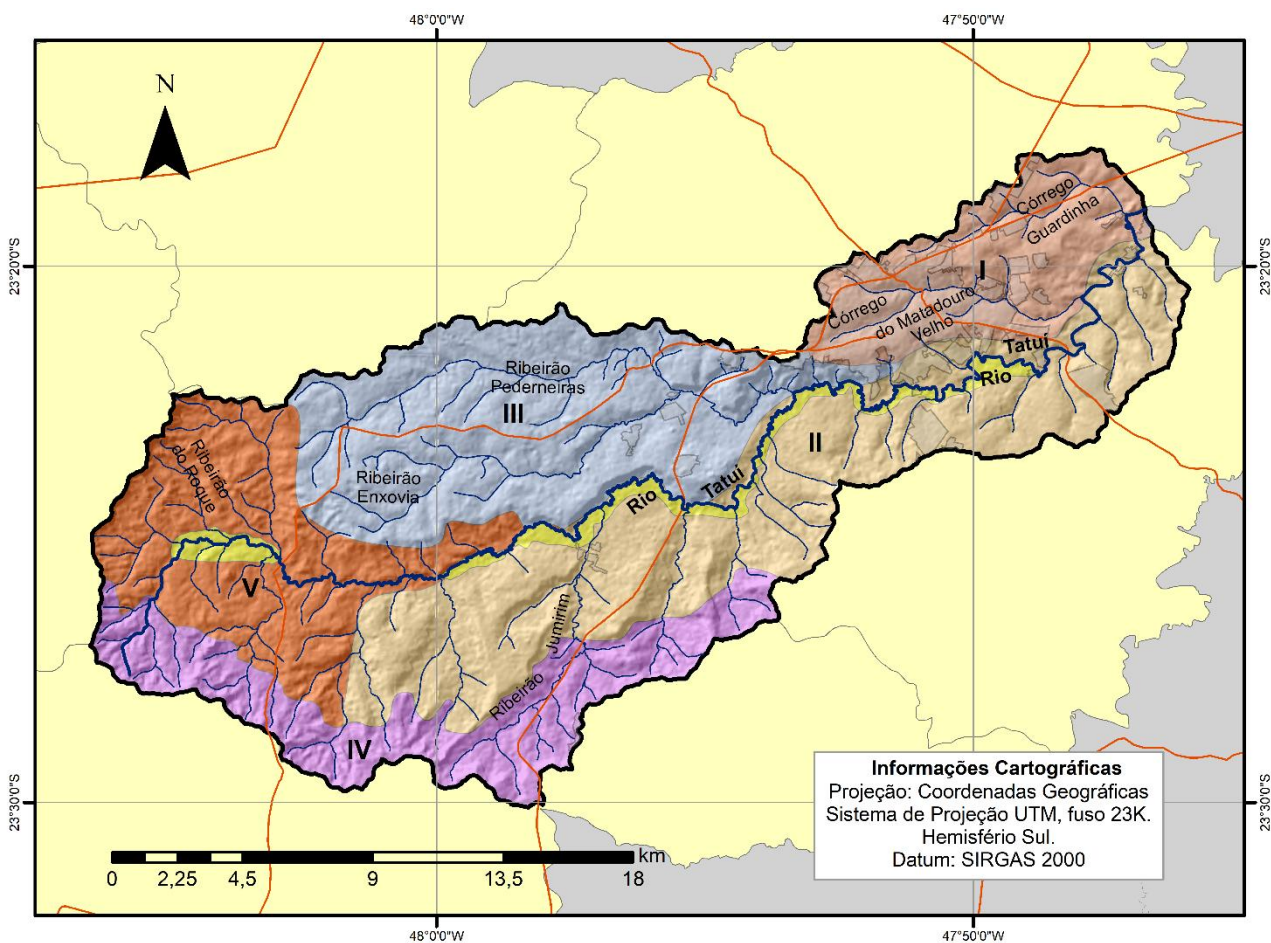
Diante do exposto, a análise integrada das classes de uso e ocupação do solo evidencia um cenário de antropização na Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, no qual a organização espacial das atividades humanas é ditada pela compartimentação geomorfológica. Observa-se um claro padrão onde as atividades de maior expressão econômica dominam as superfícies de menor declividade, ao passo que os sistemas ambientais mais sensíveis, como as matas ciliares e os campos alagados, funcionam como refúgios para a biodiversidade.

Para dar andamento e integrar todos os elementos aqui anteriormente citados, com base na análise de parâmetros morfométricos, como hipsometria, declividade, índice de concentração de rugosidade, complementados por observações in loco

durante trabalhos de campo, foi possível identificar e classificar padrões geomorfológicos em unidades distintas. Como resultado, foram estabelecidas cinco compartimentações, as quais foram espacialmente organizadas e representadas no mapa de unidades apresentado na figura 17.

A delimitação dessas unidades de relevo fundamentou-se em critérios específicos preconizados pelo Manual Técnico de Geomorfologia do IBGE (2009), considerando feições como colinas suaves, escarpas associadas a falhas, fundos de vales, topos e rupturas topográficas, estas últimas evidenciadas pela transição nos índices de rugosidade e hipsometria.

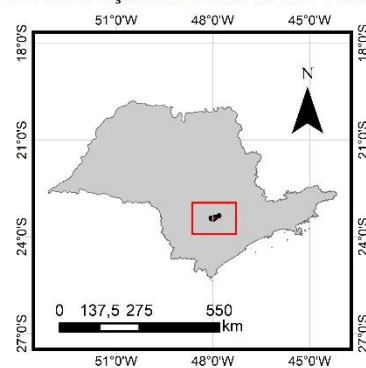
Figura 16. Mapa de Unidades de Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí



Legenda

- | | |
|------------------------------|-------------------------------------|
| I. Unidades de Relevo | II. Convenções Cartográficas |
| Planícies | Bacia do Rio Tatuí |
| Unidade I | Municípios da Bacia |
| Unidade II | Áreas Urbanizadas |
| Unidade III | Municípios do Estado de São Paulo |
| Unidade IV | Rio Tatuí |
| Unidade V | Hidrografia da Bacia do Rio Tatuí |
| | Rodovias Estaduais |

III. Localização no Estado de São Paulo



Legenda

- Bacia do Rio Tatuí
- Estado de São Paulo

Base de Dados

Limites Municipais e Estadual: IBGE (2022)
 Área Urbana: IBGE (2019)
 Rodovias: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes (2016)
 Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí: Carta Topográfica na escala 1:10.000 (IGC-SP, 1970)
 Hidrografia: Agência Nacional de Águas (2017)
 Altimetria: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)



A partir da integração dos mapas anteriores, a organização do mapa acima (figura 17) foi elaborada tendo em vista que foi possível identificar na área da bacia 5 unidades de relevo que possuem altimetrias e formas diversificadas em suas características. O modelado colinoso se estende por toda a bacia, mas em sua área (conforme identificado por meio do mapeamento da área e através de sua confirmação pelo trabalho de campo) apresenta unidades morfológicas com características diferentes, as quais serão descritas abaixo.

Localizada predominantemente na porção jusante da bacia, esta unidade é caracterizada por interflúvios alongados e de topos suavemente convexizados, com vertentes predominantemente retilíneas e bases côncavas que abrigam vales simétricos e abertos.

A suavidade geral do relevo e a baixa dissecação são uma resposta direta à litologia da Formação Tatuí (figura 19), composta por siltitos e argilitos menos resistentes, e ao longo processo de circundesnudação que aplainou a região, de acordo com Ab'Sáber (1969).

Figura 17. Forma de interflúvio alongado suavemente convexizado, pouco extenso e de vertentes retilíneas com bases côncavo-retilíneas. (23°18'57.62"S, 47°49'41.93"O)



Autor: MACHADO JUNIOR, C. Fevereiro, 2025.

Figura 18. Perfil topográfico de um setor da Unidade I.



Org.: MACHADO JUNIOR, C. Fonte: Google Earth Pro. CNES/Airbus (2025)

Por se caracterizarem como unidades suavemente planas, as atividades agropecuárias estão presentes por toda sua porção norte, principalmente as áreas de cultivo de cana-de-açúcar e pastagens, como analisado na figura 15. Nesta unidade

também estão presentes áreas industriais, próximas às rodovias que dão acesso à área urbana do município de Tatuí.

Em trabalho de campo também foi possível observar a presença dos latossolos vermelhos e da estrutura da unidade que pertence predominantemente à formação Tatuí.

Figura 19. Recorte do perfil da Formação Tatuí. (23°18'56.24"S, 47°48'41.01"O)



Autor: MACHADO JUNIOR, C. Fevereiro/2025

Na imagem acima, verificam-se os siltitos e argilitos da formação Tatuí, os quais dão origem à coloração dos latossolos vermelhos presentes na unidade de relevo I.

Outra característica marcante desta unidade é a área urbana do Município de Tatuí, próxima ao Córrego do Matadouro Velho e do Córrego Gardinha. As construções urbanas situam-se nos interflúvios suavemente convexizados e em suas vertentes retilíneas, que em grande parte é impermeabilizada pelo asfalto e pelo concreto, como já mencionado anteriormente, ocasionando processos erosivos mais frequentes nas planícies fluviais.

Já na unidade II, situada a oeste, é possível observar o modelado colinoso com menor dissecação que na unidade I. Esta unidade se destaca pelos interflúvios muito

extensos e topos notavelmente aplainados, com baixa amplitude de relevo e vales mais amplos. Essas feições podem ser interpretadas como remanescentes de superfícies de aplainamento mais antigas, que estão sendo progressivamente consumidas pela incisão da rede de drenagem. Essa morfologia lembra as teorias da evolução da paisagem em áreas tropicais, como as propostas por King (1956) sobre pediplanação e Bigarella, Mousinho e da Silva (2016) sobre a formação de superfícies aplainadas e seus depósitos correlativos no Brasil.

Quanto à sua estrutura, ela também pertence predominantemente à Formação Tatuí, com algumas áreas relativas ao Grupo Itararé. Seu embasamento proveniente do período permiano e de estruturas horizontais permite que o modelado colinoso de topo suavemente convexizado se estenda também para esta área.

Figura 20. Forma de interflúvio alongado de topo suavemente convexizado, muito extenso e de vertentes retilíneas com bases convexas.



Autor: MACHADO JUNIOR, C. Fevereiro/2025.

Figura 21. Perfil Topográfico de um setor da Unidade II.



Org.: MACHADO JUNIOR, C. Fonte: Google Earth Pro. CNES/Airbus (2025)

As morfologias presentes na Unidade II são caracterizadas como interflúvios com baixa dissecação. O relevo suave e ondulado apresenta amplitude baixa e topos amplos e aplainados, com declividades suaves que variam de 0 a 20% (baixa). Sua altimetria varia de 500 a 600m. Suas bases são suavemente convexas, combinando com a vertente convexizada de pouca amplitude com patamar. Como em sua maior parte estão predominando os rios intermitentes, a intensidade da dissecação das colinas não é muito demarcada, já que as áreas que apresentam maior declividade estão relacionadas às vertentes dissecadas pelo Rio Tatuí.

Na Unidade III já foi possível observar um modelado colinoso divergente das duas primeiras unidades. Nesta unidade, os interflúvios são mais extensos e alongados que nas duas primeiras unidades. A declividade das colinas variam de 0 a >40% (médio) e sua altimetria varia de 518 a 670m. Há a presença de uma escarpa no início da porção sul desta unidade com lineamento em sentido Oés-sudoeste (WSW) para Lés-nordeste (ENE) que está associada a estrutura geológica no mesmo sentido, logo, caracteriza-se como uma escarpa adaptada à falha.

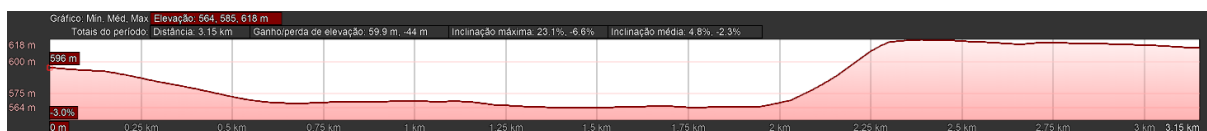
As escarpas adaptadas à falha são resultantes da erosão remontante, um processo erosivo em que a água, ao longo do tempo, desgasta o terreno, retrocedendo gradualmente em direção à nascente de um rio ou curso'dágua, acompanhando paralelamente uma zona de falha, ocorrendo em zonas de falhamentos verticais e/ou transcorrentes em morfoestruturas constituídas por rochas rígidas (IBGE, 2009)

Figura 22. Escarpa adaptada a falha e formas de colina de topos suavemente convexizados. (23°23'58.66"S, 47°55'55.94"O)



Autor: MACHADO JUNIOR, C. Fevereiro/2025.

Figura 23. Perfil topográfico de um setor da Unidade III com forma de escarpa.

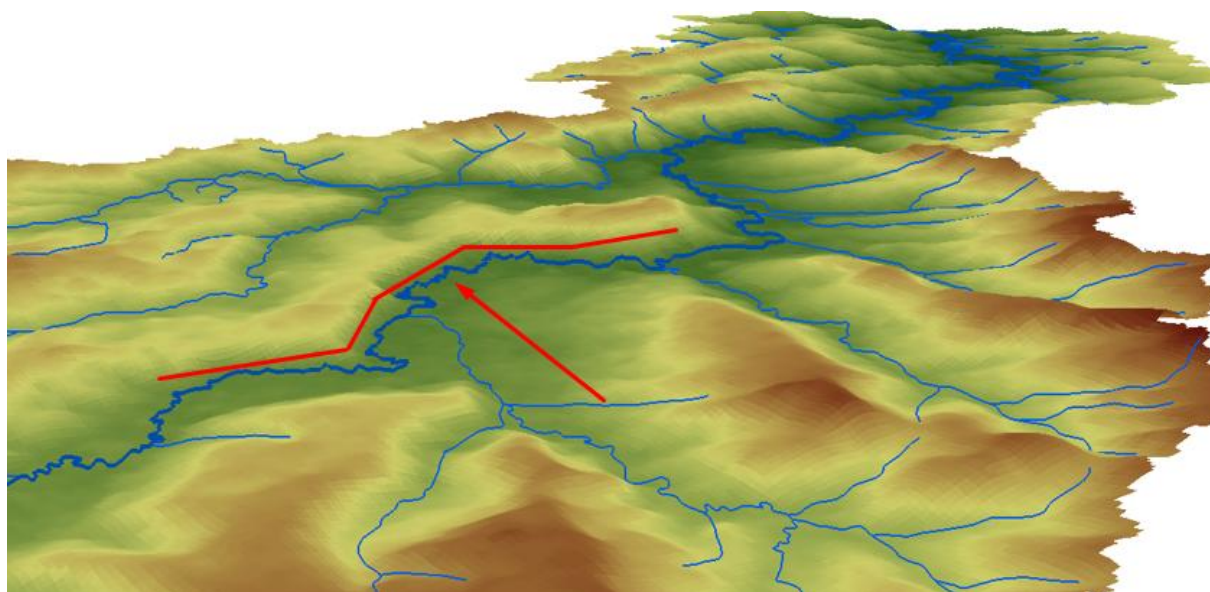


Org.: MACHADO JUNIOR, C. Fonte: Google Earth Pro. CNES/Airbus (2025).

A escarpa adaptada à falha (figura 22) representa uma ruptura topográfica abrupta, com declividades acentuadas, sustentada pela Formação Teresina. Sua gênese é um exemplo clássico da erosão diferencial sob forte controle tectônico.

A Formação Teresina, composta predominantemente por arenitos e siltitos (SCHNEIDER et al., 1974), apresenta maior resistência à erosão em comparação com as litologias das formações subjacentes, como os folhelhos e siltitos da Formação Irati e os arenitos finos da Formação Tatuí. Essa diferença litológica é um fator determinante para a formação da escarpa, uma vez que as rochas menos resistentes são erodidas mais rapidamente, criando patamares ou degraus topográficos. A erosão remontante, que atua a partir da base da escarpa, promove o recuo progressivo das camadas menos resistentes, expondo as rochas mais duras da Formação Teresina e acentuando a declividade da escarpa.

Figura 24. Modelo Digital de Terreno (MDT) da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí com destaque para a escarpa em sentido WSW-ENE.



Fonte: Organizado pelo autor.

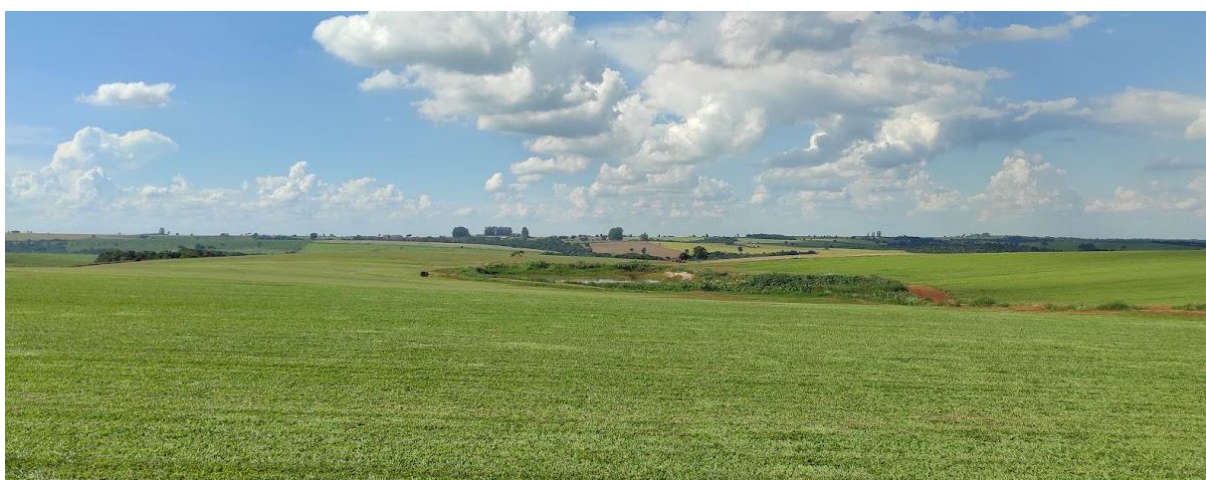
Nos níveis inferiores, o Rio Tatuí se inseriu e ajustou-se à escarpa, entalhando o vale em “V” e esculpindo as formas colinosas adjacentes. Nota-se também que a partir da ocorrência da estrutura geológica, o rio muda seu sentido para Lés-Nordeste, seguindo para a confluência no Rio Sorocaba.

Além da forma única de escarpa encontrada nesta unidade de relevo, as formas que mais ocorrem são as colinas de topos convexos e dissecação menor que as duas

primeiras unidades. Suas vertentes são predominantemente retilíneas, com a ocorrência também de convexas. Os vales em “V” são simétricos abertos e as bases das vertentes são suavemente convexizadas.

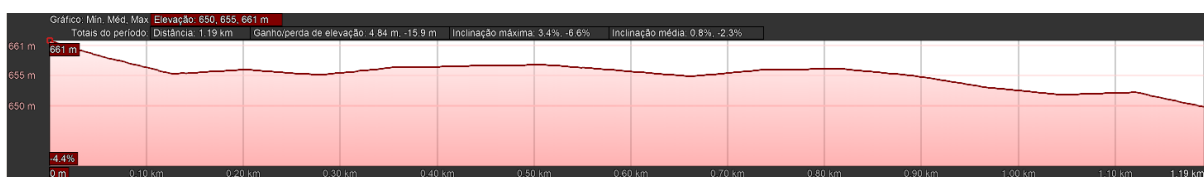
Também são encontradas nesta unidade de relevo as colinas extensas de topos planos, típicas de um modelado colinoso ondulado suave, onde se desenvolvem nesta as atividades agropecuárias, principalmente de cultivo de gramíneas. Esses interflúvios possuem vertentes retilíneas e vales suaves em “V”.

Figura 25. Interflúvio extenso com topo plano. (23°22'55.56"S, 48° 47'59"29.30"O)



Autor: MACHADO JUNIOR, C. Fevereiro/2025.

Figura 26. 2º Perfil topográfico de um setor da Unidade III.



Org.: MACHADO JUNIOR, C. Fonte: Google Earth Pro. CNE/Airbus (2025)

Os interflúvios extensos de topos planos demonstram a ausência da maior dissecação por parte dos rios entalhando seus vales em “V” pouco declives, modelando colinas suavemente convexizadas de bases côncavas.

Essa morfologia sugere um estágio avançado de evolução geomorfológica, onde os processos erosivos atuaram de forma mais lenta e gradual, permitindo o desenvolvimento de superfícies aplainadas (BIGARELLA, MOUSINHO, DA SILVA, 2016). A presença de topos planos e interflúvios extensos pode estar associada a condições climáticas estáveis à erosão, o que favoreceu a formação de um relevo mais suave e menos dissecado. Além disso, a convexidade das colinas e a

concauidade de suas bases indicam um equilíbrio dinâmico entre os processos de erosão e deposição característico de áreas onde a energia dos rios é moderada e a sedimentação ocorre de forma equilibrada. (CHRISTOFOLETTI, 1980; ROSS, 1992).

Já na unidade IV, as formas de relevo caracterizam-se como interflúvios de topos suavemente convexizados e restritos em um modelado homogêneo. Suas vertentes são retilíneas a côncavas e possuem vales em “V” assimétricos e abertos, demonstrando uma dissecação mais intensa pelos rios perenes. A declividade desta unidade de relevo também está entre 0 e >40% e sua altimetria varia de 518 a 779m, sendo a mais elevada.

Figura 27. Forma de interflúvios alongados, extensos e de topo acentuado. - Unidade de Relevo IV (23°24'38.10"S, 47°54'59.13"O)



Autor: MACHADO JUNIOR, C. Fevereiro/2025

Figura 28. Perfil topográfico de um setor da unidade IV.



Org.: MACHADO JUNIOR, C. Fonte: Google Earth Pro. CNE/Airbus (2025)

O perfil de elevação da unidade caracteriza interflúvios alongados, extensos e topos bem acentuados, os quais apresentam pouca variação de altitude em relação ao nível de base dos rios. Suas bases são côncavas, dissecadas pelos afluentes do Rio Tatuí e do Ribeirão Jumirim.

Já na última unidade de relevo da bacia, o modelado colinoso também apresenta maior altimetria alcançando 778m, mas demonstra declividades menos acentuadas com predominância de 0 a 8% - por mais que seja possível identificar áreas pontuais de declividades maiores que 40%.

Figura 29. Forma de Interflúvio extenso com topos suavemente convexizados (23°25'40.63"S, 48° 4'5.93"O)



Autor: MACHADO JUNIOR, C. Fevereiro/2025.

Figura 30. Perfil topográfico de um setor da Unidade V.



Org.: MACHADO JUNIOR, C. Fonte: Google Earth Pro. CNE/Airbus (2025).

Seus interflúvios caracterizam-se pela grande extensão, com topos planos e vertentes retilíneas de bases convexas. Seus vales são em “V” simétricos e abertos. Esta unidade de relevo está presente sobre a estrutura da Formação Teresina e da Formação Irati, ambas do período Permiano. Durante o trabalho de campo, foi possível observar em um corte de estrada a presença de calcários e folhelhos, característicos da Formação Teresina.

Figura 31. Recorte do perfil da Formação Teresina para verificação de litologia. (23°24'57.5" S, 48° 02'35.8" O)



Autor: MACHADO JUNIOR, C. Fevereiro/2025.

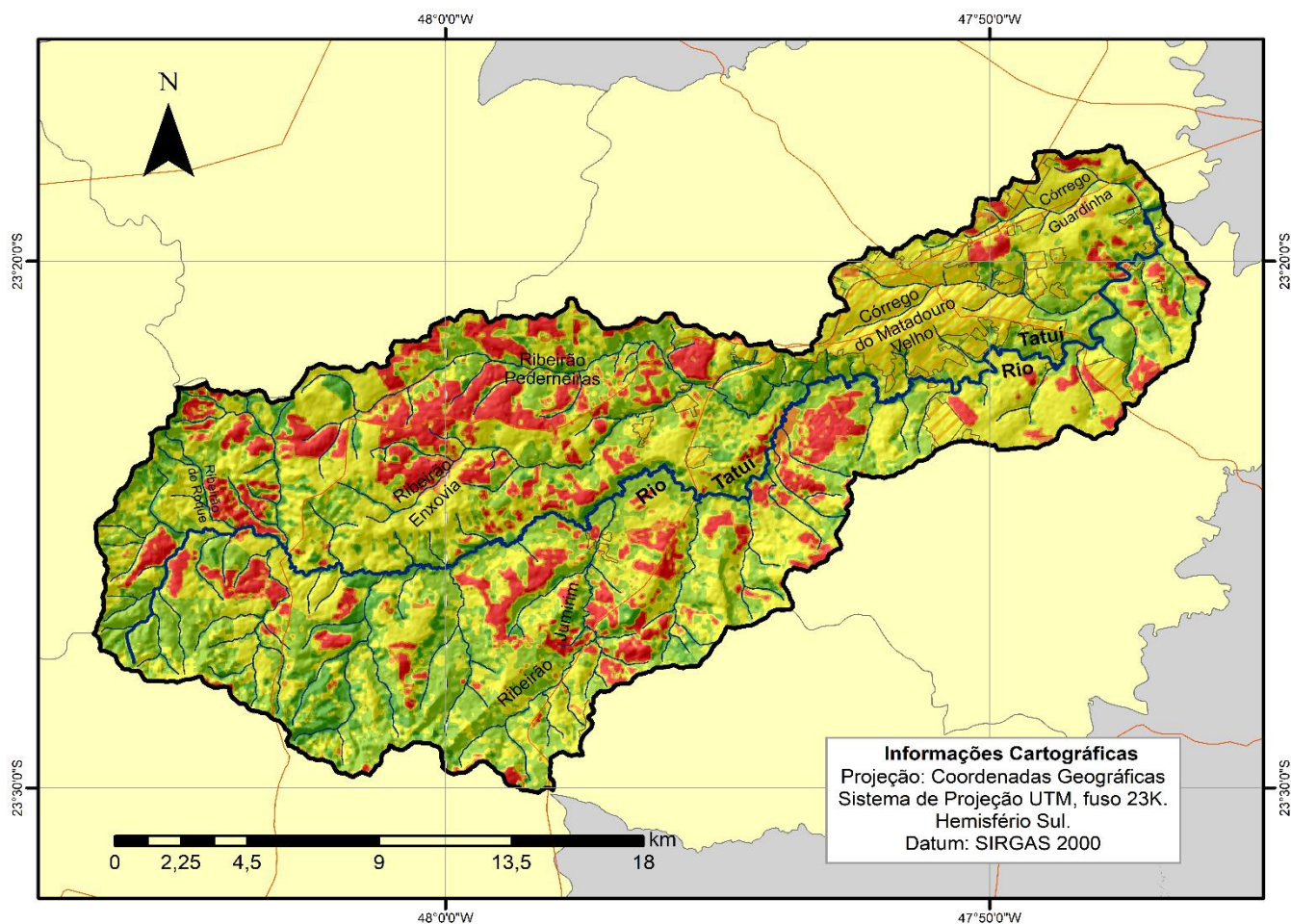
A coloração marrom-acinzentada deu origem aos argissolos vermelho-amarelos, presentes em toda a unidade V. A faixa verde que se vê na imagem acima provavelmente é proveniente de hidromorfia sofrida pela litologia no ajuste dos cursos fluviais, onde os materiais foram transportados abaixo. Essa hidromorfia, caracterizada pela saturação de água no solo, favorece a redução de óxidos de ferro e a formação de minerais secundários, como os silicatos hidratados, que conferem a tonalidade esverdeada, pois, de acordo com Grigorowitschs e Rodrigues (2014)

[...] solos presentes em determinadas morfologias e posições do relevo, tais como o setor inferior de vertentes e as planícies fluviais, estão sujeitos a condições de saturação hídrica temporária ou permanente, as quais promovem a formação de atributos hidromórficos tais como as feições redoximórficas, que em alguns casos correspondem aos chamados mosqueado [...] (GRIGOROWITSCHS & RODRIGUES, 2014, p. 93)

6.2 Análise da Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí

A fim de analisar os impactos ambientais na bacia a partir do uso do solo e de suas variáveis genéticas, foi aplicada a proposta de fragilidade ambiental proposta por Ross (1994) para identificar as classes de fragilidade ambiental emergente.

Figura 32. Mapa de Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí



Informações Cartográficas
 Projeção: Coordenadas Geográficas
 Sistema de Projeção UTM, fuso 23K.
 Hemisfério Sul.
 Datum: SIRGAS 2000

Legenda

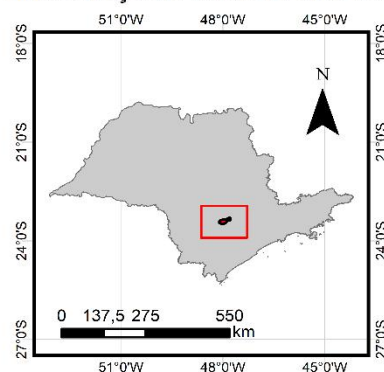
I. Fragilidade Ambiental

- Muito Baixa
- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta

II. Convenções Cartográficas

- Bacia do Rio Tatuí
- Rio Tatuí
- Rodovias Estaduais
- Hidrografia da Bacia do Rio Tatuí
- Áreas Urbanizadas
- Municípios da Bacia
- Municípios do Estado de São Paulo

III. Localização no Estado de São Paulo



Legenda

- Bacia do Rio Tatuí
- Estado de São Paulo

Base de Dados

Limites Municipais e Estadual: IBGE (2022)
 Área Urbana: IBGE (2019)
 Rodovias: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes (2016)
 Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí: Carta Topográfica na escala 1:10.000 (IGC-SP, 1970)
 Hidrografia: Agência Nacional de Águas (2017)
 Adaptado de Ross (1994)

A análise da fragilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, fundamentada no modelo de geossistemas, permite identificar uma clara correlação entre a espacialização das vulnerabilidades e os compartimentos de relevo que estruturam a paisagem. Observa-se que as distintas formas de uso e ocupação do solo, historicamente desenvolvidas sobre essas unidades geomorfológicas, atuam como agentes potencializadores ou mitigadores da instabilidade natural. A interação complexa entre os componentes do substrato físico-natural (geologia, relevo, solos) e as pressões antrópicas resulta, portanto, em um mosaico de condições de fragilidade, cuja configuração espacial heterogênea evidencia as consequências diretas dos diferentes modelos de apropriação do território.

Na investigação das classes de fragilidade em sua espacialização pela área de estudo, obteve-se o resultado quantitativo acerca de seu tamanho, demonstrado na tabela 8.

Tabela 8. Graus de Fragilidade Ambiental espacializada

Grau de Fragilidade Ambiental	Área (km²)	Área (%) com relação ao total
1 – Muito Baixa (1 a ≤ 1,5)	32,07km ²	9,88%
2 – Baixa (1,5 a ≤ 2,5)	132,88km ²	40,96%
3 – Média (2,5 ≤ 3,5)	109,13 km ²	33,64%
4 – Alta (3,5 ≤ 4,5)	19,51 km ²	6,01%
5 – Muito Alta (4,5 ≤ 5)	30,84 km ²	9,50%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na porção leste da bacia, estende-se a Unidade de Relevo I, correspondente às planícies fluviais que margeiam o curso principal do Rio Tatuí e às colinas estruturadas pela Formação Tatuí. Esta área, de modo geral, de topografia naturalmente suave e baixa suscetibilidade à erosão, apresenta uma fragilidade média. A paisagem é dominada pela mancha urbana do município de Tatuí e por extensas áreas de pastagem em seu entorno. A intensa impermeabilização do solo pela malha de concreto e asfalto, somada à compactação gerada pelo pisoteio do gado nas áreas de pecuária, eleva a fragilidade ambiental. Como resultado, o que era naturalmente estável transforma-se em um ambiente de fragilidade média, especialmente vulnerável a eventos como enchentes e inundações nas áreas urbanas, como já ocorrido em períodos anteriores no município de Tatuí.

Essa vulnerabilidade é explicada por Tucci (2007), que afirma que o processo de urbanização modifica o ciclo hidrológico por meio da impermeabilização do solo.

Tal ação reduz a capacidade de infiltração da água na bacia, o que, por consequência, aumenta o volume do escoamento superficial e a vazão máxima durante as cheias, além de acelerar o tempo de resposta entre o início da chuva e o pico da inundação. A fragilidade média identificada nesta área está associada aos focos em processos erosivos em razão da menor escala, porém, como visto em trabalhos de campo, existem áreas de maior fragilidade em razão da possibilidade e frequência de alagamentos e enchentes.

Figura 33. Área de alagamento no bairro Dr. Laurindo em Tatuí (SP) em janeiro de 2023.



Fonte: G1 (2023). Disponível em <<https://g1.globo.com/sp/itapetininga-regiao/noticia/2023/01/28/chuva-forte-alaga-ruas-e-causa-transtornos-em-tatui.ghtml>> Acesso em 21 de julho de 2025.

Como um dos agravantes da fragilidade ambiental, a declividade presente na área urbana atrelada aos processos de impermeabilização intensifica os processos erosivos, sobrecarregando o sistema. Segundo Benini & Mediondo (2015),

“A urbanização de forma desordenada, sem diretrizes de ocupação, impacta gravemente no ciclo hidrológico, pois causa drásticas alterações na drenagem, elevando a possibilidade de ocorrência de enchentes e deslizamentos, impondo riscos à saúde e à vida humana.” (BENINI & MEDIONDO, 2015, p. 212).

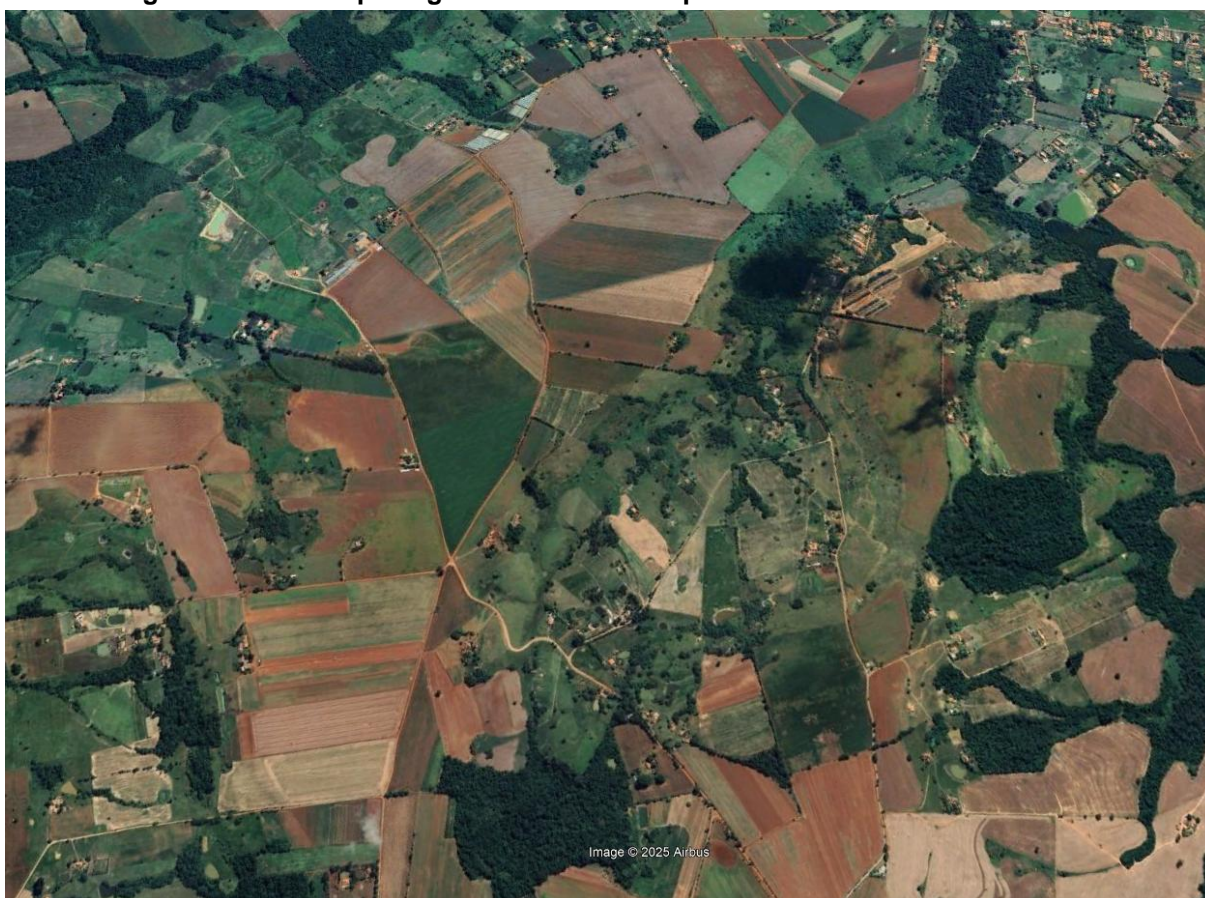
Avançando em direção ao interior da bacia, encontra-se a Unidade de Relevo II, um compartimento de colinas amplas e suaves que constitui uma paisagem de transição. O relevo levemente ondulado favoreceu a consolidação de atividades

agropecuárias extensivas, com destaque para a cultura da cana-de-açúcar e a pastagem.

Nestas áreas, a fragilidade ambiental se manifesta com os graus “Muito Baixa” a “Muito Alta”, demonstrando variabilidade na correlação entre as variáveis estipuladas. Embora a topografia não imponha grandes restrições, as práticas associadas à agricultura mecanizada e o manejo contínuo do solo geram uma vulnerabilidade moderada, ligada principalmente a processos de erosão laminar e à perda gradual da estrutura do solo. Nas áreas onde se observa o grau de fragilidade forte, há o cultivo de soja, agravante de alguns impactos ambientais. Nesta área também são encontrados os depósitos aluviais nas planícies do Rio Tatuí, área de forte fragilidade em razão dos processos erosivos do ciclo hidrológico.

De acordo com Liszbinski, Brizolla e Patias (2021), a produção de soja gera grandes preocupações ambientais por interferir de maneira excessiva no geossistema. Entre os exemplos dessa degradação estão a poluição do ar e dos rios e a erosão do solo.

Figura 34. Área de pastagens e lavouras temporárias na Unidade de Relevo II.



Fonte: Google Earth / Airbus, 2025.

Já a Unidade de Relevo III, localizada na porção central da bacia, apresenta uma morfologia mais acidentada, com vales mais encaixados e vertentes de maior declividade. O uso do solo, predominantemente com pastagens que se estendem pelas encostas, interage de maneira crítica com o relevo. A combinação de um terreno mais íngreme com uma cobertura que, por vezes, deixa o solo exposto, acelera os processos erosivos e aumenta a instabilidade das vertentes. Consequentemente, esta unidade exibe um quadro de fragilidade que oscila entre média e forte, revelando como um mesmo uso da terra pode ter impactos ambientais distintos a depender do contexto geomorfológico em que se insere. De acordo com PANACHUKI et al. (2011, p. 775)

O processo de degradação da pastagem leva à redução da cobertura vegetal do solo, expondo-o ao impacto direto das gotas de chuva, o que, conseqüentemente, leva à desagregação de suas partículas e ao selamento superficial, com redução da capacidade de infiltração de água e aumento do escoamento superficial e da erosão.

Vitte e Guerra (2019) salientam que essa intensificação da fragilidade ocorre porque, especialmente em relevos acidentados, o manejo inadequado da pastagem e o pisoteio intensivo do gado provocam a compactação e a redução da cobertura vegetal. Com isso, o solo fica mais exposto à ação da chuva, o que intensifica o escoamento superficial e a perda de solo por erosão, podendo, em casos mais graves, levar à formação de sulcos e voçorocas.

Na Unidade de Relevo IV, que domina a porção oeste e sul da Bacia do Rio Tatuí, o relevo é caracterizado por ser fortemente dissecado, com altas declividades e altitudes elevadas, circundando as principais cabeceiras de drenagem do Rio Tatuí. A fragilidade ambiental desta área demonstrou grau “muito fraca” a “média”, o que é um bom indicador, entendendo que as cabeceiras de drenagem precisam ser protegidas de acordo com a legislação ambiental. As únicas áreas nesta unidade que apresentaram grau elevado de fragilidade, foram as que se relacionam às lavouras de soja, de acordo com a figura 14. A relação geologia-fragilidade se mostrou resistente sobre a Formação Teresina, mas obteve graus maiores de fragilidade sobre as Formações Irati e Tatuí, entendendo que o uso do solo obteve um maior peso nesta relação devido às práticas de manejo da agricultura de soja.

Por fim, a Unidade de Relevo V, que se localiza à oeste na Bacia do Tatuí, caracterizada por um relevo mais dissecado, apresentou graus de fragilidade maiores em relação à unidade IV, devido ao uso do solo. Esta unidade também apresenta cabeceiras de drenagem importantes para a bacia. As pastagens, cultivos de soja e de cana-de-açúcar fazem com que a paisagem se torne mais frágil frente a processos

erosivos e perda de estrutura de solo. A remoção da vegetação nativa para dar lugar a essas atividades em áreas sensíveis próximas às cabeceiras compromete não apenas a estabilidade do solo local, mas a saúde de toda a bacia, potencializando o assoreamento dos rios e a degradação dos recursos hídricos que ali se originam.

Nesse sentido, Tundisi e Tundisi (2008) reforçam que as cabeceiras são geossistemas essenciais para a manutenção da qualidade e do volume de água da bacia. Os autores explicam que a substituição da cobertura vegetal nativa por lavouras ou pastagens nessas áreas de recarga acelera a erosão, o que aumenta o transporte de sedimentos para os rios. Como consequência, ocorre o assoreamento dos leitos, que diminui a capacidade de vazão do canal e, conseqüentemente, eleva a frequência de inundações nas áreas a jusante.

Assim, entendendo que as cabeceiras de drenagem protegem as nascentes do Rio Tatuí, um grau de fragilidade elevado nessas áreas demanda maior atenção à proteção do ciclo hidrológico e aos eventos de movimentos de massa. Como já citado anteriormente, a desagregação do solo local nesta área pode ocasionar obstáculos ao bom funcionamento do curso fluvial. De acordo com Eduardo et al. (2013, p. 799), a erodibilidade em um Argissolo Vermelho-Amarelo pode variar consideravelmente, mas ainda assim representa um desafio para a conservação do solo e da água. Logo, sob condições pluviométricas elevadas, a atenção deve ser redobrada.

Desta forma, a análise da fragilidade ambiental da Bacia do Rio Tatuí confirma que ela se agrava à medida que as atividades agropecuárias avançam sobre terrenos de maior complexidade e declividade, sem a adoção de práticas de manejo e conservação adequadas, evidenciando os conflitos entre o uso da terra e a capacidade de suporte do meio físico.

Essa conclusão dialoga com a perspectiva de Guerra e Cunha (1996), para quem o planejamento territorial deve, obrigatoriamente, respeitar as potencialidades e limitações do ambiente. Segundo os autores, a expansão das atividades agropecuárias sobre áreas naturalmente vulneráveis — como as de alta declividade —, sem a devida adoção de práticas conservacionistas, é a principal causa de degradação e da erosão acelerada, o que expõe o conflito existente entre certos modelos de desenvolvimento e a capacidade de suporte dos geossistemas.

Tabela 9. Quadro Síntese da Análise Geomorfológica e da Fragilidade Ambiental

Unidade de Relevô	Descrição do Relevô	Estrutura	Uso do solo	Fragilidade Ambiental (ROSS, 1994)
Unidade I	Interflúvios alongados com topos suavemente convexizados; vertentes retilíneas com bases côncavo-retilíneas; vales simétricos e abertos; relevo suave e pouco dissecado.	Formação Tatuí, Grupo Itararé, Irati e Teresina.	Área urbana (município de Tatuí), pastagem, cana-de-açúcar, mineração de argila.	Média (predominante) a Muito Alta.
Unidade II	Interflúvios muito extensos com topos aplainados; baixa amplitude de relevo; vales largos; vertentes suavemente convexas; dissecação fraca.	Formação Tatuí, Grupo Itararé, Irati, Teresina e Depósitos Aluvionares.	Agroindústria extensiva (cana-de-açúcar), pastagem e mosaico de usos.	Muito Baixa a Muito Alta - Média predominante; Interflúvios com grau "Muito Forte"
Unidade III	Escarpa adaptada a falha; colinas de topos convexos e planos; vertentes retilíneas e convexas; vales em "V" simétricos e abertos.	Formação Teresina (sustentando a escarpa) predominante, sobre as Formações Irati e Tatuí. Controle por falha geológica.	Área urbana restrita, cana-de-açúcar, soja, pastagem predominante nas encostas.	Muito Baixa a Muito Alta – Muito forte nos interflúvios ao norte da unidade ocupados pelo plantio de soja.
Unidade IV	Interflúvios restritos com topos suavemente convexizados e restritos; vertentes retilíneas a côncavas; vales em "V" assimétricos e abertos; relevo fortemente dissecado e de alta altitude (a maior).	Formação Teresina e Irati sobre a Formação Tatuí.	Pastagem e silvicultura em encostas íngremes (uso inadequado), cultivo de soja.	Baixa a Média. Muito alta nos interflúvios ocupados pelo cultivo de soja.
Unidade V	Interflúvios extensos com topos planos a suavemente convexizados; vertentes retilíneas com bases convexas; vales em "V" simétricos e abertos; alta altitude com declividades predominantemente suaves, mas com áreas íngremes.	Formações Teresina e Irati sobre a Formação Tatuí.	Pastagem e silvicultura em encostas íngremes (uso inadequado), cana-de-açúcar, soja e mosaico de usos.	Baixa a Muito Alta – Muito alta nos interflúvios ocupados pelo cultivo de Cana-de-Açúcar e Soja.

7. Considerações Finais

A pesquisa teve como objetivo a análise integrada dos aspectos geomorfológicos e ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí, correlacionando as alterações no uso e ocupação do solo com a Fragilidade Ambiental da Área. A metodologia adotada, pautada em uma abordagem sistêmica, permitiu a correlação entre os componentes do meio físico e as formas de uso antrópico, demonstrando que o relevo atua como um fator condicionante dos processos ambientais, e, simultaneamente, é modificado por eles.

A análise geomorfológica resultou na compartimentação da área de estudo em cinco unidades de relevo distintas, cujas características são reflexo da interação entre os processos morfogenéticos e morfoesculturais. A bacia está inserida na província geomorfológica da Depressão Periférica Paulista, especificamente em sua unidade subdividida intitulada Depressão do Médio Tietê, caracterizada por um relevo suavemente ondulado. Verificou-se que a heterogeneidade litológica, composta por rochas sedimentares das formações Tatuí, Irati, Teresina e Grupo Itararé e a presença de controles estruturais influenciam diretamente o relevo da área, os diferentes níveis de dissecação e a organização da rede de drenagem. Destacou-se uma estrutura de falha com orientação WSW-ENE, que condiciona a morfologia de uma escarpa adaptada à falha e altera o curso do Rio Tatuí.

Na área da bacia, as ações antrópicas atuam como um agente geomorfológico transformador ativo, conforme analisado no terceiro nível de abordagem de Ab'Sáber (1969), que considera a fisiologia da paisagem e as ações humanas predatórias. A análise do uso e ocupação do solo, que identificou o predomínio de pastagens e culturas agrícolas, demonstrou que a fragilidade ambiental está intrinsecamente relacionada aos componentes do meio físico. O mapa síntese da fragilidade ambiental permitiu a identificação de um mosaico de vulnerabilidades na bacia, que identificou particularidades em cada um dos compartimentos de relevo.

Na primeira unidade de relevo, verificou-se que a mancha urbana do município de Tatuí (SP), com sua intensa impermeabilização do solo, eleva a fragilidade para os níveis “Média” a “Muito Alta”. Essa condição intensifica o escoamento superficial e a frequência de eventos de inundação, fenômeno já registrado no município e que colabora com a ideia de que a urbanização modifica negativamente o ciclo hidrológico.

Nas demais unidades, as classes de fragilidade “Alta” e “Muito Alta” estão associadas à expansão de atividades agropecuárias, como pastagens e cultivos de

soja e cana-de-açúcar, sobre terrenos de maior declividade e solos mais erodíveis, como os Argissolos Vermelho-Amarelos, identificados em grande área da bacia. O manejo inadequado da pastagem e a remoção da cobertura vegetal original nestas áreas potencializam os processos erosivos e a instabilidade das vertentes, especialmente em áreas de cabeceiras, comprometendo a estabilidade de toda bacia à jusante.

A análise também expôs conflitos no uso dos recursos naturais, como a exploração de argila para a indústria cerâmica, que apesar de economicamente relevante, causa impactos como a alteração do relevo, o aumento dos processos erosivos e o comprometimento dos corpos hídricos pelo carreamento de material detrítico e rejeitos da mineração.

A correlação entre os fatores analisados permitiu concluir que a Bacia Hidrográfica do Rio Tatuí se constitui como um sistema aberto e dinâmico, onde a qualidade ambiental é reflexo da interação entre os componentes do substrato físico e as pressões antrópicas. A análise geomorfológica, ao elucidar a gênese e distribuição das formas de relevo, forneceu os subsídios para a espacialização e compreensão dos impactos ambientais. Os resultados indicam que a ocupação do território, quando desvinculada das suas condicionantes naturais, acarreta desequilíbrios, manifestados por processos de erosão acelerada, movimentos de massa, inundações e enchentes.

Ademais, para as áreas de “Muito Alta” fragilidade, cabe à fiscalização competente a redundância das análises com relação à perda do solo, por se tratar de áreas com retirada da cobertura vegetal nativa e maior exposição aos agentes do intemperismo.

Desse modo, a pesquisa cumpre seu objetivo ao preencher a lacuna de conhecimento geoambiental sobre a bacia e ao fornecer subsídios técnicos para o planejamento ambiental e a gestão territorial. A abordagem sistêmica demonstrou ser uma ferramenta eficaz para diagnosticar os conflitos de uso e avaliar a fragilidade do sistema, visando compatibilizar as atividades humanas com as potencialidades e limitações do meio físico. Como recomendação prática, os resultados apontam para a necessidade urgente de um monitoramento contínuo e da implementação de planos de manejos conservacionistas nas áreas classificadas com fragilidade "Alta" e "Muito Alta", a fim de mitigar a perda de solo, proteger as áreas de cabeceira e garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos da bacia.

Referências Bibliográficas

- AB'SÁBER, A. N. Espaços ocupados pela expansão dos climas secos na América do Sul por ocasião dos períodos glaciais quaternários. São Paulo, 1977. 19 p.
- AB'SÁBER, A. N. Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil. São Paulo, 1970. 25p.
- AB'SÁBER, A. N. Regiões de Circundesnudação Pós-Cretácea no Planalto Brasileiro. Boletim Paulista de Geografia, São Paulo, n. 1, p. 3-21, 1949.
- AB'SÁBER, A. N. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o quaternário. São Paulo, 1969. 23 p.
- ALMEIDA, F. F. M. Origem e Evolução da Plataforma Brasileira. Boletim do DNPM-DGN, Rio de Janeiro, n. 241, 36p., 1967.
- ALVARES, C. A. et al. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 16 jul. 2025.
- AMARAL, S. E. Geologia e Petrologia da Formação Irati (Permiano) no Estado de São Paulo. Tese ao Concurso de Livre Docência da Cadeira de Geologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo. São Paulo, 78p. 1967.
- AQUINO, A. R. de; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. de. Fragilidade Ambiental. In: Fragilidade Ambiental. São Paulo: Blucher, 2017.
- ARAÚJO, L. M.; TRIGÜIS, J.A.; CERQUEIRA, J.R.; FREITAS, L.C.S. The atypical Permian petroleum system of the Paraná Basin, Brazil. In: Mello M.R. & Katz B.J. (eds.) Petroleum systems of South Atlantic margins. Memoir, v.73, p. 377-402. 2000.
- ASSINE, M. L.; ZACHARIAS, A.A.; PERINOTTO, J.A.J. Paleocorrentes, paleogeografia e sequências deposicionais na Formação Tatuí, centro-leste do estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, [S.l.], v. 33, n. 1, 2003.
- AUMOND, J. J. Teoria dos sistemas: Uma nova abordagem para recuperação e restauração ambiental. In: II Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, 2003, Itajaí. Anais. Itajaí, 2003, 6 p.
- AUMOND, J. J., BALISTIERI, P. R. M., Custos da reabilitação ambiental na mineração de matérias-primas cerâmicas. In: Simpósio nacional de recuperação de áreas degradadas, 3. Ouro Preto, 1997. Anais... Ouro Preto: EDUFV, 1997. p. 36-41.
- BARBOSA-GIMENEZ N. L. Estudo Petrológico dos Arenitos da Formação Tatuí no Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 174 p. 1996.
- BARBOSA-GIMENEZ, N. L.; CAETANO-CHANG, M. R. Diagênese de arenitos da Formação Tatuí no estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, [S.l.], v. 40, n. 1, p. 68-79, março de 2010.

BARRELLA, W. et al. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) Matas ciliares: conservação e recuperação. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

BENINI, R. M.; MENDIONDO, E. M. Urbanização e Impactos no Ciclo Hidrológico na Bacia do Mineirinho. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 211–222, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/floram/a/Z6Tf4Krs6qgnSrTp4ZXY3Vx/?lang=pt>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global. Esboço metodológico. Revista RA'E GA, n. 8. Curitiba: Editora UFPR, 2004, p. 141-152

BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO, M. R.; SILVA, J. X. da. Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. **Espaço Aberto**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 2, p. 165-196, 2016. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/EspacoAberto/article/view/7650/6181>. Acesso em: 14 jul. 2025.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. Bacia hidrográfica e Qualidade Ambiental. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A.J.T. (Orgs.). Reflexões sobre a geografia física no Brasil. 6ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. 282p.

BRAGA, R. Planejamento urbano e recursos hídricos. In: BRAGA, R.; CAETANO-CHANG, M. R. Análise Ambiental e Estratigráfica do Subgrupo Itararé (PC) no Sudoeste do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 310 p., 1984.

BROWN, A. G. et al. The geomorphology of the Anthropocene: emergence, status and implications. *Earth Surf. Process. Landforms*, v. 42, p. 71-90, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3943>.

CASSETI, V. Apropriação do Relevo. São Paulo, Contexto, 1991, 147 pp.

CHORLEY, R. J. A Geomorfologia e a Teoria dos Sistemas Gerais. *Notícia Geomorfológica*, Campinas, N.º 21, Vol. 11, p. 3-22, junho de 1991.

CHORLEY, R. J. Geomorphology and general systems theory. U.S. Geological Survey Professional Paper, Washington, n. 500-B, p. B1-B10, 1962.

CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Ed.). *Models in Geography*. London: Methuen, 1967.

CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. *Physical Geography: A systems approach*. London: Prentice-Hall International, 1971.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise de sistemas em Geografia. Editora Hucitec, USP, São Paulo, 1979, 106 p.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda e EDUSP, 1974, 2.º ed. 150 p.

CONAMA, Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e da outra providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 de mar. de 2005, Seção 1, p. 58-63.

CORREA, A. C. B. FÔNSECA, F, N. lineamentos de drenagem e de relevo como subsídio para a caracterização morfoestrutural e reativações neotectônicas da área da bacia do Rio Preto, Serra do Espinhaço Meridional – MG. Revista de Geografia. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VIII SINAGEO, n. 1, set. 2010.

COSTA, G.E. da. Fácies Sedimentares e Composição de Folhelhos da Formação Irati (Eopermiano) da Bacia do Paraná Na Região de Bom Retiro, Leste de Santa Catarina. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina. 67p. 2015.

COUTINHO, J. M. V. Petrologia do Pré-Cambriano em São Paulo e Arredores. Anais do Departamento de Mineralogia e Petrologia. Instituto de Geociências, USP, 1968.

CREPANI, E. et al. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. São José dos Campos: INPE, 2001.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. D.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial (p. 124). São José dos Campos: Inpe. 2001.

CSIMA, P. Urban Development and Anthropogenic Geomorphology. In: LÓCZY, D. A Guide to Man-Made Landforms. Dordrecht: Springer, 2010. p. 179-187.

CUNHA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.

CUNHA, C. M. L.; MENDES, I. A.; SANCHEZ, M. C. A Cartografia do Relevo: Uma Análise Comparativa de Técnicas para a Gestão Ambiental. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 4, n. 1, 2003.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. Degradação ambiental. Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008.

DANELON, J. R. B.; BARCELOS, A. C. Processos Antropogênicos Induzidos em Ambientes Urbanizados. Mercator, Fortaleza, v. 21, e21033, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4215/rm2022.e21033>. Acesso em 04 jul. de 2025.

DAVINO, A. Geologia da Serra de Araçoiaba, Estado de São Paulo. Departamento de Geologia Econômica e Geofísica Aplicada. Boletim IG. Instituto de Geociências, USP, V. 6: 129-144, 1975.

DAVIS, W. M. The Geographical Cycle. **The Geographical Journal**, v. 14, n. 5, p. 481-504, nov. 1899.

DE QUEIROZ NETO, J. P. Geomorfologia e Pedologia. Espaço e Tempo, São Paulo, N. 13, p. 9-20, 2003.

EDUARDO, Eliete Nazaré; FONSECA, Daniel; MACHADO, Roriz Luciano; *et al.* Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em argissolo vermelho-amarelo, sob condições de chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 796–803, 2013. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/VkyPqGf8MmrJP8wnn7YdRJK/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

EMBRAPA. Levantamento pedológico detalhado (1:5.000) da Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento de Tatuí (APTA Sudoeste Paulista – SAA – SP). Maurício Rizzato Coelho; Marcio Rossi; Ricardo Marques Coelho; João Roberto Ferreira Menk. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003.

FARIAS, C. GOMES, E. Mineração e Meio Ambiente no Brasil. Pnud, 2002

FERREIRA, P. S.; SILVA, C. A. da. O método AHP e a Álgebra de Mapas para determinar a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Brilhante (Mato Grosso do Sul / Brasil), proposições para a gestão do território, *Confins*, v. 46, 2020.

FERREIRA, R. R. M. et al. Geomorfologia antrópica, riscos geomorfológicos e hidrológicos na porção centro-leste de Anápolis (GO). *Boletim Goiano de Geografia*, v. 24, n. 1, 2004.

FLORENZANO, T. G. Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. Oficina de textos, 2016.

GAMA JR, E.G.; CAETANO, M.R.; WEYLER, G. Divisão Faciológica do Subgrupo Itararé no Centro Oeste do Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia 31, Camboriú. Bol. Resumos. Camboriú, SBG. p.365, 1980.

GAMA JR, E.G.; PERINOTTO, J.A.J.; RIBEIRO, H.J.P.S; PADULA, E.K. Contribuição ao estudo de ressedimentação no Subgrupo Itararé: um guia temático de campo. *Revista Brasileira de Geociências*, 22 (2): 237-247 1992.

GIRÃO, O.; CORRÊA, A. C. B. A contribuição da geomorfologia para o planejamento da ocupação de novas áreas. *Revista de Geografia*, v. 21, n. 2, p. 119-137, 2004.

GOERL, R. F.; KOBIVAMA, M.; SANTOS, I. Hidrogeomorfologia: Princípios, Conceitos, Processos e Aplicações. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, n. 2, p. 103-111, 2012.

GOMES, M. A. F.; PEREIRA, L. C. Áreas frágeis no Brasil: subsídios à legislação ambiental. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. (Documentos / Embrapa Meio Ambiente, 87).

GONÇALVES, G. G. G; DANIEL, O; COMUNELLO, É.; VITORINO, A. C. T; ARAI, F. K. Determinação da fragilidade ambiental de bacias hidrográficas. *Floresta*, Curitiba, v. 41, n. 4, p. 797-808, out./dez. 2011.

GOUDIE, A. S. *The human impact on the natural environment: past, present, and future*. 8. ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2018.

GOUDIE, A. *The Human Impacts on the Natural Environment*. 4. ed. Oxford: Blackwell, 2013.

GRIGOLETTI, G. C.; SATTLER, M. A. Estratégias ambientais para indústrias de cerâmica vermelha do Estado do Rio Grande do Sul. *Ambiente Construído*, v. 3, n. 3, p. 19-32, 2003.

GRIGOROWITSCHS, H., & RODRIGUES, C. (2014). Graus De Hidromorfia De Solos Situados Em Planície Fluvial E Em Setores De Interface Vertente-Planície Na Bacia Hidrográfica Do Rio Cotia/Sp. *REVISTA GEONORTE*, 5(21), 93–99. Recuperado de [//periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1499](http://periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1499).

GUERRA, A. Geomorfologia e Planejamento Ambiental – Conceitos e Aplicações. *Revista Geografia (Recife)* V.35. No 4. (Especial XII SINAGEO), 2018.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.) *Geomorfologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 472p.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. *Geomorfologia ambiental*. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

GUIMARAES, C. M.; MORAIS, C. F. de. Mineração, degradação ambiental e arqueologia: Minas Gerais, Brasil século XVIII. *Memoria americana*, v. 26, n. 2, p. 82-101, 2018.

HACHIRO, J. O subgrupo Irati (Neopermiano) da Bacia do Paraná. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 196p. 1996.

HACK, J. T. Interpretation of erosional topography in humid temperate regions. *American Journal of Science*, New Haven, v. 258-A, p. 80-97, 1960.

HACK, J. T. Stream profile analysis and stream gradient index. *Journal Research of U. S. Geological Survey*, v. 1, 421-429, 1973.

HACKSPACHER, P. C., GODOY, A. M., OLIVEIRA M. A. F. Evolução Crustal do Bloco São Roque, na Região Sudeste do estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*. 23(3):260- 264, 1993.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, New York, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

IBGE. Manual técnico de geomorfologia / IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2. ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p. – (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598; n. 5)

INSTITUTO GEOLOGICO (São Paulo, SP). Léxico estratigráfico do Estado de São Paulo. São Paulo, 1981. 161 p. (IG. Boletim, 5).

IPT. Mapa geológico do Estado de São Paulo: escala 1:500.000: nota explicativa. São Paulo: IPT -Divisão de Minas e Geologia Aplicada, 1981a. v.1, 126 p. (IPT. Monografias, 6).

JESUS, A. S. de. Geomorfologia antrópica, riscos geomorfológicos e hidrológicos na porção centro-leste de Anápolis (GO). 2010. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

KING, L. C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 147-265, 1956.

LAL, R. Soil conservation and restoration for climate change adaptation and mitigation. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 69, n. 6, p. 123A-126A, 2014. citado em OLIVEIRA, P. T. S. et al. Erosão hídrica em solos cultivados e sob mata ciliar no Cerrado goiano. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 52, n. 11, p. 997-1006, 2017.

LENCIONI, S. METROPOLIZAÇÃO. *GEOgraphia*, v. 22, n. 48, 16 jun. 2020.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. (ed.). *Matas ciliares: conservação e recuperação*. São Paulo: EDUSP, 2000. p. 33-44.

LISZBINSKI, B.; BRIZOLLA, M. M.; PATIAS, T. Z. Produção de soja: perspectivas sociais e ambientais a partir do olhar do produtor. **Geosul**, Florianópolis, v. 36, n. 78, p. 347-369, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/download/74515/47135/307064>.

Acesso em: 20 jul. 2025.

MARANDOLA JR., E.; HOGAN, D. J. Natural hazards: o estudo geográfico dos riscos e perigos. **Ambiente & Sociedade**, v. 7, n. 2, p. 95–110, 2004. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/asoc/a/jY8HBwMg4rJJP49Z6zH9RdJ/?lang=pt>>. Acesso em: 4 jul. 2025.

MARTINS DE SOUSA, M. L.; RODRIGUES DO NASCIMENTO, F. Estudos geoambientais de bacias hidrográficas em áreas suscetíveis à desertificação no Nordeste do Brasil. **Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía**, v. 24, n. 1, p. 13–27, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2015000100002>. Acesso em: 20 jul. 2025.

MATTA, E. da. Recuperação de áreas degradadas pela mineração. Viçosa: Aprenda Fácil, 2001. citado em PINTO, C. E. F. et al. *A mineração em Minas Gerais: uma*

análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração. *Sociedade & Natureza*, v. 28, n. 3, p. 429-444, 2016.

MATTOS, Nathália Helena Secl. Caracterização Geológica e Potencial para Reservatórios no Grupo Itararé, na Região Centro-Leste do Estado de São Paulo. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 72p. 2012.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. *Estudos Avançados*, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010.

MEGLHIORATTI, Thiago. Estratigrafia de Sequências das Formações Serra Alta, Teresina e Rio do Rastro (Permiano, Bacia do Paraná) Na Porção Nordeste do Paraná e Centro-Sul de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. 147p. 2006.

MENDES, A. B.; MENDES, R. K. A origem dos problemas ambientais sob uma perspectiva psicológica e antropocêntrica. *Psicologia & Sociedade*, v. 22, n. 3, p. 587-590, 2010.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A. de.; FERNANDES, L. A. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências - Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/265291564_Bacia_do_Parana>. Acesso em: 02 jan. 2025.

MOCHIZUKI, P. S.; BRESSANE, A.; DALFRE, G.; BIERAS, A. R. (2006). Estudos climáticos como subsídio à política municipal de desenvolvimento do município de Tatuí (SP). *Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia*, 4(2), 115-132.

MONTEIRO, C. A. F. A dinâmica climática e as chuvas no estado de São Paulo: estudo geográfico sob forma de atlas. USP, São Paulo, 1973.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. Erosão hídrica em solos cultivados e sob mata ciliar no Cerrado goiano. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 52, n. 11, p. 997-1006, 2017.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; *et al.* Perdas de solo e de água e infiltração de água em latossolo vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1777–1786, 2011. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/HCFX9G366tJ6hgdvrfsvPd/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

PASCHOAL, L. G.; SIMON, A. L. H.; CUNHA, C. M. L. da. Antropogeomorfologia: o homem como agente geomorfológico e a sua inserção nas pesquisas brasileiras. *Geographia Meridionalis*, v. 1, n. 1, p. 131-153, 2015.

PEDRON, F. A. et al. Levantamento e Classificação de Solos em Áreas Urbanas: Importância, Limitações e Aplicações. In *Revista Brasileira de Agrociência*, Pelotas, v. 13, n.2, p. 147-151, abr-jun, 2007.

PEDROSA, A. S.; NARDIN, C. F. R.; DANELON, J. R. B. Os riscos de inundações urbanas: uma proposta de gestão das águas pluviais nos aglomerados urbanos. In:

Geografia, Cultura e Riscos: Livro de Homenagem ao Prof. António Pedrosa. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2016. p. 309-340.

PEIXOTO, R. J.; LIMA, H. M. de. Diagnóstico dos garimpos de topázio imperial no Alto Maracujá, Sub-bacia do rio das Velhas, MG. Rem: Revista Escola de Minas, v. 57, n. 4, p. 269-274, 2004.

PELOGGIA, A. U. G. A cidade, as vertentes e as várzeas: a transformação do relevo pela ação do homem no município de São Paulo. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, n. 16, p. 24-31, 2005. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47281>. Acesso em: 4 jul. 2025.

PENTEADO, H. CASER, K. Ecologia da Paisagem em Projetos Fluviais de Orlas Urbanas. In: Anais Águas Urbanas. Rio de Janeiro, 2005.

PINTO, C. E. F. et al. A mineração em Minas Gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração. Sociedade & Natureza, v. 28, n. 3, p. 429-444, 2016.

QUEIROZ, F. A. de. Impactos da sojicultura de exportação sobre a biodiversidade do Cerrado. Sociedade & Natureza, v. 21, n. 2, p. 193-209, 2009.

RICCOMINI. C; CRÓSTA. A.P. Análise preliminar de lineamentos em imagens de sensores remotos aplicada à prospecção mineral na área do granitoide Mandira, SP. Bol. IG-USP, Série Cient. 19 23-37, 1988.

ROCHA-CAMPOS, A. C. The Tubarão Group in the Brazilian portion of the Paraná Basin. In: J. J. Bigarella; R. D. Becker; I. D. Pinto (Editors), Problems in Brazilian Gondwana Geology, Curitiba, p. 27- 102, 1967.

RODRIGUES, A. D. C. F.; SILVA, C. W. G. RODRIGUES, E. S.; GALVÃO, S. R. S.; CALDAS, A. M. Caracterização morfológica da bacia hidrográfica do Rio Terra Nova-PE. Revista Semiárido De Visu, v.8, n.1, p.2-14, 2020.

ROHN, R. A estatigrafia da Formação Teresina (Permiano, Bacia do Paraná) de acordo com furos de sondagem entre Anhembi (SP) e Ortigueira (PR). Correlação de Sequências Paleozóicas Sulamericanas, 20, 209-218

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, n. 8, p. 63-74, 1994.

ROSS, J. L. S. Geomorfologia: ambiente e planejamento. São Paulo: Contexto, 1999.

ROSS, J. L. S. Landforms and Environment Planning: Potencialities and Fragilities. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, v. especial 30 anos, p. 38-51, 2012.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. Revista do departamento de Geografia, v. 6, p. 17-29, 1992.

ROSS, J. L. S., & MOROZ, I. C. MAPA GEOMORFOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Revista Do Departamento De Geografia*, 10, 41-58. 2011

ROSSI, M. 2017. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. V.1. 118p.

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 1, 2014.

SANTOS, J. C. F. dos; SOUZA, J. C. de. A construção de rodovias e seus impactos na paisagem: o caso da rodovia GO-132, trecho Niquelândia-Colinas do Sul (GO). *Mirante*, v. 8, n. 1, p. 75-89, 2015.

SANTOS, J. de O.; ROSS, J. L. S. Fragilidade Ambiental Urbana. *Revista da ANPEGE*, v. 8, n. 10, p. 127-144, 2012.

SANTOS, M. *Por uma Geografia Nova*. São Paulo: HUCITEC, 1986.

SANTOS, P.R. Distribuição Estratigráfica, Características e Fácies de Diamictitos de Rochas Associadas do Subgrupo Itararé no Centro e Sul do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, USP, 135p. 1979

SANTOS, P.R. Fácies e Evolução Paleogeográfica do Subgrupo Itararé/Grupo Aquidauana (Neopaleozóico) na Bacia do Paraná, Brasil. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, USP, 128p. 1987.

SANTOS, P.R.; ROCHA-CAMPOS, A.C.; CANUTO, J.R. Patterns of Late Palaeozoic Deglaciation in the Paraná Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 125 (1-4), 165-184. 1996.

SANTOS, V. C. dos; ALMEIDA, L. Q. de. Urbanização, vulnerabilidade, resiliência: relações conceituais e compreensões de causa e efeito. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 10, n. 3, p. 504-521, 2018.

SILVA, A. C. da; SOUZA, R. A. de. A superação da dicotomia homem-natureza na geografia: uma necessidade para a compreensão da questão ambiental. *Mercator*, v. 10, n. 21, p. 173-186, 2011.

SOTCHAVA, V. B. O estudo do geossistema. In: Instituto Geográfico do Estado de São paulo. *Série Métodos em Questão*: p. 1-51, 1978.

SOTCHAVA, V. B. *Por uma teoria de classificação de geossistemas de vida terrestre*. Biogeografia. São Paulo, n. 14, p. 1-24, 1978.

SOUZA FILHO, E.E. Mapeamento Faciológico do Subgrupo Itararé na Quadrícula de Campinas (SP). Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, USP. São Paulo. 121p. 1986

SOUZA, C. R. D. G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A. M. D. S.; OLIVEIRA, P. E. D. *Quaternário do Brasil*. São Paulo: Editora Holos, 2005.

SOUZA, E. P. de.; ARRUDA, E. M. Importância dos aspectos socioambientais para o planejamento ambiental na/da bacia do Córrego Olhos D'Água, Uberlândia-

MG. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP eBooks, p. 501–511, 2017. Disponível em: <<https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/1820>>. Acesso em: 20 fev. 2025.

SOUZA, Mônica de. Análise da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Ribeirão dos Cavalos no Município de Itapetininga-SP. 2023. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/17874>.

SPÖRL, C. Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais. 2007. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-10102007-145640/pt-br.php>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. GEOUSP - Espaço e Tempo, São Paulo, n. 15, p. 39-49, 2004.

STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. Geomorfologia Fluvial. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

STEVAUX, J. C.; SOUZA-FILHO, E. E. & FÚLFARO, V. J. Trato deposicional da Formação Tatuí (P) na área aflorante do NE da Bacia do Paraná, Estado de São Paulo. In: XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Goiânia. Sociedade Brasileira de Geologia. Anais. 1: 219-229, 1996

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, New York, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. Geografia Física e Geomorfologia: uma releitura. 2018.

TAVARES, K. S. R.; MENDES, S. O.; FERREIRA NETO, J. B. Geografia Física e a abordagem geossistêmica aplicada à estudos de suscetibilidade ambiental de bacias hidrográficas. Revista Brasileira de Geografia Física, [S.l.], v. 15, n. 2, p. 634-649, abr. 2022. ISSN 1984-2295.

TRICART, J. Ecodinâmica. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN, 1977.7

TRICART, J. Ecodynamics. 1977.

TROPMAIR, H. Sistemas/Geossistemas/Geossistemas Paulistas. Ecologia da Paisagem. Edição do autor. Rio Claro, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. Porto Alegre: ABRH, 2007.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, C. E., & Beltame, L. F. S. (1974). Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. Hidrologia: ciência.

- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- VALADÃO, R. C. et al. Desintensificação do uso da terra e sua relação com a erosão do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 99-106, 2013.
- VERVLOET, R. J. H. M.; CAMPOS, F. L. M. Cartografia geomorfológica retrospectiva e os impactos do rompimento da Barragem do Fundão (Samarco/Vale/BHP) na região de Bento Rodrigues, Mariana-MG. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 12., 2018, Crato. Anais... Crato: UFCA, 2018. p. 1-12.
- VIEIRA, P. C. Hipótese Sobre A Origem da Depressão Periférica Paulista. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo*, v. 3, n. 2, p. 61-67, 1982.
- VITTE, A. C. A construção da geomorfologia no Brasil. *Revista brasileira de geomorfologia*, 2011.
- VITTE, A. C., & NIEMANN, R. S. Uma introdução à história da geomorfologia no Brasil: a contribuição de Aziz Nacib Ab'Saber. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 2(1), 41-50. 2009.
- VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **Geografia Física, Geotecnologias e Educação: Perspectivas da Pesquisa e do Ensino**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2019.
- VON BERTALANFFY. The theory of open systems in physics and biology. *Science*, 111(2872), 1950, 23-29. 1950.
- VON BERTALANFFY. Teoria geral dos sistemas. Petrópolis: Vozes. 1975.
- ZANATTA, F. A. S.; CUNHA, C. M. L. da. Geomorfologia Antropogênica: processos geomorfológicos induzidos e sua aplicabilidade na análise de áreas urbanizadas. *Mercator*, v. 12, n. 28, p. 109-122, 2013.
- ZANELLA, M. E.; OLIMPIO, J. L.; COSTA, M. C. L.; DANTAS, E. W. C. Vulnerabilidade socioambiental do baixo curso da bacia hidrográfica do Rio Cocó, Fortaleza-CE. **Sociedade & natureza**, v. 25, n. 2, p. 317-332, 2013. Disponível em: <<https://www.scielo.br/ij/sn/a/3cfvBdtdv8yKCHH4bszHhhL/?lang=pt>>. Acesso em: 8 fev. 2025.