



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

Evandro Daniel

**Análise dos Processos Erosivos e Depositionais Utilizando o
Modelo Matemático SIMWE**

(Tese de Doutorado)

Versão Corrigida
São Paulo, 2023



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

Evandro Daniel

Análise dos Processos Erosivos e Depositionais Utilizando o Modelo Matemático SIMWE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Bianca Carvalho Vieira

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Damas Martins

Área de Concentração: Geografia Física

Linha de Pesquisa: Estudos Interdisciplinares em Pedologia e Geomorfologia

Agência Financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

Versão Corrigida

São Paulo, 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Daniel, Evandro

Análise dos Processos Erosivos e Depositionais Utilizando o Modelo Matemático SIMWE / Evandro Daniel; Orientadora: Dr^a. Bianca Carvalho Vieira; Coorientador: Dr. Tiago Damas Martins - São Paulo, 2023.

196 f.; il.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. Área de concentração: Geografia Física.

1. Modelagem de Erosão Hídrica. 2. SIMWE 3. Erosão. 4. Deposição. I. Vieira, Bianca Carvalho, orient. II. Título

ENTREGA DO EXEMPLAR CORRIGIDO DA DISSERTAÇÃO/TESE**Termo de Anuência do (a) orientador (a)**

Nome do (a) aluno (a): Evandro Daniel

Data da defesa: 05/07/2023

Nome do Prof. (a) orientador (a): Dra. Bianca Carvalho Vieira

Nos termos da legislação vigente, declaro **ESTAR CIENTE** do conteúdo deste **EXEMPLAR CORRIGIDO** elaborado em atenção às sugestões dos membros da comissão Julgadora na sessão de defesa do trabalho, manifestando-me **plenamente favorável** ao seu encaminhamento ao Sistema Janus e publicação no **Portal Digital de Teses da USP**.

São Paulo, 10/10/2023



(Assinatura do (a) orientador (a))

Evandro Daniel	ANÁLISE DOS PROCESSOS EROSIVOS E DEPOSITIONAIS UTILIZANDO O MODELO MATEMÁTICO SIMWE		TESE FFLCH/USP 2023
-----------------------	--	--	------------------------------------

Evandro Daniel

**Análise dos processos erosivos e deposicionais
utilizando o modelo matemático SIMWE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor.

Banca Examinadora

Prof^ª. Dr^ª. Bianca Carvalho Vieira (Orientadora)

Departamento de Geografia - Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Carlos Valdir de Meneses Bateira

Departamento de Geografia - Universidade do Porto (Portugal)

Prof^ª. Dr^ª. Maria Lígia Cassol Pinto

Departamento de Geografia - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG)

Prof. Dr. Eberval Marchioro

Centro de Ciências Humanas e Naturais - Universidade Federal do Espírito Santos (UFES)

São Paulo, 2023

Aos meus pais Gilda e Tino (*in memoriam*) e a Ciência!

“O saber a gente aprende com os mestres e os livros, a sabedoria se aprende com a vida e com os humildes” (Cora Coralina)

“O real não está na saída nem na chegada: ele se dispõe para a gente é no meio da travessia” (João Guimarães Rosa)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado força e principalmente saúde para concluir esta tese, sonho realizado que começou a ser construído em 2015 quando reprovei no primeiro processo seletivo. Durante este período a minha vida passou por percalços e dificuldades que me tornaram mais forte, maduro e melhor como ser humano. Pois é isso que procuro todos os dias, evoluir, seja em conhecimento, trabalho, mas principalmente como ser humano.

Ao longo desses anos de doutorado, agradeço a todas as pessoas que me ajudaram de inúmeras formas: a partir de uma conversa, de uma experiência de trabalho, a participação de uma palestra, um evento científico, a indicação de uma leitura, uma palavra de apoio, uma troca de email e também nas críticas construtivas, essenciais para o crescimento e o desenvolvimento da pesquisa. Em relação as críticas “malosas”, que também fazem parte, uma vez que a vida é um rio sinuoso, cheio de “meandros”, também muito obrigado!! Pois me obrigou a mudar o caminho, a rota, a refletir e seguir o trajeto da realização deste sonho.

Diante desta “pequena” introdução começo o agradecimento ao Programa de Pós Graduação em Geografia Física/USP! Pela sua existência, pelo importante papel de ensino, pesquisa e extensão. Pois mesmo diante de um cenário caótico nos últimos anos, a cada dia está mais forte, estruturado e conceito 6 da CAPES. Parabéns!! A todos os envolvidos!!

Na sequência agradeço a minha orientadora, conselheira e amiga Professora Dra. Bianca Carvalho Vieira, 20 anos de amizade, pois fui aluno de graduação no curso de Geografia da UNESP/Ourinhos em 2003 e depois a orientação no mestrado e doutorado. Gratidão! Respeito! Admiração! Obrigado por tudo Bianca! Das críticas, dos elogios, dos conselhos e também por sugerir a Coorientação com o Professor Dr. Tiago Damas Martins! Gratidão por acreditar no meu potencial e me ajudar em um momento difícil da minha vida pessoal e profissional.

Deste modo agradeço ao Professor Dr. Tiago Damas Martins, ser humano excelente, calmo, sereno, que me ajudou e muito no desenvolvimento da pesquisa! A sua participação foi fundamental! Com palavras de apoio, sugestões e até mesmo as críticas! Pois como já disse faz parte do processo de construção de conhecimento. Muito obrigado Tiago!! Amizade que foi sendo construída ao longo dos anos, com trabalhos de campo, reuniões e até combinados fora da pesquisa como a trilha no Parque Itatiaia/RJ.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de pesquisa concedida, que foi de grande importância para o desenvolvimento da pesquisa! Muito obrigado aos funcionários da Secretaria de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da FFLCH pela atenção prestada. Aos proprietários das fazendas que permitiram a visita e a realização do trabalho de campo, entre eles o Sr. Sebastião e também o Kaká!

Agradeço ao José Eduardo Bonini, doutorando, que me ajudou a conhecer o GRASS, entre outras dúvidas por meio de reuniões, e-mails, etc! Uma pessoa muito prestativa, de enorme potencial! Sucesso sempre! Você merece!!!

Agradeço ao Dr. Carlos Valdir Meneses Bateira, que contribuiu para o conhecimento do SIMWE, por meio de indicação de leituras, e-mails e revisões de mapas. Obrigado Professor!

Aos amigos da Pós Graduação: Luzia, Rebeca, Vivian, Rogério, Maria Rita, Helen, Marco, Rodrigo, Estevão, Carol, Marcos, Camila Capella e principalmente ao Daniel (Cebola) que muitas vezes ofereceu o alojamento do CRUSP! Muito obrigado a todos! Peço desculpas caso tenha esquecido de alguém! Sem nenhuma intenção!

Agradeço ao Éder, Geógrafo, um “irmão” da vida universitária! Que me ajudou nos momentos que o ArcGis me dava problema e dúvidas sobre o programa! Pessoa gente boa! De coração gigante! Extremamente competente! Também destaco o Barretos (Magno) que mesmo longe, sempre me incentivou a fazer o doutorado, “outro irmão” da vida universitária. Duas pessoas que posso contar sempre!!

Aos primos e amigos da jornada da vida: Raul, Marcelo, Renan, Bianca, Gustavo/Santista, Panda, Diego, Renato, Júlio, Valter, Agnaldo, Guilherme, Ana Bomtorin, Talita, Ricardo Orlando, Bruno Lacerra, Professor Héber e Professor Edilson que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para eu chegar nesta conclusão. Também minha consideração ao Danilo, amigo de infância, cara muito gente boa que contribuiu de alguma forma para a conclusão desta etapa.

Em relação a minha família, primeiramente agradeço a minha mãe “Dona Gilda”, que dispensa palavras e que não pôde estudar pela circunstancia da vida. Confesso que no início do processo seletivo não me apoiou a cursar o doutorado, porém aos poucos foi aceitando, observando as minhas conquistas e deve estar muito orgulhosa deste momento. Ao meu pai “Sr. Clementino” que já não está nesta vida, mas que em todos os momentos difíceis me ajudou de alguma forma! Saudades Paizão!!

Minha homenagem a “Tata” / Joana que se foi durante este período de doutorado. Obrigado por contribuir ao meu crescimento pessoal, principalmente na minha infância!

Aos meus irmãos Henrique e Laura que mesmo distante e cada um com o seu jeito de ser me ajudaram de alguma forma! Muito obrigado! E como a família cresceu e muito rs... aos meus sobrinhos Mica (15 anos), Gabriel (13 anos) e a Rafinha (2 anos) amor que foi crescendo ao longo dos anos! Assim como a minha cunhada Bruna pela amizade! Agradecer de forma especial ao Tomas (4 anos), afilhado, que tenho um amor inexplicável, que apenas com a sua presença me tornei uma pessoa melhor, despertou sentimentos que sinceramente desconhecia!

Gratidão pelo apoio do tio e padrinho Antonio (Claret) e da minha tia e madrinha Rose, principalmente pela consideração e amizade! Obrigado! Abraço também a Dona Marlene.

O meu agradecimento à Cinthia (namorada) que está na minha vida há cerca de um ano e seis meses e que tem me apoiado nos meus projetos! A sua presença, o seu jeito de ser, foi muito importante nesta reta final da pesquisa! Obrigado por tudo! Te amo bonitona!!

Por fim, gostaria de terminar dizendo o seguinte para quem está lendo esta pesquisa: que ela incentive, contribua de alguma forma para o seu trabalho, que estimule a realização de novas pesquisas! A ciência tem que estar cada vez mais presente na sociedade, pois ela tem papel fundamental para um país mais desenvolvido, humano e justo! Muito Obrigado à TODOS!!

DANIEL, E (2023). Análise dos processos erosivos e deposicionais utilizando o modelo matemático SIMWE. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, 196p.

RESUMO

Nos últimos anos, houve um avanço no uso de modelos matemáticos, para análise de processos geomorfológicos, os quais, de origem física, aliado às equações e análise estatísticas, expressam as relações e as características da realidade, como o processo de transporte a partir do escoamento superficial e a identificação de áreas suscetíveis associados aos processos erosivos e deposicionais. O modelo SIMWE (*Simulated of Water Erosion*), que considera as propriedades hidrológicas e do solo, destaca-se por ser um modelo dinâmico, de base física, capaz de simular a erosão, o transporte e a deposição por fluxo superficial, em situações complexas do terreno, solo e uso. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo central investigar a capacidade do SIMWE em analisar a ocorrência de erosão e deposição na bacia do Alto Espirado, São Pedro (SP). Deste modo, foram analisadas a sensibilidade dos parâmetros utilizados na geração de cenários de erosão/deposição, mapeamento das feições erosivas numa perspectiva histórica (1962 e 2022) e a validação por meio do Índice Potencial de Erosão (PE) que consiste na razão entre o número de células, de cada classe de erosão e deposição, afetadas pelas feições erosivas e o número total de células dessas mesmas classes. O produto final Balanço da Erosão e Deposição demonstrou que os cenários selecionados geraram valores distintos e representação espacial semelhantes dos processos, com PE entre 8,50% e 28%. A maior parte da bacia foi classificada como área deposicional (valores negativos) entre 65% e 77%, sendo que as áreas erosivas (valores positivos) registraram entre 23% e 36%, situados, sobretudo, nas margens das drenagens e curvaturas côncavas, setores com feições erosivas mapeadas, bem como registros dos maiores valores dos fluxos de sedimentos e hidrológicos superficiais, representados, por “caminhos ou rotas” e, portanto, a precisão do SIMWE em identificar espacialmente os setores mais suscetíveis à erosão. Os parâmetros coeficientes de capacidade de desprendimento e de transporte de sedimentos, tensão de cisalhamento e o coeficiente de Manning apresentaram influência nos resultados, assim como fatores antrópicos observados em campo e não identificados totalmente pelo SIMWE, que provavelmente interferiram na identificação de áreas suscetíveis associadas à ocorrência dos processos erosivos. Diante da dificuldade do emprego da modelagem matemática em terrenos complexos, o SIMWE apresentou resultados satisfatórios para constatar setores erosivos e deposicionais e, portanto, uma importante ferramenta que pode auxiliar administrações públicas, instituições, setores privados, referente ao diagnóstico e prognóstico de áreas complexas.

Palavras Chaves: Modelagem de Erosão Hídrica, SIMWE, Erosão e Deposição.

DANIEL, E (2023). Analysis of erosive and depositional processes using the SIMWE mathematical model. (Thesis). PhD. Graduate Program in Physical Geography. University of São Paulo, 196p.

ABSTRACT

In recent years, there has been an advance in the use of mathematical models for the analysis of geomorphological processes, which, of physical origin, combined with equations and statistical analysis, express the relationships and characteristics of reality, such as the process of transport from the runoff and the identification of susceptible areas associated with erosion and depositional processes. The SIMWE (Simulated of Water Erosion) model, which considers hydrological and soil properties, stands out for being a dynamic model, based on physics, capable of simulating erosion, transport and deposition by surface flow, in complex situations of land, soil and use. In this sense, this work had as main objective to investigate the ability of SIMWE to analyze the occurrence of erosion and deposition in the Alto Espraiado basin, São Pedro (SP). Thus, the sensitivity of the parameters used in the generation of erosion/deposition scenarios, mapping of erosion features in a historical perspective (1962 and 2022) and validation through the Potential Erosion Index (PE) which consists of the ratio between the number of cells, of each class of erosion and deposition, affected by erosion features and the total number of cells of these same classes. The final product Balance of Erosion and Deposition showed that the selected scenarios generated different values and similar spatial representation, with PE between 8.50% and 28%. Most of the basin was classified as a depositional area (negative values) between 65% and 77%, and erosive areas (positive values) registered between 23% and 36%, located mainly on the margins of drainages and concave curvatures, sectors with mapped erosion features, as well as records of the highest values of sediment and surface hydrological flows, represented by “paths or routes” and, therefore, the accuracy of SIMWE in spatially identifying the sectors most susceptible to erosion. The parameters coefficients of sediment release and transport capacity, shear stress and Manning's coefficient influenced the results, as well as anthropic factors observed in the field and not fully identified by SIMWE, which probably interfered in the identification of susceptible areas associated with the occurrence of erosion processes. Faced with the difficulty of using mathematical modeling in complex terrains, the SIMWE presented satisfactory results to verify erosional and depositional sectors and, therefore, an important tool that can help public administrations, institutions, private sectors, referring to the diagnosis and prognosis of complex areas.

Keywords: Water Erosion Modeling, SIMWE, Erosion and Deposition.

Lista de Figuras

Figura 1: Registro de erosão laminar em área rural do município de São Pedro (SP).....	9
Figura 2: Registro de ocorrência de feições erosivas lineares no município de São Pedro (SP). (A) Feição erosiva linear ramificada. (B) Feição erosiva linear profunda e retilínea.	10
Figura 3: Relação das classes de erosão e declividade (Adaptado de LEOPOLD <i>et al.</i> , 1995).	14
Figura 4: Representação das combinações geométricas básicas, em função das associações de formas lineares, côncavas e convexas eventualmente encontradas numa encosta. Fonte: Modificado de Ruhe (1975).....	15
Figura 5: Relação entre o valor da taxa de perda de solo (SLR) e a porcentagem de cobertura vegetal na superfície do solo (PC). SLR é a razão entre a perda de solo com a cobertura vegetal e o solo exposto; PC é a porcentagem da cobertura vegetal com o J (variação de valores) que possui entre 0,01 e 0,035 (média natural). Nota-se que o aumento da porcentagem da cobertura vegetal reduz proporcionalmente a perda de solo (Adaptado de MORGAN, 2005).....	17
Figura 6: Relação entre produção de sedimentos e precipitação média anual. Nota-se que as oscilações e portanto, a redução perda de solo estão relacionadas com o aumento proteção da cobertura vegetal, que a partir da maior intensidade da precipitação volta a ocorrer a perda de solo (Adaptado de MORGAN, 2005).....	18
Figura 7: Coeficiente de variação da produção anual de sedimentos em suspensão versus precipitação média anual para dados globais. Nota-se que não há uma relação clara entre as duas variáveis, porém uma forma parabólica, sugerindo que a variabilidade máxima pode ocorrer em áreas semi-áridas e em áreas de alta precipitação (Adaptado de HADLEY <i>et al.</i> , 1985).....	21
Figura 8: Taxa de infiltração associada à classificação do solo (Adaptado de MORGAN, 2005).	22
Figura 9: Taxas de infiltração em solo franco-arenoso e argila. Nota-se que a taxa de infiltração da argila é de cerca de 0,04 polegadas por hora, a do franco arenoso 0,9. A lama contém apenas 6% de tamanhos de argila (mais finos que 0,002 mm) sendo que a argila contém 63% (Adaptado de LEOPOLD <i>et al.</i> , 1995).....	23
Figura 10: Taxa de infiltração de acordo com as características do solo. A seta tracejada indica o nível de K_{sat} o solo franco-siltoso (Adaptado de LEOPOLD <i>et al.</i> , 1995).	24
Figura 11: Registro de processos erosivos em 2022 e 2023 na bacia do Alto Espraiado - São Pedro (SP). (A) Prática conservacionista com o plantio de bambu para conter a erosão remontante. (B) Feições erosivas lineares avançadas - voçorocas. (C) Feições erosivas intermediárias, sulcos erosivos (seta vermelha) e ravinamento próximo da árvore. (D) Registro de afluente assoreado.....	26
Figura 12: (A) Localização do estado de São Paulo no território brasileiro. (B) Posição do município de São Pedro no estado de São Paulo. (C) Bacia do Alto Espraiado no município de São Pedro. (D) Bacia do Alto Espraiado.	27
Figura 13: Vista periférica registrada do topo da cuesta e ao fundo a cidade de São Pedro (SP).	30

Figura 14: (A) Vista periférica da montante da bacia do alto Espraiado registrada do topo da <i>cuesta</i> . (B) Vista em maior detalhe a montante da bacia.....	30
Figura 15: Registro do fundo plano na bacia do alto Espraiado. (A) Canal principal e assoreado, com vale amplo, suave e ausência de cobertura vegetal original. (B) Fundo plano assoreado em afluente da bacia.	31
Figura 16: (A) Vista da montante do alto espraído e ao fundo da <i>Cuesta</i> de São Pedro (SP). (B) Em maior detalhe o fundo fechado e encaixado do canal principal.....	31
Figura 17: Perfil de Neossolo Quartzarênico (segmento superior) desenvolvido sobre o arenito Pirambóia. Nota-se a sequência de horizontes A, AE e E com bandas, além da sucessão de bandas onduladas e interbandas, sendo que as bandas são mais espessas e mais avermelhadas em profundidade (FURQUIM, 2002).....	33
Figura 18: (A) Perfil situado no alto da bacia do Araquá. (A) Neossolo Litólico desenvolvido sobre blocos de basalto depositados na base da escarpa da serra de São Pedro (SP). (B) Neossolo Litólico desenvolvido sobre folhelhos da Formação Corumbataí (PINHEIRO, 2009).....	34
Figura 19: Perfil de Latossolo Vermelho argiloso, desenvolvido sobre a formação Itaqueri do mesmo compartimento geomorfológico (PINHEIRO, 2009).....	35
Figura 20: Perfil de Neossolo Flúvico e Gleissolos. Nota-se alternância de camadas de material orgânico na planície fluvial do Araquá do mesmo compartimento geomorfológico (PINHEIRO, 2009).....	36
Figura 21: Distribuição pluviométrica anual. Fonte: FEHIDRO (2000); CIAGRO (2022).	38
Figura 22: Registro de ocorrência de feições erosivas em 2022 e 2023 na bacia do córrego Espraiado.	40
Figura 23: Mapa das feições erosivas do cenário de 1962. Fonte: Daniel e Vieira (2015)....	41
Figura 24: Mapa das feições erosivas do cenário de 2006/2013. Fonte: Daniel e Vieira (2015).	41
Figura 25: Mapas de uso do solo e das feições erosivas nos cenários de 1962, 1972, 2000 e 2020. Fonte: Adaptado de Daniel <i>et al.</i> , (2021).	43
Figura 26: Valores dos índices de PE de acordo com as classes de uso do solo em todos os cenários. Fonte: Adaptado de Daniel <i>et al.</i> , (2021).....	43
Figura 27: Exemplo de representação espacial de suscetibilidade gerado pelo Modelo USLE. Fonte: Adaptado de COSTA (2016).....	46
Figura 28: Exemplo de representação espacial de perda de solo na bacia Marqya/Síria a partir da utilização do modelo RUSLE. Fonte: Adaptado de Abdo e Salloum (2017).	48
Figura 29: Etapas do processo de simulação de uma bacia hidrográfica pelo WEPP. Fonte: Adaptado de FLANAGAN <i>et al.</i> , (2000).	49
Figura 30: Fluxograma do modelo GeoWEPP. Fonte: Adaptado de Renschler (2003).....	51
Figura 31: Exemplo de utilização do Modelo SWAT e o método e a forma de espacialização de produção de sedimentos representado na bacia do Rio Taperoá/PB para o período de 1973 a 1990. Fonte: Adaptado de Dantas <i>et al.</i> , (2015).....	52
Figura 32: Espacialização das perdas de solo na sub- bacia do horto florestal Terra Dura. Adaptado de Silva <i>et al.</i> , (2015).....	56

Figura 33: (A) Perdas de solo no modelo RUSLE e (B) Perdas de solo no modelo EPM. Fonte: Adaptado de Tavares <i>et al.</i> (2017).....	57
Figura 34: Espacialização das taxas de perda de solo (nas classes de uso do solo) na Bacia do Córrego do Gigante. Fonte: Adaptado de Ferreira <i>et al.</i> (2021).	59
Figura 35: Representação espacial de perda de solo da bacia hidrográfica do rio Jundiaí-Mirim. Fonte: Adaptado de Toniolo <i>et al.</i> (2021).	60
Figura 36: Modelos de erosão em ordem de complexidade: A) USLE com o comprimento da encosta; B) USLE modificada e o ângulo da encosta; C) USPED e a erosão e deposição; D) SIMWE considerando a erosão e deposição (Adaptado de MITASOVA <i>et al.</i> , 2001).	64
Figura 37: Estrutura dos módulos: fluxo hidrológico superficial (<i>r.sim.water</i>) e fluxo de sedimentos (<i>r.sim.sediment</i>). Adaptado de Fernandes (2014).....	65
Figura 38: Exemplo de solução da Equação de <i>Saint Venant</i> com o método de amostragem. Densidade de pontos dispostos sobre um MDE representa a profundidade da água em evolução sob cobertura variável do solo e condições topográficas (apenas 20% das partículas são mostradas) (Adaptado de HOFIERKA <i>et al.</i> , 2002).	67
Figura 39: Aplicação do método de amostragem: (A) Área exposta em vermelho; (B) Desprendimento do solo representado pelas partículas, onde a densidade é maior em solo exposto; (C) Taxa de fluxo de sedimentos em função da densidade de partículas e o <i>grid</i> ; (D) Balanço da erosão e deposição em função do fluxo de sedimentos (Adaptado de MITASOVA <i>et al.</i> , 2013).....	68
Figura 40: Exemplo de aplicação do módulo <i>r.sim.water</i> numa determinada área a partir de dados de solo e chuva, com a saída na forma de uma série temporal de mapas (A e B) Evolução do fenômeno modelado (Adaptado de HOFIERKA <i>et al.</i> , 2009).	70
Figura 41: Simulação do modelo SIMWE referente ao impacto da taxa de excesso de precipitação de (A) 36mm/h e (B) 72mm/h numa determinada bacia hidrográfica. Nota-se o aumento da taxa de erosão e deposição proporcional ao aumento do excesso de precipitação, mas sem alteração no padrão espacial (Adaptado de MITASOVA <i>et al.</i> , 1997).....	71
Figura 42: Exemplo de simulação do modelo SIMWE referente ao impacto da rugosidade da superfície. A) $n = 0,01$ (superfície lisa); B) $n = 0,10$ (superfície rugosa) numa determinada bacia hidrográfica (Adaptado de MITASOVA <i>et al.</i> , 1997).....	73
Figura 43: Exemplo de produto final (mapa) profundidade de água e destaque para a distribuição das feições erosivas (ponto preto) a partir da aplicação do modelo SIMWE na região demarcado do Douro/ Portugal (Adaptado de BATEIRA, 2020).	75
Figura 44: Exemplo de produto final (mapa) fluxo (vazão) de água, a partir da aplicação do modelo SIMWE na região demarcado do Douro/Portugal em relação com a ocorrência de ravinhas e sulcos erosivos (Adaptado de FERNANDES, 2014).	76
Figura 45: Exemplo de aplicação do método de amostragem para a profundidade da água (h) usando a dualidade entre a representação de partículas e o campo: A) profundidade da água em 1 minuto; B) profundidade da água após 24 minutos (Adaptado de MITASOVA e MITAS, 2001).....	78

Figura 46: Velocidade da erosão dos terrenos em função da sua granulometria (Adaptado de NASCIMENTO, 1952).....	80
Figura 47: Exemplo de produto final (mapa) da capacidade de transporte de sedimentos do modelo SIMWE numa determinada bacia hidrográfica na Região Demarcada do Douro//Portugal. Nota-se que as feições erosivas (ponto preto) estão em grande parte situadas na segunda maior classe 3,18 a 10,63 kg/m.s (Adaptado de BATEIRA, 2020).....	81
Figura 48: Simulação do modelo SIMWE referente à tensão crítica de cisalhamento (resistência do solo) ao impacto das forças de cisalhamento do fluxo da água numa determinada bacia hidrográfica. (A) Valor = 3 as taxas de erosão possuem maior extensão espacial e a deposição concentra nas áreas de fluxos concentrados. (B) Valor = 7 as taxas de erosão atuam nas encostas e áreas com fluxos concentrados e, portanto, uma redução significativa da extensão espacial da erosão (Adaptado de MITASOVA <i>et al.</i> , 1997).....	82
Figura 49: Distribuição espacial da velocidade do fluxo de sedimentos (visualizado como uma superfície) e a erosão/deposição (coberto como um mapa de cores sobre o MDE). (A) Valor baixo próximo a 0,001, com a capacidade de desprendimento (D_c) menor que a capacidade de transporte (T_c) e a erosão é limitada pelo desprendimento e não ocorre deposição. (B) Valor alto próximo de 100, capacidade de desprendimento (D_c) maior que a capacidade de transporte (T_c) e a erosão é limitada pelo transporte, ocorrendo a deposição (Adaptado de MITASOVA <i>et al.</i> , 2013).....	83
Figura 50: Exemplo de produto final (mapa) concentração de sedimentos (partículas/m ³) do modelo SIMWE numa determinada bacia hidrográfica na região demarcada do Douro/Portugal (Adaptado de BATEIRA, 2020).....	86
Figura 51: Exemplo de mapa final de erosão/deposição simulada pelo modelo SIMWE. Destaca-se o aumento da ravina regressivamente a partir da 3 ^a (a), 5 ^a (b) e 7 ^a (c) interação, como também os valores de erosão/deposição no fundo do fluxo concentrado de uma determinada bacia na Eslováquia (Adaptado de KOCO, 2011).....	87
Figura 52: Fluxograma correspondente às Etapas Metodológicas da Pesquisa.	88
Figura 53: Carta de Declividade da bacia do Alto Espraiado e a distribuição das feições erosivas mapeadas nos cenários de 1962 (polígonos pretos) e 2022 (polígonos vermelhos)...	90
Figura 54: Carta de Curvatura da bacia do Alto Espraiado e a distribuição das feições erosivas mapeadas nos cenários de 1962 (polígonos pretos) e 2022 (polígonos em preto tracejado)....	91
Figura 55: Caracterização pedológica da bacia do Alto Espraiado e a distribuição das feições erosivas mapeadas nos cenários de 1962 (polígonos preto) e 2022 (polígonos vermelho). Adaptado de Furquim (2002).	92
Figura 56: Distribuição espacial dos materiais inconsolidados e a distribuição das feições erosivas mapeadas nos cenários de 1962 (polígonos em preto) e 2022 (polígonos em vermelho). Adaptado de Yamanouth (2003).	93
Figura 57: Levantamento pluviométrico do município de São Pedro (SP). As datas referem-se aos registros de precipitação maiores que 80mm durante o período de 1942 a 2011. Fonte: SIGRH (2011).	94

Figura 58: Distribuição do excedente hídrico (> 100 mm) acumulado no período de 2000 a 2019 no município de São Pedro (SP), e portanto, constam apenas as datas neste período, com volume superior a 100mm. Fonte: CIIAGRO (2022).....	95
Figura 59: Distribuição do déficit hídrico (> 25 mm) acumulado no período de 2000 a 2019 no município de São Pedro (SP). Fonte: CIIAGRO (2022).	96
Figura 60: Distribuição do déficit hídrico a partir de > 10mm durante o período de 2017 e 2018 no município de São Pedro (SP). Fonte: CIIAGRO (2022).	97
Figura 61: Localização das duas estações pluviométricas DAEE e IAC em relação à bacia hidrográfica do Alto Espraiado.....	99
Figura 62: Mapa das feições erosivas, destacados pelos polígonos amarelos (cenário de 1962) e vermelhos (cenário de 2022). Adaptado de Daniel e Vieira (2015).....	104
Figura 63: Registro de feições erosivas na bacia do alto Espraiado em diferentes estágios, as quais estão numeradas de acordo com a Figura 62 (anterior). A número 1 em destaque a linha vermelha que representa o limite da feição. A feição número 2 (feição erosiva em estágio avançado - voçoroca) e as feições número 3 e 4 (feição erosiva em estágio intermediário - ravina).....	105
Figura 64: Espacialização do balanço de erosão e deposição com as feições erosivas (1962 e 2022) sobrepostas para os quatro cenários.....	108
Figura 65: Feição erosiva (delimitada em vermelho) identificada pelo Modelo SIMWE e validada <i>in loco</i> . Situada em curvatura côncava, presença de canais intermitentes (em azul tracejado) no seu interior.	109
Figura 66: Área da bacia distribuída pelas classes de erosão e deposição. Nota-se que o cenário 1 registrou a maior área suscetível (erosão) com 36% e os demais com cerca de ~ 25%.....	110
Figura 67: Registro da prática de pastagem em área circundante da feição erosiva.	115
Figura 68: Maiores valores de erosão para as quatro simulações. Cenário 1, 2, 3 e 4: Taxa de Excesso de Precipitação (190mm/h), Coeficiente de <i>Manning</i> (0.035n; 0.035n; 0.079n; valor nulo); Taxa de Infiltração (12 mm/h; 12 mm/h; 4mm/h; 4 mm/h), Permeabilidade (0.0048cm/s; 0.0048cm/s; 0.00024cm/s; 0.00024cm/s), Coeficiente capacidade de desprendimento (0.7 s/m; 0.001 s/m; valor nulo e valor nulo), Coeficiente capacidade de transporte de sedimentos (0.6s; 0.001s; valor nulo e valor nulo), Tensão de Cisalhamento (valor nulo; 0.5pa; valor nulo e valor nulo).....	117
Figura 69: Em maior detalhe a espacialização do balanço de erosão e deposição do Cenário 1 com as feições erosivas (1962 e 2022) sobrepostas. Destaque para as feições ilustradas que o modelo SIMWE identificou como áreas suscetíveis (erosão).....	119
Figura 70: Representação em maior detalhe da espacialização do Balanço de Erosão e Deposição do Cenário 2 com a sobreposição das feições erosivas (1962 e 2022).....	121
Figura 71: Representação em maior detalhe da espacialização do Balanço de Erosão e Deposição do Cenário 3 com a sobreposição das feições erosivas (1962 e 2022).....	123
Figura 72: Representação em maior detalhe da espacialização do Balanço de Erosão e Deposição do Cenário 4 com a sobreposição das feições erosivas (1962 e 2022).....	124

Figura 73: Exemplo de produtos de saída do módulo fluxo de água superficial. (A) Mapa da descarga (fluxo) de água (m ³ /s) e (B) Mapa da Profundidade de água (m), ambos no setor a montante da bacia do alto Espraiado com as cinco classes (Figura sem escala).....	125
Figura 74: Exemplo de produtos de saída do módulo fluxo de sedimentos do setor a montante da bacia do alto Espraiado. (A) Concentração de Sedimentos (partículas/m ³) e (B) Fluxo de Sedimentos (kg/m.s) (Figura Sem Escala).	125
Figura 75: Espacialização do fluxo superficial (m ³ /s) com as feições erosivas de 1962 (polígono preto) e 2022 (polígono vermelho) sobrepostas para os quatros cenários.	128
Figura 76: Valores máximos de fluxos superficiais (m ³ /s) para os quatros cenários.	129
Figura 77: Distribuição e correlação das feições erosivas (1962 e 2022) com as classes de Fluxos Superficiais nos quatros cenários.	131
Figura 78: Vista a partir do <i>front</i> de parte da bacia do alto Espraiado. Nota-se as drenagens perenes (linha azul) e também os fluxos superficiais (linhas tracejadas) em que o modelo SIMWE classificou como áreas suscetíveis (seta em vermelho). Figura sem Escala.	131
Figura 79: Espacialização da Profundidade do Fluxo (m) com a sobreposição das feições erosivas de 1962 (polígono preto) e 2022 (polígono vermelho) para os quatros cenários.	133
Figura 80: Registro dos valores máximos de profundidade do fluxo para os quatros cenários.	134
Figura 81: Distribuição e correlação das feições erosivas (1962 e 2022) com as classes de Profundidade de Fluxo (m) para os quatros cenários.	135
Figura 82: Espacialização da Concentração de Sedimentos (partículas/m ³) com a sobreposição das feições erosivas de 1962 (polígono preto) e 2022 (polígono vermelho) para os quatros cenários.	137
Figura 83: Valores máximos de concentração de sedimentos para os quatros cenários.	138
Figura 84: Distribuição e correlação das feições erosivas com as classes de concentração de sedimentos (partículas/m ³) nos quatros cenários.	139
Figura 85: Espacialização do fluxo de sedimentos (kg/m.s) com a sobreposição das feições erosivas de 1962 (polígono preto) e 2022 (polígono vermelho) nos quatros cenários.	140
Figura 86: Valores máximos de fluxo de sedimentos obtidos para os quatros cenários.	142
Figura 87: Distribuição e correlação das feições erosivas com as classes de Fluxo de Sedimentos para os quatros cenários.	144
Figura 88: Potencial de Erosão de acordo com as classes do balanço da erosão e deposição nos quatros cenários.	145
Figura 89: Vista parcial da Bacia do Alto Espraiado com os apontamentos dos diferentes usos do solo e registro de processos erosivos. No lado esquerdo superior consta o mapa (sem escala) com o ponto de localização deste setor da bacia.	146

Lista de Tabelas

Tabela 1: Componentes do meio ambiente que afetam o ciclo de sedimentos.	7
Tabela 2: Sistema de classificação e avaliação de processos erosivos.	8
Tabela 3: Taxa de Erosão e Volume de Material Erodido.	11
Tabela 4: Relação do uso e ocupação do solo x erosões.	19
Tabela 5: Dados dos perfis de solo, nos quais foram detectados “ <i>piping</i> ” com colapso de teto.	25
Tabela 6: Total Pluviométrico Mensal.	39
Tabela 7: Exemplo de modelos utilizados para estimativa de erosão em bacias hidrográficas.	47
Tabela 8: Exemplo de modelos matemáticos quanto às escalas e limitações.	53
Tabela 9: Exemplos de modelos empregados em estudos realizados no Brasil.	61
Tabela 10: Valores para n de Manning.	73
Tabela 11: Grupos de solos reunidos de acordo com suas qualidades e características.	100
Tabela 12: Parâmetros empregados e os dados de entradas dos cenários.	102
Tabela 13: Polígonos e área das feições erosivas dos Cenários de 1962 e 2022.	104
Tabela 14: Intervalos das classes do mapa final Balanço de Erosão e Deposição.	111
Tabela 15: Distribuição da área da bacia e das feições erosivas com a declividade.	113
Tabela 16: Exemplos de trabalhos e as respectivas resoluções espaciais realizadas com o emprego do modelo SIMWE, os quais estão organizados em ordem cronológica.	148

Lista de Equações

Equação 1	45
Equação 2	50
Equação 3	62
Equação 4	63
Equação 5	105

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO/JUSTIFICATIVA.....	1
2. HIPÓTESE / PERGUNTA DA TESE E OBJETIVOS.....	6
3. PROCESSOS EROSIVOS E DEPOSICIONAIS	7
3.1 Influência da Litologia, Solos e do Relevo.....	11
3.2 Influência do Uso do Solo	16
3.3 Influência das Chuvas.....	19
4. ÁREA DE ESTUDO	26
4.1 Geologia	28
4.2 Geomorfologia.....	29
4.3 Solos	31
4.4 Características Climáticas / Pluviométricas	37
4.5 Feições Erosivas	39
4.6 Uso do Solo	42
5. MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA.....	44
5.1 Modelos usados para erosão hídrica no Mundo	44
5.2 Modelos usados para erosão hídrica no Brasil	54
6. MODELO SIMWE.....	62
6.1 Módulo dos fluxos hidrológicos superficiais (<i>r.sim.water</i>).....	65
6.2 Módulo dos fluxos de sedimentos (<i>r.sim.sediment</i>)	77
7. MATERIAIS E MÉTODOS.....	88
7.1 Dados topográficos	89
7.2 Características pedológicas.....	91
7.3 Dados Pluviométricos.....	93
7.4 Levantamentos dos Parâmetros de Entrada	97

7.4.1 Módulo Fluxo Superficial (<i>r.sim.water</i>).....	98
7.4.2 Módulo Fluxo de Sedimentos (<i>r.sim.sediment</i>).....	101
7.5 Simulação dos Cenários: Erosão/Deposição	101
7.5.1 Feições Erosivas em São Pedro/SP	103
7.5.2 Validação do Modelo SIMWE	105
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	107
8.1 Simulação	107
8.2 Análise dos Cenários de Erosão e Deposição.....	109
8.3 Análise dos Produtos Intermediários.....	125
8.3.1. Fluxo Hidrológico Superficial (m ³ /s)	126
8.3.2. Profundidade do Fluxo (m).....	132
8.3.3 Concentração de sedimentos (partículas/m ³).....	135
8.3.4. Fluxo de Sedimentos (kg/m.s).....	139
8.4 Validação do Modelo SIMWE / Cenários.....	144
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
REFERÊNCIAS	153

1. INTRODUÇÃO/JUSTIFICATIVA

Há diversas consequências decorrentes do transporte de sedimentos no sistema fluvial que afetam a dinâmica ambiental no contexto global, como o assoreamento das rede de drenagem e dos reservatórios de água, alterações das formas de relevo, degradação das condições agrícolas e de obras de engenharia que podem estar associadas aos processos erosivos (BRADY, 1989; SELBY, 1993; MORGAN, 2005). Ressalta-se que a evolução dos processos erosivos são inerentes às características do meio físico (o solo, a morfologia, a cobertura vegetal, o vento, a litologia, a energia cinética das chuvas) e das ações antrópicas, portanto, fatores determinantes para a análise e compreensão da dinâmica dos processos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008; LABADESSA, 2014; WANG *et al.*, 2018).

Deste modo, o estudo da relação entre os processos e as formas está no âmago da Geomorfologia, na prática como causa e efeito, visto que o conhecimento da forma auxilia a compreensão dos processos e os estudos sobre os processos contribuem para entender a gênese e a evolução das formas (CHORLEY, 1971). Ressalta-se que tais processos possuem comportamento diferenciado conforme a variação regional da paisagem, pois ao mudar as dimensões do tempo e do espaço, também alteram as relações múltiplas causais e o sistema morfogenético associado (CRUZ, 1985; CANIL, 2000; ALMEIDA FILHO *et al.*, 2016; MOMOLI e COOPER, 2016).

As investigações das causas dos processos erosivos podem ser realizadas a partir da avaliação conjunta dos parâmetros, como os geológicos, pedológicos, climáticos, morfológicos, morfométricos e antrópicos (TORRI, 1996; BRAIMOH e VLEK, 2007; BRADY e WEIL, 2013), os quais oferecem condições para a utilização de diferentes métodos, desde medições da erosão, tais como: aplicação e inserção vertical de estacas e pinos de madeira ou ferro distribuídos nos taludes da erosão como forma de mensurar a dinâmica do processo a partir do grau de exposição das marcações (CASADO *et al.*, 2002; BORGES, 2004; CORREA e SOUZA FILHO, 2009; SOBRINHO *et al.*, 2016), a dendrogeomorfologia que relaciona os anéis de crescimento das árvores com processos geomorfológicos e a possibilidade da reconstrução cronológica e ocorrência dos processos erosivos a partir da utilização de raízes expostas (CASTILHO, 2016; JAKIEL e WALACH, 2018).

Com o avanço tecnológico, houve também a possibilidade da análise da erosão por meio de outras ferramentas como aplicação do laser (MORAES, 2016), da regressão logística

(AKGUN e TURK, 2011), da análise orientada a objeto *OBIA (Object Based Image Analysis)* com o apoio de uma classificação hierárquica, do método semi automatizado com parâmetros previamente investigados (TEDESCO *et al.*, 2014) e, por fim as abordagens a partir de modelos matemáticos (CONOSCENTI *et al.*, 2014), que tem o seu início com o trabalho de Chorley e Haggett (1967) e, posteriormente no Brasil com Christofolletti (1999).

A quantidade significativa de perdas de solos no Brasil evidencia a necessidade do desenvolvimento de pesquisas a partir de modelos matemáticos para prever e quantificar a erosão, pois contribui para a localização de áreas suscetíveis e possibilita a comparação de resultados alcançados (PEREIRA, 2014). Os modelos de erosão e transporte de sedimentos são projetados para incluir a descrição probabilística da hidrologia, as características físicas da bacia hidrográfica e a estrutura estocástica das propriedades do solo (AKSOY e KAVVAS, 2005).

No âmbito da ciência a definição de modelos matemáticos é controverso, entretanto, há algumas sugestões na literatura, exemplo: uma hipótese, uma teoria, uma idéia estruturada, uma descrição de um fenômeno em termos matemáticos, uma fórmula, uma função, uma relação, uma Equação, uma versão simplificada da realidade, uma síntese de dados, entre outros (CHORLEY e HAGGETT, 1974; MINSHULL, 1975; VIEIRA e MARTINS, 2016).

No campo da Geografia Física, a modelagem vem sendo muito utilizada como ferramenta de análise e previsões de comportamentos, seja de cenários futuros ou pretéritos, nas mais variadas escalas espaciais e temporais. Neste sentido, os modelos matemáticos de origem física, aliados as equações e análise estatísticas, expressam as relações e características da realidade, exemplificadas pela relação ao processo de transporte (ex: escoamento superficial) e a identificação de áreas suscetíveis (ex: feições morfológicas) (FERNANDES, 2016).

Os modelos, uma vez comprovada a sua Equação e confiabilidade, são capazes de avaliar diferentes cenários sem necessidade de testes de campo, normalmente custosos e demorados (AKSOY e KAVVAS, 2005). Em vista disso, a aplicação dos modelos de erosão tem ocorrido de forma interdisciplinar e com previsões mais próximas da realidade (MITASOVA *et al.*, 2013). Tal situação está associada com a entrada de dados mais precisos e de maior detalhe, condições essenciais para a construção e implementação de um modelo mais dinâmico que refletem os processos geomorfológicos (GROHMANN *et al.*, 2011; DYMOND e VALE, 2018).

Ressalta-se que uma das principais limitações associadas ao uso de modelo de erosão é a falta de dados para validação, especialmente em grandes bacias hidrográficas, embora alguns autores sugiram como alternativa para a validação dos estudos o uso da correlação dos resultados da erosão modelada com fatores: cobertura e manejo do solo, erodibilidade do solo, produção de sedimentos, declividade (ABDULKAREEM *et al.*, 2021), destaca-se que nem sempre os modelos com grande número de parâmetro alcançam o melhor resultado que os modelos com número limitado de parâmetros (PANDEY *et al.*, 2016).

Carvalho (2019) explica que os modelos de bases físicas são utilizados em estudos onde existe uma clara relação de causa - efeito, os quais atuam nas mais variadas áreas científicas como a Física, a Hidrologia e Hidráulica, podendo seus produtos serem representados através de mapas (especialização dos processos). O mesmo autor enfatiza que a entrada de valores específicos referente aos parâmetros do modelo, a possibilidade de definir a escala temporal dos processos erosivos, a condição de introduzir valores de precipitação associados a eventos considerados excepcionais, maior precisão do efeito sobre o processo erosivo (definição dos limiares críticos de precipitação), são informações que contribuem para identificar e classificar os setores mais suscetíveis da área em análise (CARVALHO 2019).

A evolução na qualidade dos resultados da modelagem erosiva também está associada a utilização e contribuição do Sistema de Informação Geográfica (SIG), assim como o desenvolvimento de novos modelos de avaliação da erosão, tais como a Equação Universal de Perda de Solo (USLE), uma das mais conhecidas e utilizadas e que derivou uma série de outros modelos de base empírica, exemplificados pela RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) e a MUSLE (*Modification Universal Soil Loss Equation*) (WISCHMEIER e SMITH, 1978; LEITE, 2009; PEREIRA, 2014; DANTAS *et al.*, 2015; ABDO e SALLOUM, 2017).

O modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) desenvolvido por Flanagan e Nearing (1995), também é bastante usado na literatura e que determina as taxas de erosão e de deposição de sedimentos a partir de equações relacionadas às teorias de infiltração, física do solo, hidráulica, mecânica da erosão e fisiologia vegetal (PEREIRA, 2014).

Ressalta-se trabalhos que têm aplicado o WEPP em ambiente SIG (GeoWEPP) (FLANAGAN *et al.*, 2007), que além de realizar a predição de erosão geo-espacial, superando as limitações do WEPP, permite o processamento de dados digitais com o MDE (Modelo Digital de Elevação), ortofotos, levantamentos de solos, mapas de uso do solo e dados de

agricultura de precisão (ARNOLD e ALLEN, 1996; MACHADO *et al.*, 2003). Outro exemplo é o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), desenvolvido por Arnold e Allen (1996), pois oferece dados geoespaciais, promove a leitura e armazenamento de dados referentes ao clima, solos e uso do solo, sendo uma ferramenta desenvolvida para prever o manuseio do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos, carga de poluentes e qualidade da água em bacias hidrográficas por períodos diários ou até longos períodos (ARNOLD e ALLEN, 1996; CARVALHO, 2014; SILVA, 2015).

Também merece destaque o TOPMODEL (*Topography Based Hydrological Model*) desenvolvido por Beven e Kirkby (1979), que consiste na ideia de que a topografia e as características do solo exercem um controle determinante sobre o escoamento em bacias hidrográficas. Tal modelo oferece produtos finais associados à vazão do rio e a distribuição espacial da umidade no sistema (zonas saturadas e áreas secas) ao longo do tempo (VARELLA e CAMPANA, 2000; SANTOS, 2001).

De forma geral, a execução dos modelos de erosão em ambiente SIG ocorrem por meio de comandos (entradas e saídas), *script*/roteiro, operações, embora esta integração necessite cuidado para não gerar uma dependência excessiva com o desenvolvimento e o destino do SIG. Pois as mudanças nas estruturas (funcionalidade, interface, bibliotecas ou ferramentas de programação), exigem automaticamente mudanças nos modelos, que geralmente são demoradas ou os mesmos tornam-se incompatíveis com a recente versão do *software* (MITASOVA *et al.*, 1996; MITASOVA *et al.*, 1997; MITASOVA *et al.*, 2013).

A partir desta abordagem foi desenvolvido o modelo SIMWE (*Simulated of Water Erosion*) empregado para esta pesquisa. Trata-se de um modelo dinâmico de base física projetado por Mitas e Mitasova (1998), que tem a capacidade de simular a erosão, o transporte e a deposição por fluxo superficial, sendo que seus parâmetros de entrada consistem no modelo de erosão de encostas WEPP, o qual pode ser aplicado em condições complexas (alterações antrópicas) do terreno, solo e tipo de cobertura (MITAS e MITASOVA, 1998; KOCO, 2011).

Assim sendo, esta pesquisa foi estruturada e definida, inicialmente, sua Hipótese e seus Objetivos (Capítulo 2) que buscou determinar suas questões norteadoras. Na sequência (Capítulo 3), apresenta-se uma revisão teórica acerca dos fatores condicionantes e a classificação dos processos erosivos. Posteriormente no Capítulo 4 é apresentada a área de

estudo, a partir do município de São Pedro (SP) e as características de sua representatividade erosiva.

No capítulo 5 apresenta-se uma revisão dos modelos de erosão hídrica empregados no mundo e no Brasil, como conceituações, aplicações e resultados. Neste sentido o Capítulo 6 apresenta detalhadamente a estrutura e operacionalização do Modelo SIMWE, exemplificado pelos parâmetros considerados, sensibilidade e avanço de tal modelo em relação aos demais.

No capítulo 7 são definidos os Materiais utilizados e os Métodos adotados, sendo que primeiramente, tratou-se da preparação da base cartográfica e a construção do Modelo Digital de Elevação (MDE), seguido pela elaboração e análise dos parâmetros morfométricos (declividade e curvatura), posteriormente, a organização e avaliação dos parâmetros físicos do solo e chuva, assim como o conjunto de dados que serviu para a atualização do mapa de feições erosivas, sendo este um produto essencial para a validação dos resultados obtidos a partir da aplicação do SIMWE.

No capítulo 8 apresenta os resultados obtidos por esta pesquisa, inicialmente avaliou-se os cenários testados, que consistiu nos dados topográficos, de solo e chuva e a discussão com a literatura e o processo de validação das feições erosivas mapeadas.

Em suma, a pesquisa foi executada contemplando as seguintes etapas: a primeira refere-se ao levantamento dos parâmetros físicos (topografia, solo e chuva) para a aplicação do SIMWE na bacia analisada. Segundo foi avaliado a influência dos parâmetros do SIMWE para análise da dinâmica erosiva e deposicional. A etapa final se constituiu pelo processo de validação a partir da aplicação do índice Potencial de Erosão (PE) para avaliação das diferentes respostas do modelo considerando os diferentes dados para a geração do produto final “Balanço da Erosão e Deposição”. Por fim, o capítulo 9 trata-se das considerações finais com os apontamentos da pesquisa, como observações, análises, conclusões e textos finais.

2. HIPÓTESE / PERGUNTA DA TESE E OBJETIVOS

A hipótese desta pesquisa é afirmar que o modelo SIMWE é adequado para análise dos processos de erosão e deposição em ambiente tropical úmido, demonstrando o seu potencial para o diagnóstico e prognóstico de áreas suscetíveis a processos erosivos.

A pergunta desta pesquisa consiste na seguinte investigação/questão: o emprego dos parâmetros do modelo SIMWE e conseqüentemente a simulação de cenários para ambiente tropical úmido oferece condições adequadas para análise e avaliação dos processos de erosão e deposição?

Diante deste contexto, o objetivo central foi avaliar a dinâmica dos processos erosivos e deposicionais por meio do modelo matemático hidrológico SIMWE que simula o efeito da erosão e da deposição. Para alcançar o objetivo central, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar a dinâmica dos fluxos superficiais e subsuperficiais por meio da modelagem do terreno.
- b) Indicar os principais parâmetros a partir de simulações que podem influenciar nas taxas de erosão e deposição da bacia.
- c) Avaliar o efeito da erosão e da deposição na paisagem.

3. PROCESSOS EROSIVOS E DEPOSICIONAIS

A produção de sedimentos e deposição em uma bacia hidrográfica pode ser o resultado de diferentes processos, tais como rastejos, fluxos e colapsos de parcelas do terreno com inclinação acentuada e, principalmente pelos processos erosivos por escoamento superficial (HUANG WU *et al.*, 1978; LEOPOLD *et al.*, 1995; MORGAN, 2005). Esses processos podem predominar em partes da bacia ou em seu todo com diferentes intensidades, controlados somente pelas condições naturais ou modificados por atividades antrópicas (LEOPOLD *et al.*, 1995; BRAIMOH e VLEK, 2007) (**Tabela 1**).

Tabela 1: Componentes do meio ambiente que afetam o ciclo de sedimentos.

Componente	Influência / Ciclo de Sedimentos
Relevo	h/l – diversidade de valores de declive em cada parte da bacia em análise.
Precipitação	Variações temporais x Registros x Medidas; Distribuição Espacial das chuvas.
Materiais Geológicos	Distribuição em área x características físico-químicas; normalmente apresentam a mesma variabilidade.
Morfometria	Comprimento das encostas, interligação entre os canais de drenagem, tipos de valores.
Antrópico	Atividades humanas que podem alterar positivamente ou negativamente os componentes acima em relação à geração e transporte de sedimentos ou deposição.

Fonte: Modificado de Ferreira (2008).

A erosão hídrica dos solos desencadeada pela ação mecânica da precipitação e pelo escoamento superficial é entendida como um processo de remoção ou desprendimento das partículas que compõem o solo, resultando no transporte dos componentes mais finos por grandes distâncias (BEASLEY *et al.*, 1980). Tal processo pode ter maior ou menor intensidade (**Tabela 2**) conforme as características dos materiais existentes e a influência do meio, as quais estão relacionadas à suscetibilidade do solo e variáveis como a precipitação (intensidade,

duração e volume), a erosividade e os fatores de erodibilidade (características dos solos), uso do solo e contexto morfoestrutural (MORGAN, 2005; CARVALHO, 2019).

Tabela 2: Sistema de classificação e avaliação de processos erosivos.

CLASSE	TAXA DE EROSÃO (t ha ⁻¹)	INDICADORES
Muito Pouco	< 2	Sem evidência de compactação ou crostas, características de lavagem; sem respingos de pedestais ou exposição de raízes; mais de 70% de cobertura vegetal (solo e copa).
Pouco	2 - 5	Sinais de crostas, lavagem localizada; sulcos a cada 50 - 100 m; respingos de 1 a 5 mm de profundidade; nível do solo mais alto nas encostas; 30-70% de cobertura vegetal.
Moderada	5 - 10	Registros de lavagem; sulcos a cada 20 - 50m; raízes de árvores expostas, solo protegido por vegetação a profundidades de 5 a 10 mm e ocupando não mais de 10% da área; crostas superficiais leves a moderadas; 30 - 70% de cobertura vegetal.
Alta	10 - 50	Voçorocas espaçadas a cada 50 - 100 m; exposição de raízes de árvores, solo a profundidades de 10 a 50 mm ocupando não mais de 10% da área; crostas; menos de 30% cobertura vegetal; sedimentação problemas a jusante.
Forte	50 - 100	Voçorocas a cada 20m; exposição de raízes de árvores, solo a profundidades de 50 a 100 mm cobrindo mais de 10% da área; material grosseiro; solo nu; assoreamento de corpos d'água; danos às estradas por erosão e sedimentação.
Muito Severo	100 - 500	Ravinas a cada 5 - 10m; solo crostoso e exposto; assoreamento, poluição e eutrofização.
Catastrófico	> 500	Grandes ravinas (>100m ²) a cada 20m; remoção da maior parte da superfície original do solo; erosão e sedimentação no local e a jusante.

Fonte: Modificado de Morgan (2005).

Bryan (1987 e 2000) consideram a precipitação e o escoamento superficial como as principais causas da erosão hídrica. Tais autores dividem os eventos em cinco subprocessos: a

ocorrência da precipitação que desencadeia aquele que será o primeiro processo erosivo, o impacto da gota de água (desprendimento) no solo (*rainsplash*), na sequência o transporte dessas partículas por meio do processo da erosão laminar ou em manto (*sheetwash*), posteriormente, a erosão em sulcos (*rill erosion*) e por fim, a erosão em ravinas, voçorocas (*gully erosion*).

Em relação a erosão em lençol (laminar) (**Figura 1**) pode ser provocada pelo escoamento superficial difuso, erodindo, em uma camada fina e paralela toda a superfície do solo, como se fosse uma lâmina. Trata-se de uma remoção progressiva e uniforme dos horizontes superficiais do solo por meio do impacto das gotas de chuva na superfície do terreno em camadas delgadas sobre toda uma área, em que os sinais de solo são pouco visíveis, porém perceptíveis com o aumento da turbidez da água do rio (KIRKBY e MORGAN, 1980; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008; SAMPAIO *et al.*, 2016).



Figura 1: Registro de erosão laminar em área rural do município de São Pedro (SP).

A erosão linear (**Figura 2**) é produzida pelo escoamento superficial concentrado e contínuo das águas correntes na superfície terrestre, sobretudo em encostas côncavas, solos desprotegidos, terrenos com declives regulares ou acentuados em relação à superfície desnivelada, o que implica maior taxa de erosão e resulta em incisões na superfície do terreno na forma de sulcos, ravinas e voçorocas. Tal situação pode ser acentuada com a interferência antrópica a partir do crescimento urbano inadequado e práticas agrícolas incorretas (KIRKBY; MORGAN, 1980; COOPER, 2016, ALMEIDA FILHO *et al.*, 2016; DAI *et al.*, 2017).

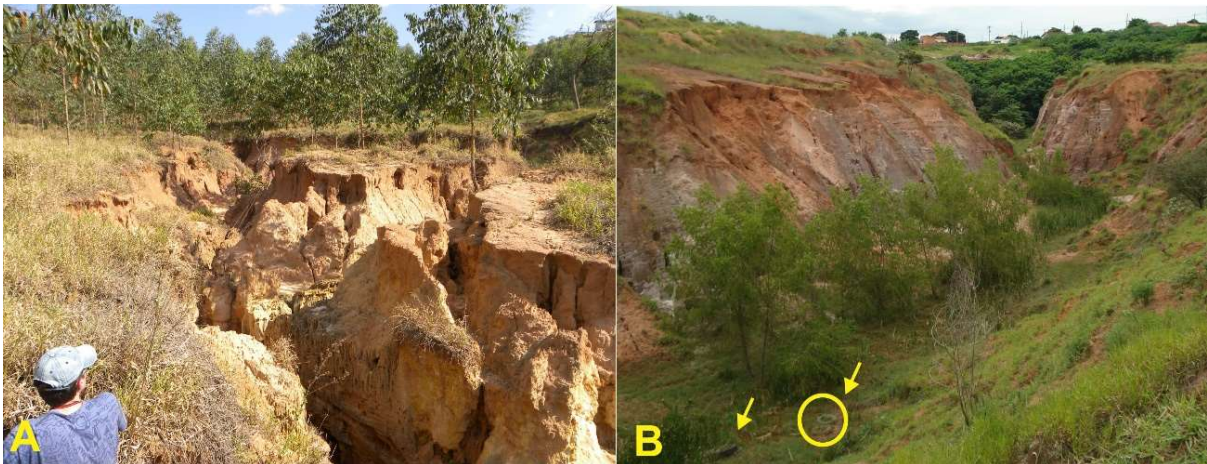


Figura 2: Registro de ocorrência de feições erosivas lineares no município de São Pedro (SP). (A) Feição erosiva linear ramificada. (B) Feição erosiva linear profunda e retilínea.

A erosão acelerada é provocada pela ação do homem, por meio do uso e do manejo inadequado do solo, como: desmatamento, construção civil, implantação de estradas, expansão urbana sem planejamento adequado, entre outras ações antrópicas que geram a redução de áreas agricultáveis, o assoreamento e a contaminação de rios e lençóis freáticos (KIRKBY e MORGAN, 1980; SCHANZ e MONTGOMERY, 2016; HAO *et al.*, 2019).

A erosão marginal ou erosão das margens de um rio, como componente da erosão fluvial (hídrica), é aquela que destrói ou remove os materiais das margens dos rios, pela ação de correntes ou forças de origem externa (precipitação pluviométrica), desempenhando importante papel no aumento da largura do canal. Este tipo de erosão contribui significativamente no incremento da carga de fundo dos rios, além de provocar a destruição progressiva da área marginal, que pode ser acentuada pela ação antrópica a partir de obras de construção civil, substituição da mata ciliar pelo cultivo ou urbanização (HOOKE, 1979; 1980; THORNE e TOVEY, 1981). Casado *et al.*, (2002), por exemplo, quantificaram a taxa de erosão

e o volume de material erodido (**Tabela 3**), a partir da aplicação de pinos e estacas em três seções localizadas no Perímetro Irrigado Cotinguiba/Pindoba - Baixo São Francisco Sergipano entre fevereiro de 1999 a julho de 2000. Os autores concluíram que a variação das taxas de erosão com destaque para seção B apresentou maior valor justificada pela altura média da margem. Tal trabalho também identificou a influência da composição granulométrica das camadas que compõem a face da margem e altura do barranco, associação dos dados climáticos e hidrológicos - velocidade do vento, amplitude mensal da cota, cota máxima mensal e velocidade do fluxo próxima à margem.

Tabela 3: Taxa de Erosão e Volume de Material Erodido.

Seção	Taxa de Erosão (m. ano ⁻¹)	Volume de Material Erodido (m ³)
A	8,30	518,91
B	47,30	36.099,94
C	4,45	208,79

Fonte: Modificado de Casado *et al.* (2002).

3.1 Influência da Litologia, Solos e do Relevo

A litologia tem forte influência na tipologia e na velocidade dos processos erosivos (GOUDIE, 2004). Box e Bruce (1996) explicam que a presença de fragmentos de rochas na superfície do solo pode influenciar na taxa de infiltração, tanto de forma negativa quanto positiva, o que difere dos fragmentos já existentes na superfície.

A composição mineralógica da rocha exerce influência na ocorrência dos processos erosivos, devido à ação no grau de alteração, como também na suscetibilidade de alteração dos minerais presentes. A granulometria dos minerais também influencia a alteração, já que quanto menor o grão, maior a razão entre sua superfície e o seu volume, e conseqüentemente, maior a sua exposição aos agentes intempéricos (CASADO *et al.*, 2002; DAI *et al.*, 2017).

Drumond e Bacellar (2006) realizaram um trabalho em relevo de rochas gnáissicas no Alto Rio das Velhas (MG), onde os processos de erosão hídrica atuam sobre os saprolitos, que

são mais suscetíveis a erosão, com destaque para os processos laminares, sulcos e salpicamento, sendo que os setores com rochas mais resistentes ao intemperismo, predominaram escorregamentos planares em descontinuidades da rocha alterada.

Em relação ao solo, o mesmo tem um papel essencial nos estudos sobre o mecanismo dos processos erosivos, devido suas características e interações com os outros fatores (água, vegetação, uso e ocupação), sendo que a degradação das propriedades físicas do solo é um dos principais processos responsáveis pela perda da qualidade estrutural e do aumento da erosão hídrica (SCHAETZL e ANDERSON, 2005). AUZET *et al.*, (2004) explicam que compreender como a variabilidade espacial e temporal das características do solo influenciam os processos erosivos é uma questão fundamental para analisar as ocorrências dos processos erosivos em diferentes escalas (maior e menor detalhe).

Diante deste contexto é pertinente destacar a importância da erodibilidade que engloba as características do solo (densidade, coesão e tamanho das partículas e condutividade hidráulica) e determina a resistência ou vulnerabilidade (desprendimento e transporte) quanto aos processos erosivos (SELBY, 1993). Deste modo, a erodibilidade do solo representa o efeito integrado dos processos que regula a infiltração da água de acordo com as classes de solo e o seu manejo (PIERCE e LAL, 1994), como também a textura, estrutura, estabilidade de agregados, resistência ao cisalhamento, capacidade de infiltração/permeabilidade, maior profundidade do fluxo, declividade e teor de matéria orgânica e química (BRYAN *et al.*, 1989; BRYAN, 2000; MORGAN, 2005).

A estrutura do solo está relacionada a organização das frações granulométricas primárias do solo em agrupamento secundário, denominados de “agregados” ou “pedos” em cada horizonte, características que definem a descrição morfológica dos perfis de solos (BRADY, 1989). Assim, torna-se evidente que a movimentação da água, a transferência de calor, a aeração, a densidade aparente e a porosidade, são consideravelmente influenciadas pela estrutura (GROHMANN, 1972; BRADY 1989; PRADO, 1995), que também interferem na instabilidade dos grãos em solos arenosos, os quais são classificados como solos sem estrutura ou como solos de grãos simples (KIEHL, 1979).

Na maioria das vezes, solos mais arenosos se desagregam mais facilmente que os solos argilosos, sendo a textura, também, uma das principais propriedades que condicionam a erosão, pois algumas frações granulométricas são removidas mais facilmente do que outras (DAEE,

1989; AB'SÁBER, 2006; MORAES, 2016). Portanto, solos granulares (mais grossos) são resistentes ao desprendimento devido ao peso das partículas maiores, solos mais finos são resistentes porque a energia da gota de chuva tem que superar as forças adesivas ou de ligação química entre os minerais que compõem as partículas de argila (SCHAETZL e ANDERSON, 2005).

O teor de matéria orgânica é considerado um elemento importante para agregação das frações granulométricas e, conseqüentemente, para auxiliar a estabilidade dos agregados. Esse elemento possui uma correlação inversamente proporcional com a erodibilidade, principalmente em solos com alto teor de silte e areia, visto que, os solos com teor inferior a 3,5% apresentam agregados instáveis (AB'SÁBER, 2006).

A porosidade dos solos é outro fator importante, pois os espaços porosos possibilitam a percolação de água e do ar (GROHMANN, 1972; BRADY, 1989). Neste sentido, há dois tipos específicos de porosidade: macroporosidade e microporosidade, sendo o primeiro exemplificado pelos solos arenosos e rápida movimentação do ar e da água pela predominância dos macroporos. A microporosidade pode ser representada pelos solos argilosos que, embora tenham maior quantidade de espaços porosos, possuem uma lenta movimentação de gases e água, devido à predominância de microporos, que se mantêm frequentemente preenchidos por água (KIEHL, 1979; BRADY, 1989).

A morfometria/morfologia das encostas (ex. ângulo, comprimento e curvatura), tem uma relação relevante com a formação dos processos erosivos, pois são utilizados para avaliar o grau de energia e a suscetibilidade a ocorrência de processos erosivos e deposicionais, além das potencialidades a ocupação (ALMEIDA, 2002). Neste sentido, o transporte de água e de sedimentos e, portanto, as maiores velocidades de erosão podem ser mais frequentes em relevos acidentados, como morros, do que em relevos suaves como colinas amplas (BRADY, 1989; SELBY, 1993; SALOMÃO, 1994).

Torri (1996) explica que as declividades mais acentuadas podem favorecer a concentração e as maiores velocidades de escoamento das águas, principalmente quanto maior o comprimento da encosta, que resulta no aumento da capacidade erosiva e sendo uma das grandes responsáveis pela energia cinética. Tamene e Vlek (2007) complementam que a declividade mais elevada nas bacias hidrográficas contribui para o aumento do processo de

transporte das partículas do solo, do fluxo de energia, além de provocar a diminuição da distância do escoamento e a possibilidade do depósito ser mais baixo.

A **Figura 3** exemplifica a relação da declividade com as classes de erosão, na qual Leopold *et al.* (1995) demonstram a partir da aplicação da Equação de Horton o percentual de área erodida numa determinada bacia nos EUA. Nota-se que a erosão no intervalo (26 - 35%) atingiu o máximo de áreas suscetíveis e, à medida que se aproximou da última classe próxima de 86 – 90%, reduziu para a zero as classes de erosão.

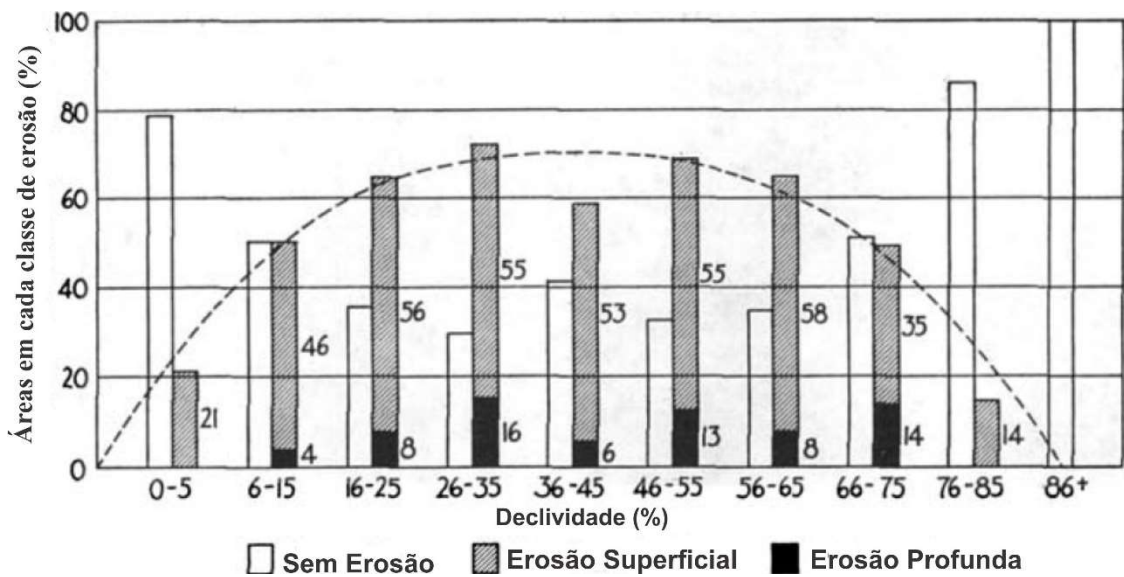


Figura 3: Relação das classes de erosão e declividade (Adaptado de LEOPOLD *et al.*, 1995).

Em corroboração Selby (1993) apontou a importância da declividade e do comprimento das encostas para o aumento da energia do escoamento “*runoff*” e consequente ampliação dos efeitos erosivos e da perda do solo, sendo que a primeira, reflete o gradiente hidráulico da encosta e a segunda permite o incremento no potencial energético.

Buscando compreender estes parâmetros, Ruhe (1975) propôs que uma encosta pode ser definida espacialmente por três componentes geométricos: o gradiente, o comprimento da encosta e a largura da encosta. Desta maneira, três formas são possíveis ao longo do comprimento (perfil) e largura (forma) das encostas: linear, convexa e côncava, compondo nove geometrias básicas que condicionam diferentes direções dos fluxos hídricos (**Figura 4**).

As diversas combinações formam configurações específicas de escoamento superficial (**Figura 4**): na encosta linear - linear a água não consegue convergir em canais e predomina o escoamento em lençol (*sheetwash*). Na encosta convexa - linear predomina o escoamento em lençol, porém a velocidade aumenta inerente ao gradiente encosta abaixo, induzindo maior erosão. Em relação à encosta côncava - linear o escoamento em lençol tem grande efeito erosivo, pois quanto maior a inclinação (declividade) da encosta maior a velocidade de escoamento, assim como menor a inclinação, menor a velocidade e maior a deposição. Seguindo, na encosta linear - convexa o escoamento é divergente e a água tende a se dispersar. Por fim a encosta linear - côncava, onde o escoamento é convergente, através de canais, possivelmente contribuindo para a formação de voçorocas e tributários de primeira ordem. Ressalta-se que as outras combinações formam sistemas muito complexos de escoamento superficial em termos de padrão e velocidade (RUHE, 1975).

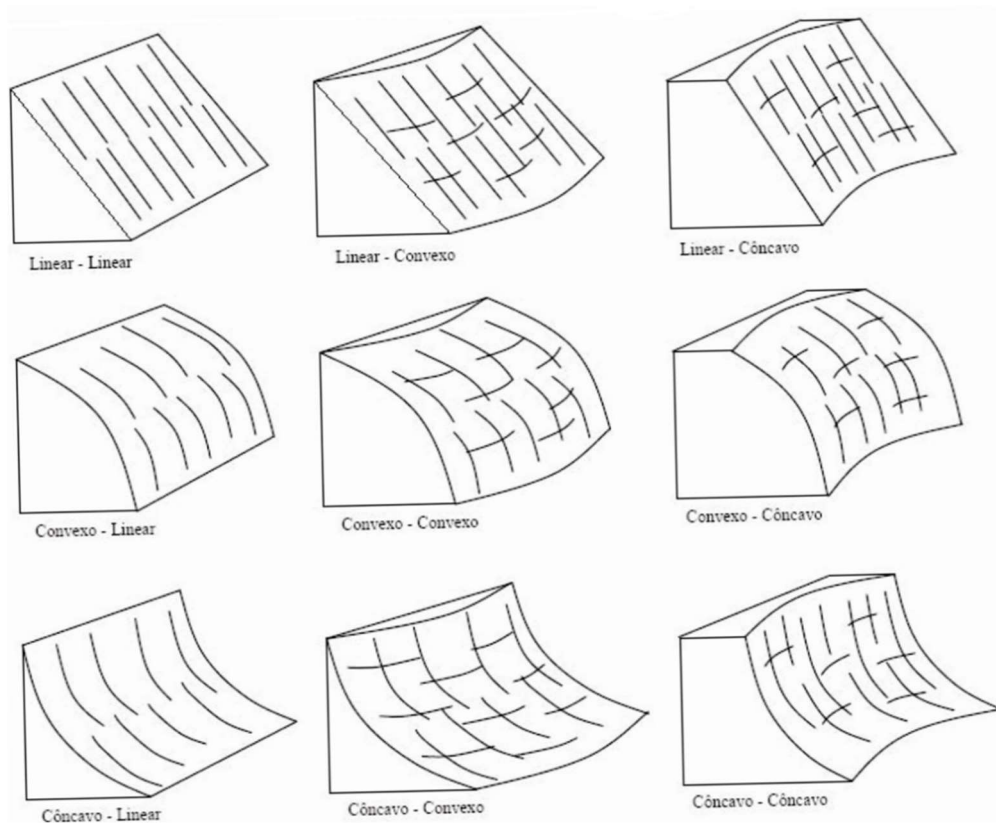


Figura 4: Representação das combinações geométricas básicas, em função das associações de formas lineares, côncavas e convexas eventualmente encontradas numa encosta. Fonte: Modificado de Ruhe (1975).

Brady (1989) também reforça que o comprimento da encosta assume importância primordial, pois quanto maior a extensão da área em desnível, maior será a concentração da enxurrada, visto que, a topografia influencia de forma geral na bacia de captação além de regular a concentração de água. Kirkby e Chorley (1967) afirmam que a curvatura côncava, em perfil, potencializa os fluxos hídricos e a curvatura côncava em planta, produz a convergência destes fluxos e, que estes fatores estão entre os principais associados aos processos erosivos.

3.2 Influência do Uso do Solo

A cobertura vegetal (agente natural predisponente) protege o terreno por meio da interceptação da folhagem, reduzindo e dissipando o impacto direto das gotas de chuva no solo, como também o escoamento superficial (BOX e BRUCE, 1996; MORGAN, 2005). Muitos estudos concordam que 30% da cobertura vegetal protegem o solo contra a erosão (GOUDIE, 2004), uma vez que a água circula ao redor dos troncos e das raízes e age como responsável pela estruturação do solo, por meio do sistema radicular, ou seja, as raízes aumentam a resistência mecânica do solo, sobretudo na defesa da ação erosiva das águas (DAEE, 1989; SANTORO, 1991; SELBY, 1993; ALMEIDA, 2002; MORGAN, 2005).

Segundo Greene e Hairsine (2004) a vegetação mantém um maior conteúdo de umidade superficial no solo por um tempo significativo, o que corresponde ao aumento na gama de condições para a estabilização da superfície, e, portanto, a redução da probabilidade de formação da crosta ou da selagem do solo. No entanto, Riser (1995) advertiu que a transpiração das plantas pode provocar a perda de umidade do solo, como também pode isolar o solo contra as altas e as baixas temperaturas, limitando a sua dissecação e o congelamento.

A eficácia da cobertura vegetal depende da sua densidade como também da altura e da continuidade do dossel, visto que, as gotas d' água caindo de uma altura de 7m podem atingir mais de 90% da sua velocidade terminal, como também as gotas de chuva interceptadas pelo dossel podem aderir às folhas e formar gotas maiores, portanto, mais erosivas (MORGAN, 1995).

A importância da cobertura vegetal (**Figura 5**) é comprovada, quando ocorre a sua retirada nas áreas, sobretudo para as práticas agrícolas, em função da preparação do solo para o cultivo, no qual o solo é arado e torna-se exposto por várias semanas às precipitações e suscetível a ocorrência de processos. Desta forma, a retirada da cobertura vegetal, leva à ação

direta das chuvas, aos efeitos mecânicos além da eliminação da reserva da matéria orgânica - húmus (DAEE, 1989; BAPTISTA, 2003; ARAÚJO *et al.*, 2007).

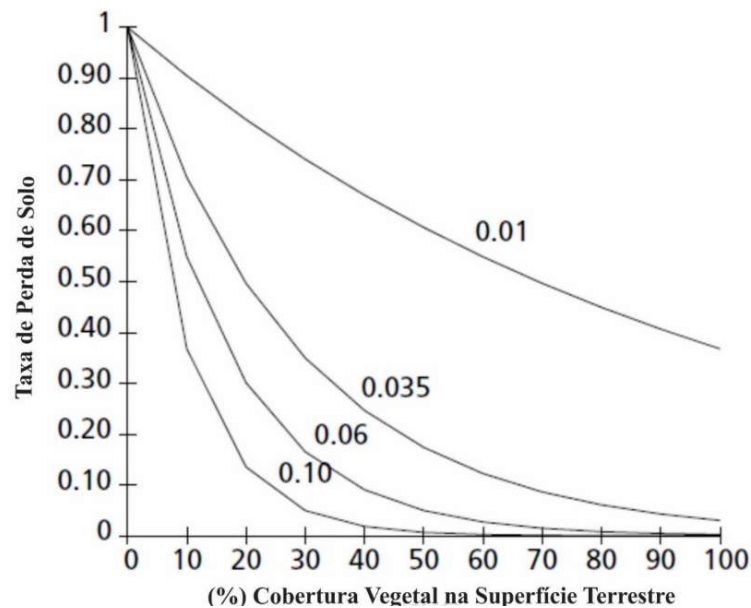


Figura 5: Relação entre o valor da taxa de perda de solo (SLR) e a porcentagem de cobertura vegetal na superfície do solo (PC). SLR é a razão entre a perda de solo com a cobertura vegetal e o solo exposto; PC é a porcentagem da cobertura vegetal com o J (variação de valores) que possui entre 0,01 e 0,035 (média natural). Nota-se que o aumento da porcentagem da cobertura vegetal reduz proporcionalmente a perda de solo (Adaptado de MORGAN, 2005).

Em âmbito mundial os estudos da relação entre a perda de solo e o clima demonstram de forma geral que a partir das precipitações anuais por volta de 450 mm, os processos erosivos possuem relação diretamente proporcional com o aumento da intensidade pluviométrica. Ressalta-se que o aumento da precipitação gera consequentemente o aumento da cobertura vegetal que pode reduzir a perda de solo em alguns momentos que supera a força do escoamento (**Figura 6**). A precipitação acima de 1700mm cria condições para que o volume e a intensidade da chuva superem a proteção e o efeito da vegetação e, consequentemente, a erosão inicia-se novamente a sua atuação, embora as taxas erosivas são muitas vezes mascaradas pelas diferenças no solo, encostas e cobertura da terra.(MORGAN, 2005).

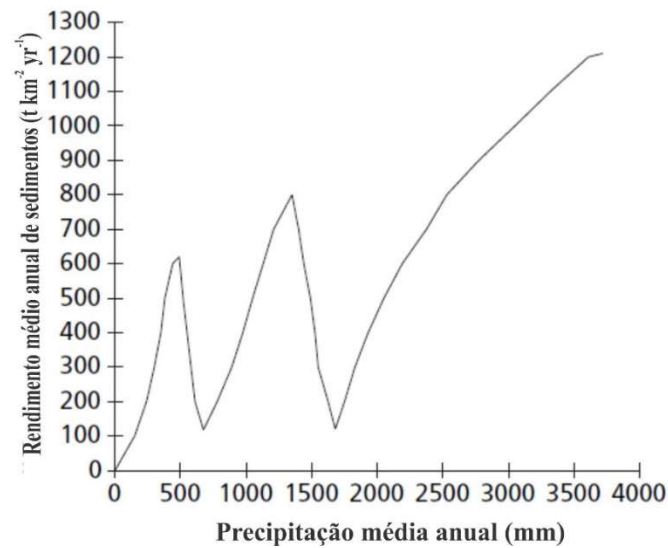


Figura 6: Relação entre produção de sedimentos e precipitação média anual. Nota-se que as oscilações e portanto, a redução perda de solo estão relacionadas com o aumento proteção da cobertura vegetal, que a partir da maior intensidade da precipitação volta a ocorrer a perda de solo (Adaptado de MORGAN, 2005).

Neste contexto, a intervenção humana pode ser decisiva para evolução dos processos erosivos, pois as formas e as práticas de uso adequadas ou inadequadas levam, respectivamente, a redução ou a aceleração da evolução dos processos erosivos (DAEE, 1989; BAPTISTA, 2003). A intensidade da intervenção antrópica é capaz de desestabilizar um ou mais elementos do sistema e promover o surgimento de processos erosivos, por meio das formas de uso do solo, as quais estão associadas a ocupação urbana inadequada (ex. corte de encostas para a construção de casas, prédios e ruas), práticas agrícolas (ex. monocultura com o uso da mecanização, a utilização de fertilizantes, o desmatamento) e a mineração (GOUDIE, 1990; CHESWORTH, 2008).

Na área urbana, as alterações ambientais são mais intensas e significativas, em decorrência do maior adensamento populacional e do uso sem adoção de critérios adequados (SANTORO, 1991; ALMEIDA, 2002). As causas mais comuns das voçorocas envolvem ações humanas, por meio do desmatamento e pastagem próxima a encostas, além do desvio ou concentração do escoamento a partir da construção de estradas (GOUDIE, 2004).

Lohmann e Santos (2005) a partir da abordagem morfopedológica observaram o desequilíbrio entre infiltração e o escoamento superficial, resultado do uso intensivo do solo e do manejo inadequado na bacia hidrográfica do Arroio Guassupi - São Pedro do Sul/RS. Tal

situação ocasionou a desestruturação e a compactação em superfície e em subsuperfície, dificultando a infiltração das águas das chuvas e facilitando a ativação dos processos erosivos por fluxos superficiais concentrados, nas classes de uso de maior intensidade (**Tabela 4**).

Tabela 4: Relação do uso e ocupação do solo x erosões.

Classes de Uso da Terra	Área total/km²	%	Erosões
Pastagens	11,90	35,36	22
Florestas	9,15	27,18	Ausentes
Culturas Irrigadas	0,80	2,38	Ausentes
Lâmica d'água	0,10	0,29	Ausentes
Culturas sem Irrigação	11,71	34,80	2
Total	33,66	100	24

Fonte: Modificado de Lohmann e Santos (2005)

GUTIÉRREZ *et al.*, (2009) explicam que o cultivo e a pastagem possuem influência direta no aumento e áreas degradadas pela erosão. Nyssen *et al.*, (2002) afirmam que a construção de estradas e a maior concentração do escoamento superficial tem relação direta com a formação de voçorocas.

Meyles *et al.*, (2006) relatam que a velocidade do fluxo superficial é maior em áreas de intensa prática de pastagens, contudo tal prática não possui capacidade suficiente na formação de processos erosivos, mas tem influência direta sobre os solos e a hidrologia e, portanto, nos processos geomorfológicos.

3.3 Influência das Chuvas

A energia cinética é um agente deflagrador muito importante para os estudos dos processos erosivos, pois está associada à erosividade, que considera a energia da água e abrange o momento do escoamento superficial, associado à função da intensidade e duração da chuva,

da massa, diâmetro e velocidades das gotas de chuvas e, portanto, a capacidade da chuva em causar erosão (ZUQUETTE, 1987; FERREIRA, 2008).

Neste contexto, a magnitude e a frequência da chuva constituem parâmetros essenciais na análise da deflagração e da evolução dos processos erosivos, pois uma chuva de alta intensidade tem capacidade de acelerar, de forma mais acentuada, os processos de dinâmica (fluxo) superficial em terrenos arenosos com alta declividade e sem cobertura vegetal, do que em terrenos planos e com vegetação (SANTORO, 1991; CANIL, 2000; AFUNGANG e BATEIRA, 2016). MATHIAS *et al.*, (2019) relatam a importância do estudo e a identificação das rotas dos fluxos superficiais, uma vez que este fator possui relação direta com a formação e a aceleração dos processos erosivos.

Diante deste contexto em relação a classificação da erosividade da chuva, as mesmas são consideradas chuvas erosivas aquelas com valor igual ou superior a 10 mm, ou igual ou superior a 6 mm desde que ocorram em um período máximo de 15min (SILVA, *et al.*, 2002; (CASSOL, *et al.*, 2007; ALMEIDA, 2009; SANTOS *et al.*, 2010; ALMEIDA *et al.*, 2022).

As consequências da chuva na superfície do solo e as mudanças físico-químicas, como também o poder de dispersão no solo (**Figura 7**), são aspectos fundamentais para entender o potencial de erosão, pelo fato de ser o principal controlador da superfície da crosta, da selagem e do desprendimento de partículas (HADLEY *et al.*, 1985; GREENE e HAIRSINE 2004).

A energia cinética da chuva é a expressão mais importante para entender o seu poder erosivo, por meio da intensidade, da duração, da massa, do diâmetro e da velocidade (MORGAN, 2005). Uma precipitação anual, mediante numerosas chuvas suaves, poderá ocasionar pequenas erosões, e uma precipitação menor e torrencial poderá causar sérios prejuízos, ou seja, a distribuição sazonal das chuvas é decisiva na determinação das perdas de solo por erosão (BRADY, 1989).

Em relação a taxa de infiltração a mesma é representada a partir de uma curva de infiltração em termos de um modelo matemático, de tal modo que suas características podem ser previstas sob diferentes condições de umidade do solo, cobertura da superfície, tempo de duração da precipitação (MORE, 1975). Neste sentido, a taxa de infiltração que alimenta o lençol freático também colabora para que outros mecanismos atuem na dinâmica de evolução dos processos erosivos (MORGAN, 2005).

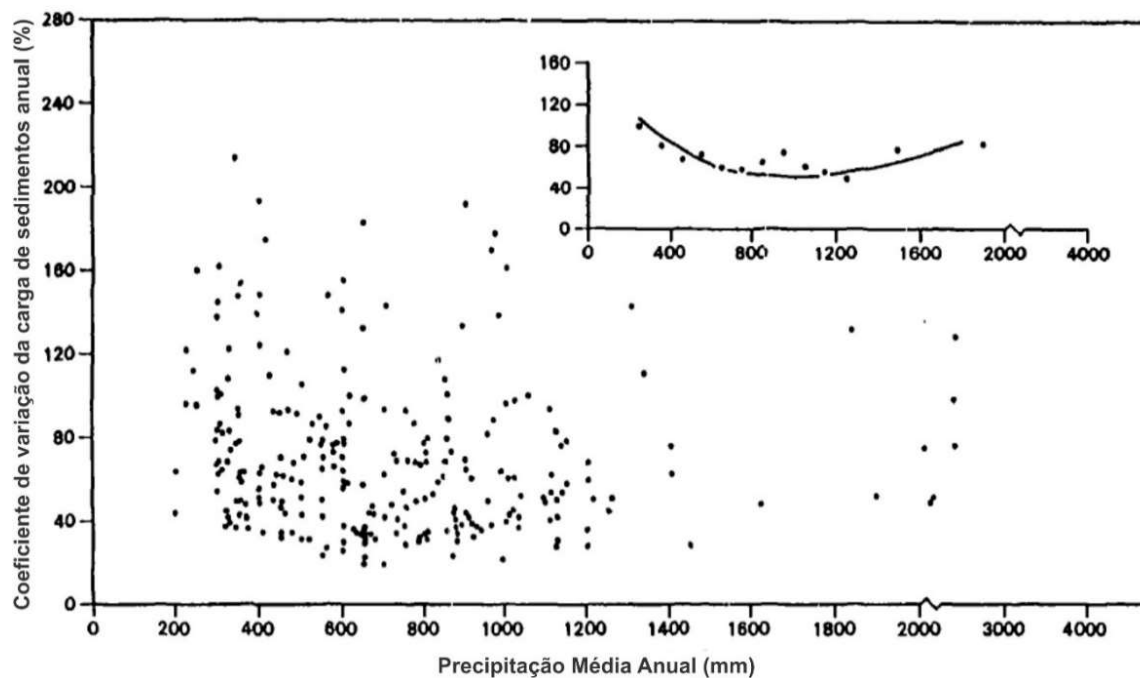


Figura 7: Coeficiente de variação da produção anual de sedimentos em suspensão versus precipitação média anual para dados globais. Nota-se que não há uma relação clara entre as duas variáveis, porém uma forma parabólica, sugerindo que a variabilidade máxima pode ocorrer em áreas semi-áridas e em áreas de alta precipitação (Adaptado de HADLEY *et al.*, 1985).

Brouwer *et al.*, (1985) explicam que o processo de infiltração pode ser classificado como: baixa infiltração (menos de 15 mm/hora), média taxa de infiltração (15 a 50 mm/hora), alta taxa de infiltração (mais de 50 mm/hora), os quais a textura do solo, o teor de umidade do solo e a estrutura do solo influenciam na taxa de infiltração.

A título de exemplo, no caso de uma voçoroca, a ocorrência de uma chuva prolongada e a consequente saturação do solo provoca o escoamento superficial e o subsuperficial, podendo levar ao desmoronamento dos taludes instáveis das encostas internas da feição. Durante uma tempestade, os espaços entre as partículas do solo ficam cheios de água e as forças capilares diminuem de modo que a taxa de infiltração começa alta no início de uma tempestade e declina a um nível que representa a taxa máxima sustentada na qual a água pode passar através do solo para níveis mais baixos (**Figura 8**). Neste nível a taxa de infiltração, corresponde teoricamente à condutividade hidráulica saturada do solo, condutividade devido ao ar aprisionado nos poros do solo à medida que a frente de umedecimento passa para baixo através do solo (MORGAN, 2005).

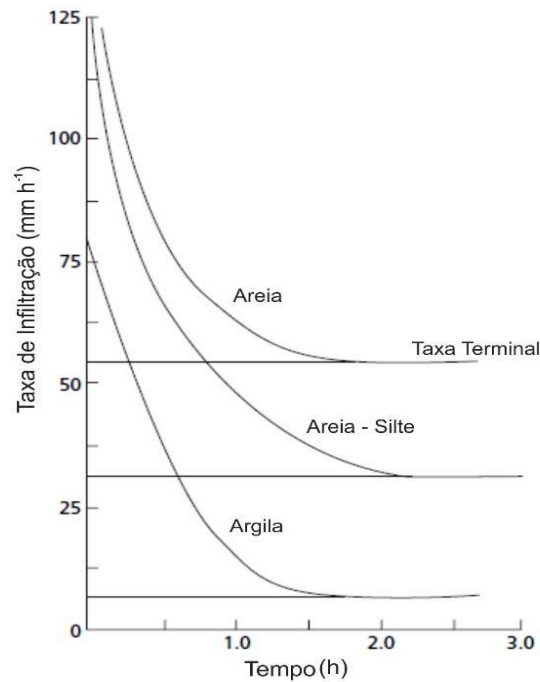


Figura 8: Taxa de infiltração associada à classificação do solo (Adaptado de MORGAN, 2005).

Leopold *et al.*, (1995) explicam que a chuva precipitada sobre uma superfície irregular se dispõe de várias maneiras diferentes, pois se o solo não estiver saturado, a umidade se infiltrará no solo a uma taxa controlada pela textura do solo, cobertura vegetal e grau de saturação. Tais autores ressaltam que a taxa de infiltração é rápida, mas após um período de tempo a taxa se aproxima de um limite assintótico, definido como a "capacidade de infiltração" de um determinado solo (**Figura 9**).

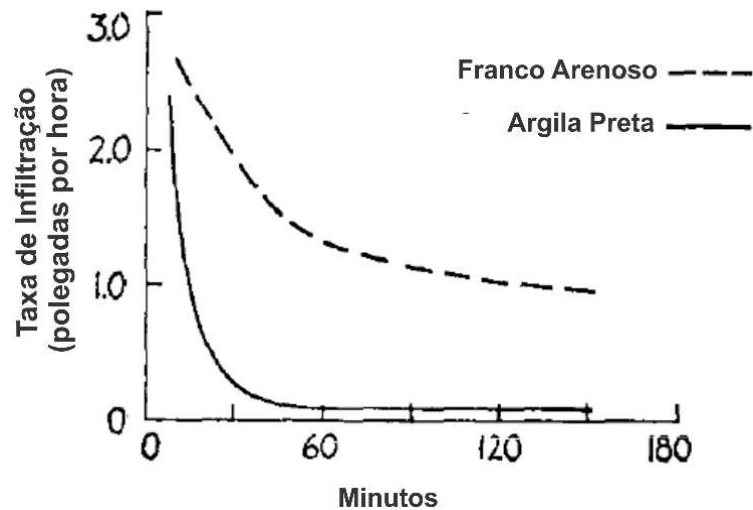


Figura 9: Taxas de infiltração em solo franco-arenoso e argila. Nota-se que a taxa de infiltração da argila é de cerca de 0,04 polegadas por hora, a do franco arenoso 0,9. A lama contém apenas 6% de tamanhos de argila (mais finos que 0,002 mm) sendo que a argila contém 63% (Adaptado de LEOPOLD *et al.*, 1995).

A taxa de entrada de água no solo (passagem da água da superfície para o interior do solo) pode ser medida a partir do registro da queda do nível de água em um infiltrômetro de anel duplo (**Figura 10**) durante um período de aplicação de água de irrigação ou de chuva. Em solo seco a água percola rapidamente e diminui à medida que o solo vai se tornando saturado, sendo em menor proporção para solos arenosos, cujos macroporos não dependem da estrutura estável ou contração da argila. O alto teor de argila expansiva, grandes fendas abertas, geram taxa inicial de infiltração muito alta, mas passa a ter uma taxa muito baixa quando as argilas se expandem com a água e fecham as fendas, sendo que a maioria dos solos se situa entre esses extremos (BRADY e WEIL, 2013).

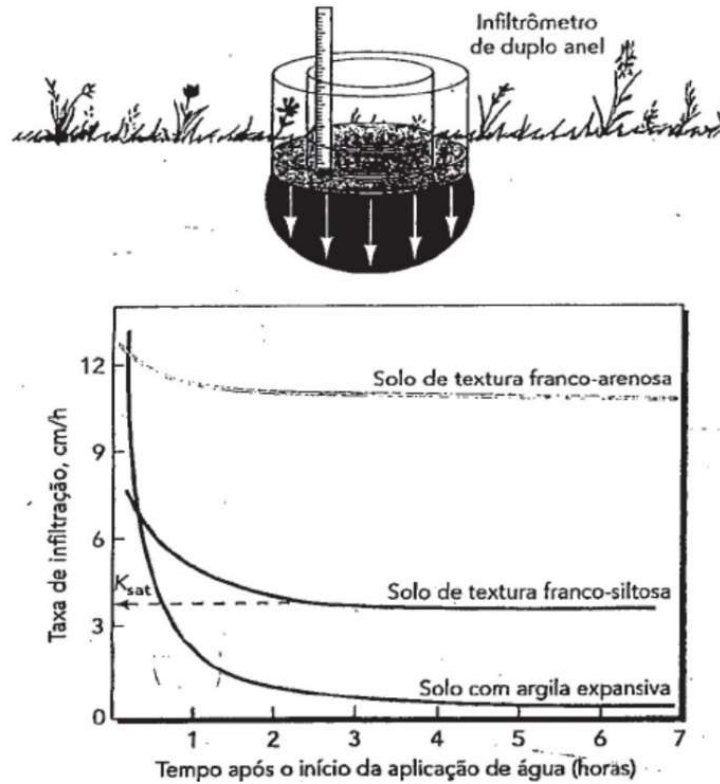


Figura 10: Taxa de infiltração de acordo com as características do solo. A seta tracejada indica o nível de K_{sat} o solo franco-siltoso (Adaptado de LEOPOLD *et al.*, 1995).

Augustin e Aranha (2006) analisaram que os dutos (*piping*) ou túneis se formam a partir do carreamento de pequenos grãos do solo (argila, colóides) ou mesmo a partir da remoção do solo por solução (**Tabela 5**). Assim o transporte ocorre por meio da condução de sólidos ou de componentes dissolvidos em rotas preferenciais, o que lhes confere atuação de forças físicas e químicas, bem como o desenvolvimento das rotas preferenciais de escoamento sub-superficial que pode levar a formação de uma rede interligada de fluxos e o surgimento das voçorocas, por meio do colapso do teto dos túneis e o alargamento por escoamento superficial.

Tabela 5: Dados dos perfis de solo, nos quais foram detectados “*piping*” com colapso de teto.

Pontos	Posição na Vertente	Profundidade (cm)	Textura (%)			
			Argila	Silte	Areia Fina	Areia Grossa
1	Alta	0 – 8	23	9	52	16
2	Alta	8 – 55	25	26	38	11
3	Alta - Média	0 – 15	25	12	51	12
4	Alta - Média	15 – 43	29	16	44	11
5	Média	0 – 10	29	19	40	12
6	Média	10 – 48	35	5	44	16
7	Baixa	0 – 12	24	12	47	17
8	Baixa	12- 66	35	16	40	9

Fonte: Modificado de Augustin e Aranha (2006).

More (1975) explica que a relação recíproca entre infiltração e escoamento levou Horton a desenvolver suas idéias sobre a capacidade de infiltração até elaborar uma teoria geral para estimar o escoamento pela precipitação. Neste sentido foi definido que o excesso de precipitação refere-se a parcela da precipitação que excede a capacidade de infiltração do solo. Tal teoria contribuiu para análise de eventos, definição e avaliação de dados de precipitação, como também análise dos resultados (intensidade) do escoamento superficial.

4. ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Alto Espraiado foi a selecionada para o emprego do modelo SIMWE e análise das feições erosivas. Tal área possui densidade e representatividade erosiva (**Figura 11**) com registros de processos erosivos lineares (diversos estágios) e laminares observados *in loco*, como também do reconhecimento dos trabalhos de Daniel (2012), Daniel e Vieira (2015), Daniel *et al.* (2021); Daniel *et al.* (2021).

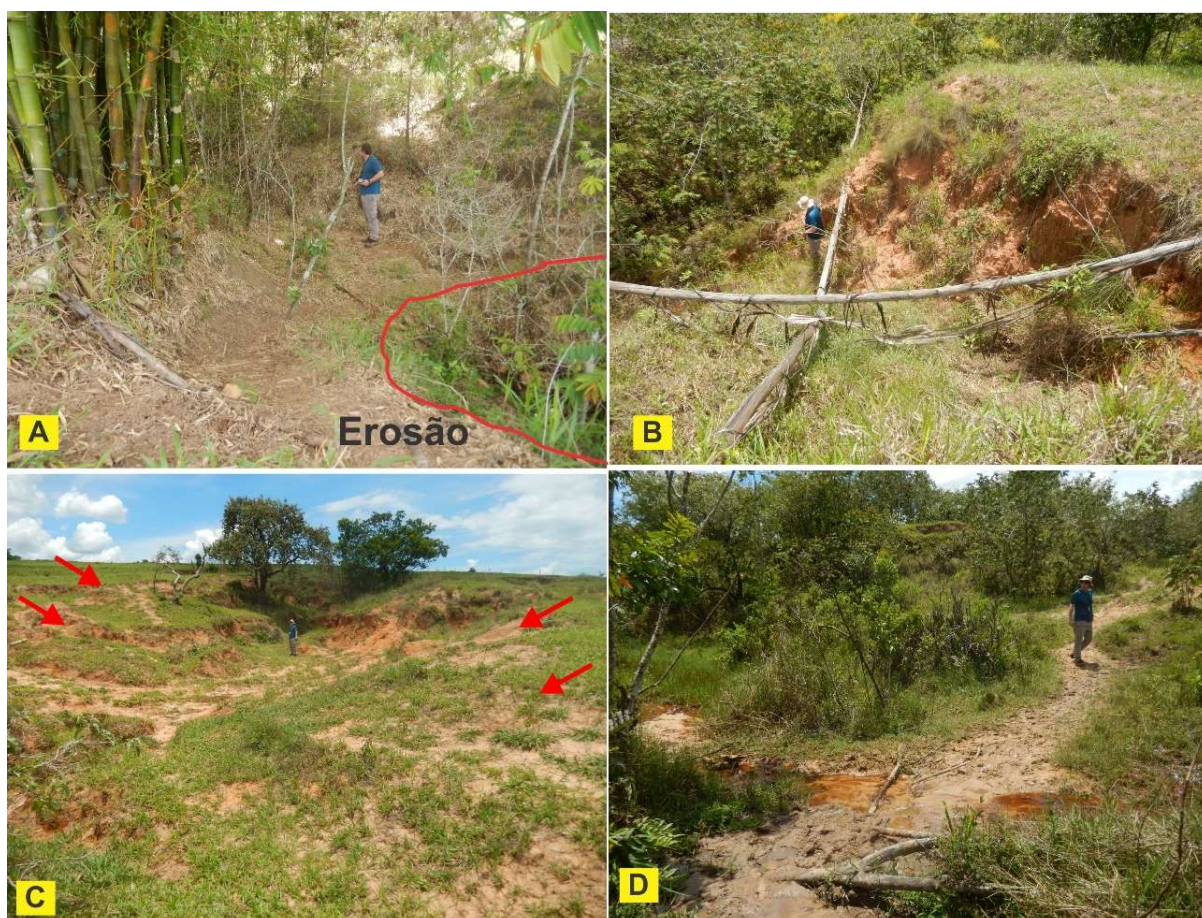


Figura 11: Registro de processos erosivos em 2022 e 2033 na bacia do Alto Espraiado - São Pedro (SP). (A) Prática conservacionista com o plantio de bambu para conter a erosão remontante. (B) Feições erosivas lineares avançadas - voçorocas. (C) Feições erosivas intermediárias, sulcos erosivos (seta vermelha) e ravinamento próximo da árvore. (D) Registro de afluente assoreado.

Com cerca de 2km² (**Figura 12**) tal bacia está situada ao norte do município de São Pedro (SP), o seu canal principal tem direção NW-SE, com a foz no Ribeirão Araquá, afluente do Rio Piracicaba, pertencente à unidade de gerenciamento de recursos hídricos do PCJ (Piracicaba/Capivari/Jundiaí). De acordo com a classificação (alta, média, baixa e muito baixa)

de Kertzman *et al.*, (1995) o município está situado na classe de alta susceptibilidade à erosão e, portanto, se apresenta como uma importante área piloto para implementação de modelos matemáticos de previsão com a simulação de taxas erosivas e deposicionais.

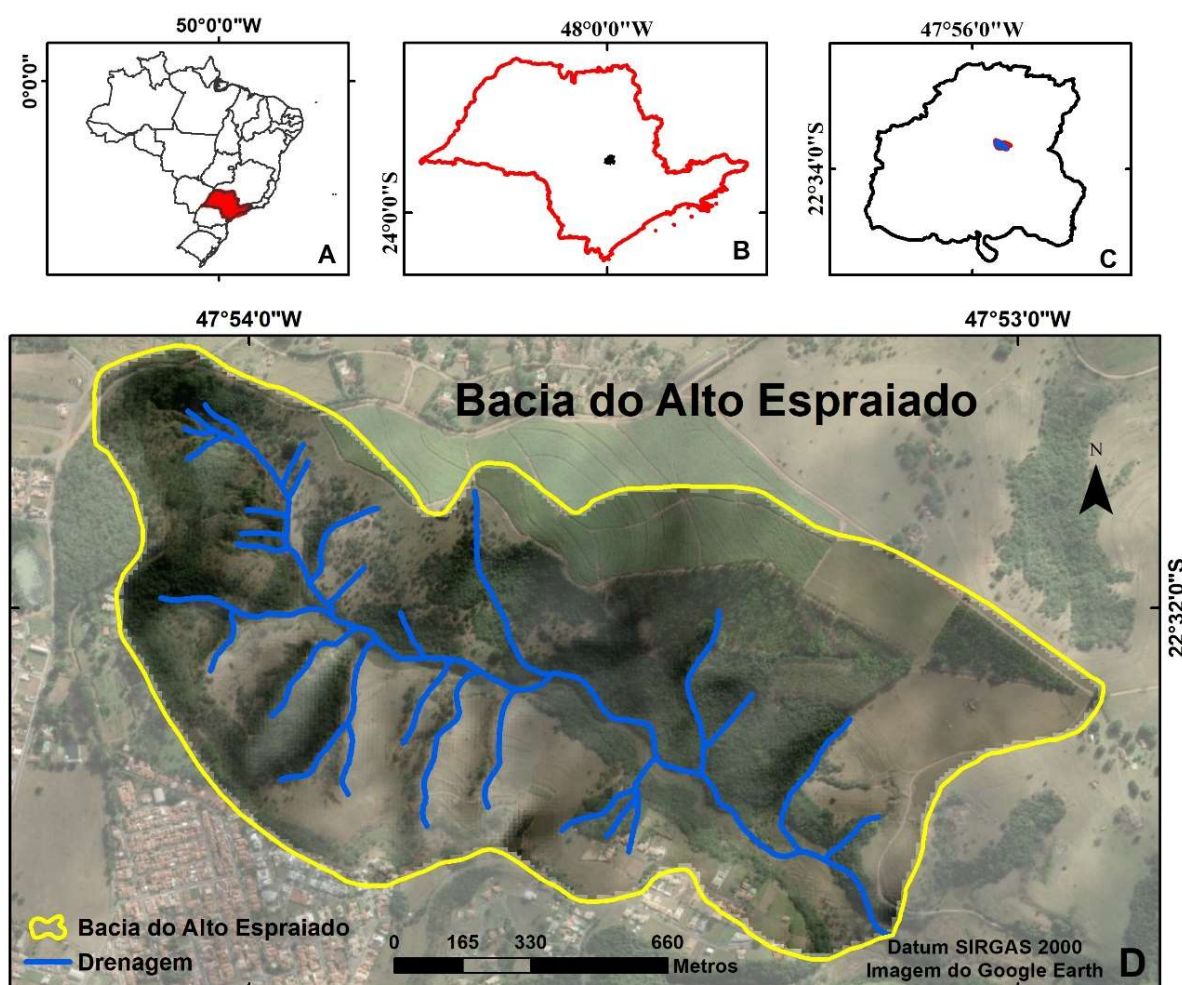


Figura 12: (A) Localização do estado de São Paulo no território brasileiro. (B) Posição do município de São Pedro no estado de São Paulo. (C) Bacia do Alto Espraiado no município de São Pedro. (D) Bacia do Alto Espraiado.

Destaca-se a existência de inúmeros trabalhos como: Rodrigues (1982), Santoro (1991), Furquim (2002), Santoro e Fulfaro (1996), Gomes (2002), Silva (2003), Yamanouth (2003), Almeida Filho *et al.*, (2004), Ferreira (2004), Zuquette *et al.*, (2007), Guimarães (2008), Pinheiro (2009) e Mathias (2011) realizados no município ou região que contribuíram para o levantamento de informações, inclusive coletados em campo e, conseqüentemente a inserção dos dados de entrada e a realização de simulações e aplicação do modelo SIMWE. Nesta bacia

também consta a estação meteorológica na área ou próxima para o levantamento dos dados diários de precipitação, a oferta de material topográfico (Escala 1:10.000) para a construção do MDE¹, como também mapas pedológicos, geológicos e geomorfológicos.

Diante deste contexto, justifica-se a seleção da bacia e ressalta-se que os trabalhos auxiliaram significativamente para o conhecimento da dinâmica erosiva e deposicional, embora sejam mais raros as pesquisas e o emprego de novas técnicas de análise, diagnóstico e principalmente prognóstico a partir da modelagem matemática.

4.1 Geologia

A bacia do alto Espraiado tem como substrato rochoso a Formação Pirambóia do Grupo São Bento (Triássico - Jurássica), pertencente à Bacia Sedimentar do Paraná, borda oriental, com espessura máxima de 300m (FURQUIM, 2002; DIAS FERREIRA, 1997). Esta formação está assentada sobre a Formação Estrada Nova, na qual o contato se manifesta por meio de uma brecha ou fissura sedimentar cuja espessura pode variar de 0,2 a 1,5 metros (DUARTE, 1980).

Os arenitos da Formação Pirambóia, pela posição estratigráfica inferior da Formação Botucatu, ocupam grande parte do município de São Pedro. Tal formação possui encostas dissecadas, patamares (bancos) resultantes da erosão diferencial, constituindo terraços estruturais que podem ser confundidos com terraços fluviais (OKA FIORI, 1980; SANTORO e FULFARO, 1996).

As estruturas predominantes da Formação Pirambóia são estratificações cruzadas de pequeno a médio porte, intercaladas com maior quantidade de materiais finos (níveis sílticos - argilosos fração representativa do Neossolos Quartzarênico) na parte inferior e outras de areia, que se encontram nas áreas mais altas, onde ocorrem arenitos grossos, conglomeráticos (COUTARD *et al.*, 1978; SANTORO, 1991). Suas estratificações caracterizam-se por serem cruzadas ou plano-paralelas que se localizam nas zonas mais baixas atribuída à origem flúvio-lacustre (aquoso), de espessura que chega atingir até 3 m; níveis de folhelhos e arenitos argilosos de cores variadas e raras intercalações de natureza areno conglomerática (BÓRIO,

¹Embora os dados de elevação tenham sido obtidos de curvas de nível, o que permite ser definido como um Modelo Digital de Terreno (MDT) optou-se neste trabalho por adotar a terminologia Modelo Digital de Elevação (MDE).

1973; COUTARD *et al.*, 1978). Estes arenitos encontram-se recobertos por pacotes de materiais inconsolidados residuais e retrabalhados, com textura predominantemente arenosa (composição essencialmente quartzosa) e espessuras variando de 1 até 5m (PINHEIRO, 2008; MICHETTE, 2015).

4.2 Geomorfologia

De acordo com a classificação geomorfológica do estado de São Paulo, o município de São Pedro faz parte da unidade geomorfológica conhecida por Depressão Paleozóica, também chamada de Depressão Periférica Paulista (SANCHEZ, 1969), ou segundo Ab`Saber (1949) de Zona de Circundesnudação Periférica. A mesma é considerada, de acordo com Ab`Sáber (1969), como o principal e mais característico compartimento topográfico de origem predominantemente denudacional do estado de São Paulo, largamente embutida entre as áreas serranas elevadas e acidentadas (750 - 1600m) e as escarpas e festões das altas cuevas basálticas 850m - 1100m

A Depressão Periférica Paulista está dividida em três províncias: Zona do Médio Tietê, Zona do Paranapanema e Zona do Mogi Guaçu, cuja área está localizada, mais precisamente, na primeira província. Esta província está localizada entre o Planalto Atlântico (Planalto de Jundiá) a leste, o Planalto Ocidental Paulista (Planalto Centro Ocidental e Planalto Residual de Botucatu e de São Carlos) a oeste e a Depressão de Mogi-Guaçu ao norte (ALMEIDA, 1964; ROSS e MOROZ, 1997). Conforme Oka Fiori (1980), a Depressão Periférica Paulista em São Pedro, é subdividida em 3 níveis geomorfológicos, cuja cotas variam de: 610 - 710 metros (Alto Terraços); 520 - 610 metros (Baixos Terraços) e por fim de 460 - 520 metros (Planície Aluviais) (**Figuras 13 e 14**).



Figura 13: Vista periférica registrada do topo da cuesta e ao fundo a cidade de São Pedro (SP).

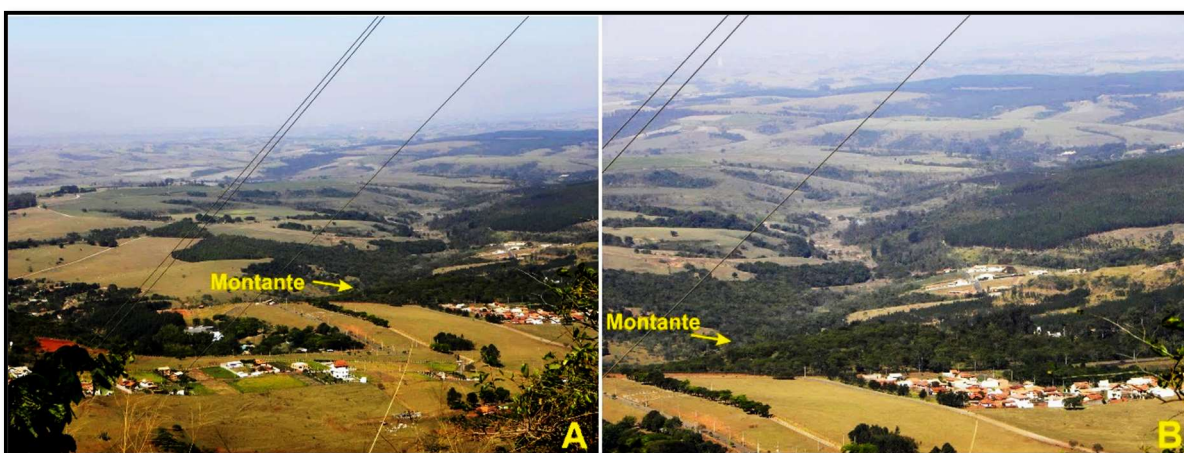


Figura 14: (A) Vista periférica da montante da bacia do alto Espraiado registrada do topo da *cuesta*. (B) Vista em maior detalhe a montante da bacia.

Tal província no município de São Pedro apresenta um relevo suave com colinas de encostas convexas e colinas de formato côncavo - convexo, esculpidas em rochas sedimentares da Formação Pirambóia e Botucatu, encostas com declives predominantemente entre 7° e 10° , podendo chegar até 22° (raramente maiores), nas quais as altitudes variam de 400 a 710 metros (ALMEIDA, 1974; SANTORO, 1991). Os interflúvios de topo plano se prolongam numa superfície contínua e ou inclinação suave, desde a escarpa da “cuesta” até o vale do Rio Piracicaba, que funciona como nível de base regional (BARRETO, 1970).

A bacia do alto Espraiado caracteriza-se pelo vale aberto em formato plano (**Figura 15**), com exceção da cabeceira, onde é fechado e encaixado (**Figura 16**) além da presença de terraços que compõem a planície aluvionar ao longo do córrego. As encostas da margem esquerda são mais côncavas na parte superior e convexas no terço intermédio-inferior, na

margem direita predomina a curvatura retilínea na sua parte superior e a concavidade no terço intermédio inferior (ROSS e MOROZ, 1997). De forma geral o município de São Pedro (SP) possui baixa ou média densidade de drenagem, caracterizado por uma distribuição muito homogênea, presença de cursos d'água com vales alongados, destaque para o Vale do Rio Piracicaba (como nível de base regional) (DUARTE, 1980; OKA FIORI, 1980).



Figura 15: Registro do fundo plano na bacia do alto Espraiado. (A) Canal principal e assoreado, com vale amplo, suave e ausência de cobertura vegetal original. (B) Fundo plano assoreado em afluente da bacia.



Figura 16: (A) Vista da montante do alto espraído e ao fundo da Cuesta de São Pedro (SP). (B) Em maior detalhe o fundo fechado e encaixado do canal principal.

4.3 Solos

De forma geral, os solos são marcados pela presença de horizonte subsuperficial arenoso e espesso, oriundo de rochas arenosas, profundo, com bandas onduladas intercalares e

lentes arenosas eluviadas, passando na base dos perfis, a um horizonte profundo, características do Neossolo Quartzarênico pela classificação da Embrapa (1999) (SANCHEZ, 1971; KAWAKUBO *et al.*, 2006).

O Neossolo Quartzarênico (**Figura 17**) caracteriza-se por ser essencialmente quartzosos com textura arenosa (= 85% de areia) ou areia franca (entre 70% e 85%) ou franco arenoso ao longo de pelo menos de 2 a 5m de profundidade (PEREZ FILHO *et al.*, 2011). Apresenta um horizonte A (com espessura superior a dois metros), geralmente moderado ou fraco, seguido por um horizonte C solto ou muito friável, não hidromórfico, pouco diferenciado, com colorações amareladas, alaranjadas ou avermelhadas, de consistência friável, fortemente ácido, baixos teores de base trocáveis (GOMES, 2002; FURQUIM, 2002; PINHEIRO, 2008).

Ainda sobre o Neossolo Quartzarênico, este possui menor relação silte/argila, indicativo de solos mais intemperizados e mais espessos da bacia, bem drenado, maior capacidade de permeabilidade e infiltração e pequena capacidade de retenção de água e nutrientes, predominância do fluxo vertical, além de possuir as mais altas porcentagens médias de areia fina e as mais baixas de argila, em que os minerais de argila presentes são principalmente caulinita, vermiculita, gibbsita e mica (DIAS FERREIRA, 1997; FURQUIM, 2002). Portanto, são características deste solo a homogeneidade granulométrica, os baixos valores de resistência ao cisalhamento ($c = 0.03 \text{ kgf/cm}^2$), porosidade entre 41 a 45%, limite de consistência como não plástico, valores elevados de índices de vazios (0.668 - 0.826) e permeabilidade próximo de $10^{-3}/s$ (SANTORO, 1991; GOMES, 2002).

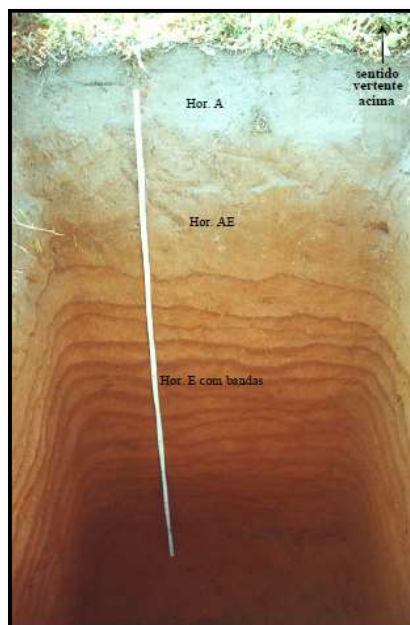


Figura 17: Perfil de Neossolo Quartzarênico (segmento superior) desenvolvido sobre o arenito Pirambóia. Nota-se a sequência de horizontes A, AE e E com bandas, além da sucessão de bandas onduladas e interbandas, sendo que as bandas são mais espessas e mais avermelhadas em profundidade (FURQUIM, 2002).

O Neossolo Litólico (**Figura 18**) caracteriza-se pela presença do horizonte A (moderado ou chernozênico com textura argilosa em alguns casos) sobreposto diretamente sobre a rocha ou alterita (sedimentos finos do Permiano, arenito Botucatu/Pirambóia). Este solo é classificado como raso, com pequena espessura (cerca de 60 cm), limite abrupto entre o horizonte A (moderado, mais poroso, com presença de minerais instáveis e elevados valores de índice médio de CTC) e o horizonte C-3 bem menos poroso, semelhante à rocha sã. Portanto, muito provavelmente os fluxos subsuperficiais continuam sendo predominantemente laterais nestas classes de solo, desenvolvidos essencialmente nos limites AB - Bi e A - C-3, em que as propriedades químicas são qualificadas como eutrófico e em alguns casos distróficos (FURQUIM, 2002; GOMES, 2002; SILVA, 2003; MICHETTE, 2015).

Também vale ressaltar que o Neossolo Litólico possui menor capacidade de infiltração em comparação ao Neossolo Quartzarênico, sendo que a permeabilidade se mantém alta apenas nos horizontes A, AE e ABi, diminuindo bruscamente nos horizontes subjacentes Bt, Bi e C-3 e, portanto, os fluxos de água tendem a ocorrer lateralmente e em velocidades relativamente altas principalmente nos contatos abruptos entre os horizontes citados. Ressalta-se que há maior permanência da água no Bt, Bi e C-3 durante a estação chuvosa, devido à menor permeabilidade

destes horizontes, o que reflete o predomínio de cores amareladas e acinzentada deste solo, pois devido à instalação de condições de saturação prolongadas promove a redução de ferro e sua migração, além de causar críticas condições de drenagem em relação ao Neossolo Quartzarênico (FURQUIM, 2002).



Figura 18: (A) Perfil situado no alto da bacia do Araquá. (A) Neossolo Litólico desenvolvido sobre blocos de basalto depositados na base da escarpa da serra de São Pedro (SP). (B) Neossolo Litólico desenvolvido sobre folhelhos da Formação Corumbataí (PINHEIRO, 2009).

O Latossolo Vermelho (**Figura 19**) se desenvolve sobre sedimentos arenosos da Formação Botucatu, profundo, bem drenado, ácido, arenoso e barrento (PINHEIRO, 2008). Este solo também se caracteriza por ser álico, textura areia média a muito argilosa, álicos, ácidos a muito ácidos e com teores de bases trocáveis muitos baixos, horizonte A moderado e proeminente (FURQUIM, 2002; YAMANOUTH, 2003). De forma geral, este solo é derivado de rochas básicas (pequenos afloramentos de basalto), mais abundante no *front* da *cuesta*, com sequência de horizontes A-Bw-C, em que os horizontes apresentam características gerais semelhantes aos horizontes dos LV, sendo, porém normalmente mais argiloso, com maiores teores de Fe_2O_3 e com espessura de 15 a 20 metros (SANCHEZ, 1971; OLIVEIRA *et al.*, 1992; FURQUIM, 2002).



Figura 19: Perfil de Latossolo Vermelho argiloso, desenvolvido sobre a formação Itaqueri do mesmo compartimento geomorfológico (PINHEIRO, 2009).

Para completar a presença do Neossolo Flúvico e Gleissolos (**Figura 20**) que margeia o canal principal da bacia do alto Espraiado e caracteriza-se pela presença de minerais não hidromórficos, oriundo de sedimentos recentes (período Quaternário), formado pela sobreposição de camadas de sedimentos aluviais, profundos (>2m) arenosos, comumente com alternância de camadas com maior ou menor concentração de material orgânico (PINHEIRO, 2009). Registra um horizonte A seguido de horizonte Glei, geralmente com excesso de água permanente ou temporária (FURQUIM, 2002). Portanto, trata-se de um solo pouco húmico, geralmente horizonte moderado, de cores cinzentas, esverdeadas ou azuladas presentes em colorido uniforme ou em mosqueamento, resultantes da intensa redução do ferro, com predominância de areia fina (40 a 42%), ácidos e em grande parte distrófico (OLIVEIRA *et al.*, 1992).



Figura 20: Perfil de Neossolo Flúvico e Gleissolos. Nota-se alternância de camadas de material orgânico na planície fluvial do Araquá do mesmo compartimento geomorfológico (PINHEIRO, 2009).

Yamanouth (2003) realizou uma análise dos materiais inconsolidados a partir de 35 amostras deformadas e 162 indeformadas, as quais foram classificadas por unidade de área, tais como: solo residual (Rs01 a Rs06), solo saprolítico (Rsp01), rocha muito alterada (Ram01 a Ram03), rocha pouco alterada (Rap01 e Rap02), materiais retrabalhados (Rt01 a Rt08), rocha sã (Rsa) e solos aluvionares (Al)². Neste sentido tal estudo identificou que a unidade Solo residual é constituída por material arenoso, com espessura aproximada entre 0,5cm e 5cm, erodibilidade maior que 1, granulação média a fina, percentual de argila entre 10% a 15%, silte entre 5% a 12%.

A unidade solo saprolítico é também constituída por material arenoso, com espessura em torno de 0,5 cm; referente à unidade Ram é constituída por material arenoso, rocha muito alterada; a unidade Rap é formada por rocha pouco alterada, estratificações cruzada de pequeno porte; a unidade Rt01 é constituída por material arenoso de coloração alaranjada, espessura entre 0,5cm e 5m, areia fina a média, percentual de argila entre 15% a 27%, em torno de 1 a 2% de pedregulho; por fim o setor Al é constituída por material arenoso de granulação área média a fina, e no canal da drenagem areia grossa e pedregulhos (YAMANOUTH, 2003).

² Ressalta que para este estudo não estão todas as classificações, pois este trabalho aborda apenas o alto Espreado.

4.4 Características Climáticas / Pluviométricas

O município de São Pedro (SP) está inserido numa área de transição, onde se verifica o campo de conflito das massas de ar vindas do leste, a Tropical Atlântica, do noroeste, a Equatorial e Tropical Continental, e as do sul, as Polares (SANTORO, 1991). Destaca-se a influência da altitude e da configuração do relevo (*Cuesta* de São Pedro/SP) nas oscilações térmicas e pluviométricas, pois as alterações das características gerais do clima da maior parte do município (redução normal da temperatura com o aumento da altitude da cidade de São Pedro 550m em média, e o alto da “serra”, aproximadamente 900 m) sofrem o efeito orográfico e as alterações nos deslocamentos das massas de ar, com chuvas mais abundantes nos rebordos escarpados e no seu reverso imediato (SANCHEZ, 1971; FACINCANI, 1995).

De acordo com a classificação de KÖPPEN predomina em São Pedro (SP) o tipo CWa, clima mesotérmico (verão quente e úmido com inverno seco) tropical de altitude, com pluviosidade média anual de aproximadamente de 1200 mm a 1370 mm. As temperaturas médias mensais do período mais quente (outubro a março) oscilam entre 22°C e 27°C e as do período mais frio (abril a setembro) entre 16°C e 19°C, isto é, uma notável moderação em relação à amplitude térmica, cujas médias anuais são superiores a 22°C (CONTI, 1971).

Basicamente o município de São Pedro apresenta um período chuvoso nos primeiros e nos últimos meses do ano (novembro a março com 140 a 200mm) e um período sensivelmente mais seco nos demais meses como julho e agosto (SANTORO, 1991), em que o total de chuvas do mês mais seco não ultrapassa 30 mm (SILVA, 1977; FERREIRA, 2008).

Para reforçar tais dados pluviométricos consta o levantamento de medições (diárias e mensais) de precipitação referente ao período de novembro de 1942 a dezembro de 2000 elaborado pelo Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO) vinculado a Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Governo do Estado de São Paulo e também o Balanço Hídrico elaborado pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) do Governo do Estado de São Paulo. Neste sentido, a **Figura 21** apresenta a distribuição pluviométrica anual durante o período completo de 1943 a 2021 no município de São Pedro/SP, a qual destaca-se datas muito seca com volume total de chuva > 300mm e também períodos mais chuvosos com registro > 2000 mm.

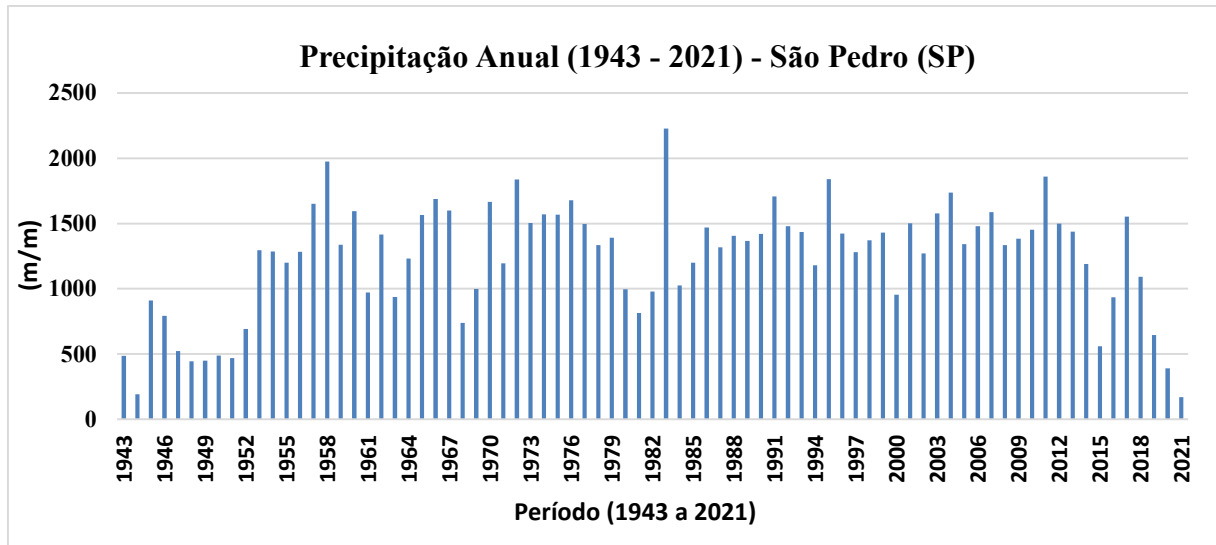


Figura 21: Distribuição pluviométrica anual. Fonte: FEHIDRO (2000); CIIAGRO (2022).

A **Tabela 6** apresenta o total pluviométrico referente a cada mês, durante o período de 22 anos (2000 a 2022), com informações adicionais: chuva máxima, chuva mínima, dias de chuva de cada mês, chuva total e média mensal de chuva. Tal levantamento apresenta os meses mais chuvosos são: 1º) Janeiro, 2º) Dezembro, 3º) Fevereiro, 4º) Novembro, 5º) Março, 6º) Outubro, 7º) Abril, 8º) Maio, 9º) Setembro, 10º) Junho, 11º) Julho e 12º) Agosto. Alguns destaques desta tabela são: a precipitação máxima em torno de 168 mm/dia no mês de setembro; em Agosto (considerado o mês mais seco) o total de dias chuvosos equivale ~ 15% e o mês de janeiro possui o maior percentual de dias chuvosos ~ 57%.

Tabela 6: Total Pluviométrico Mensal.

Dados Mensais - Período 23/03/2000 a 25/04/2022

Mês	Dias	Dias de Chuva	Chuva Total (mm)	Média Mensal da Chuva Total (mm)	Chuva Máxima (mm)	Chuva Mínima (mm)
Janeiro	682	386	5.541	251,9	110,4	0,2
Fevereiro	621	304	3.630	165,2	142,6	0,1
Março	688	298	2.870	129,3	86	0,2
Abril	685	156	1.593	69,8	70,1	0,2
Mai	682	127	1.227	55,8	101	0,2
Junho	658	145	983	44,8	70,8	0,2
Julho	682	117	720	32,8	47,8	0,2
Agosto	680	98	761	34,7	53	0,2
Setembro	660	145	1.205	54,8	168,9	0,1
Outubro	672	231	2.065	95,3	57,2	0,2
Novembro	652	251	2.997	137,9	87,2	0,2
Dezembro	679	303	4.013	183,3	153,2	0,2

Fonte: CIIAGRO (2022).

4.5 Feições Erosivas

A bacia do alto Espraiado apresenta uma variedade de feições, com o registro de verdadeiros complexos (ramificadas) e não somente feições erosivas individuais (**Figura 22**). Tais complexos provavelmente atuam diversos mecanismos de formação e desenvolvimento, originados tanto de fluxos superficiais como subsuperficiais, além de abatimentos do terreno e formação de degraus decorrente do pisoteio.



Figura 22: Registro de ocorrência de feições erosivas em 2022 e 2023 na bacia do córrego Espraiado.

Entre 1962 e 2006 (**Figuras 23 e 24**) houve uma redução de 76% dos polígonos de feições erosivas, a maior perda de solo foi identificada em 1962, 4.410.000 m³, ou seja, 300% maior do que em 2013 (1.428.000 m³); em ambos os cenários, as feições erosivas foram identificadas na alta e média bacia; tais feições estão associadas provavelmente, aos mecanismos de formação e de desenvolvimento como fluxos superficiais e subsuperficiais e intensa atividade pecuária; nas áreas das cabeceiras de drenagens foram registrados os maiores números de feições erosivas em ambos os cenários (1962 e 2006/2013) que pode estar associada à própria dinâmica evolutiva do relevo de *cuesta*, sobretudo em encostas com formas côncavas, declividades entre 20% e 40% e solo pouco espessos (DANIEL e VIEIRA, 2015).

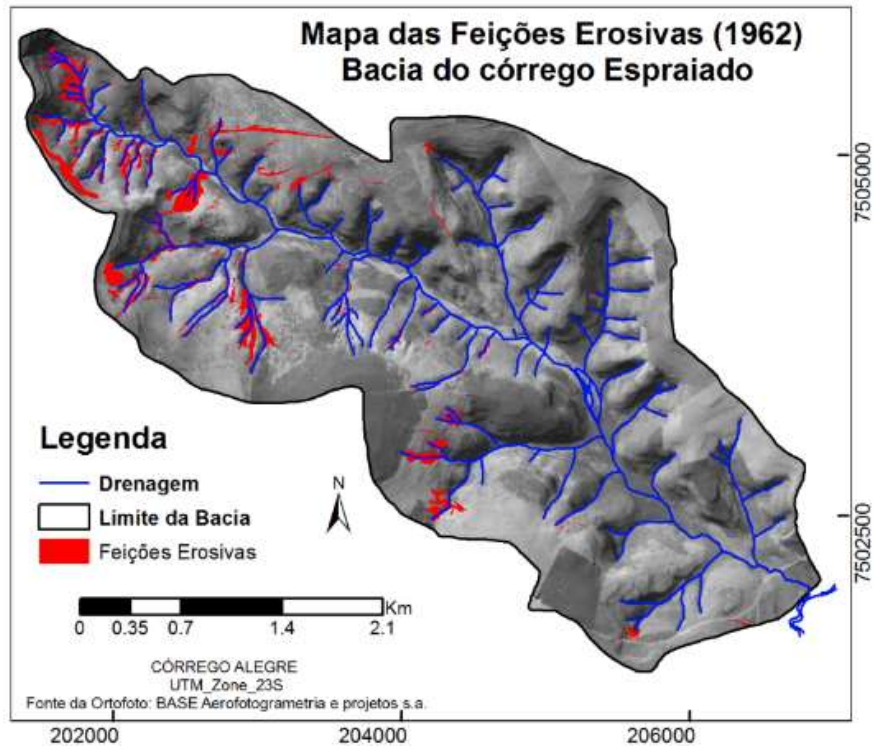


Figura 23: Mapa das feições erosivas do cenário de 1962. Fonte: Daniel e Vieira (2015)

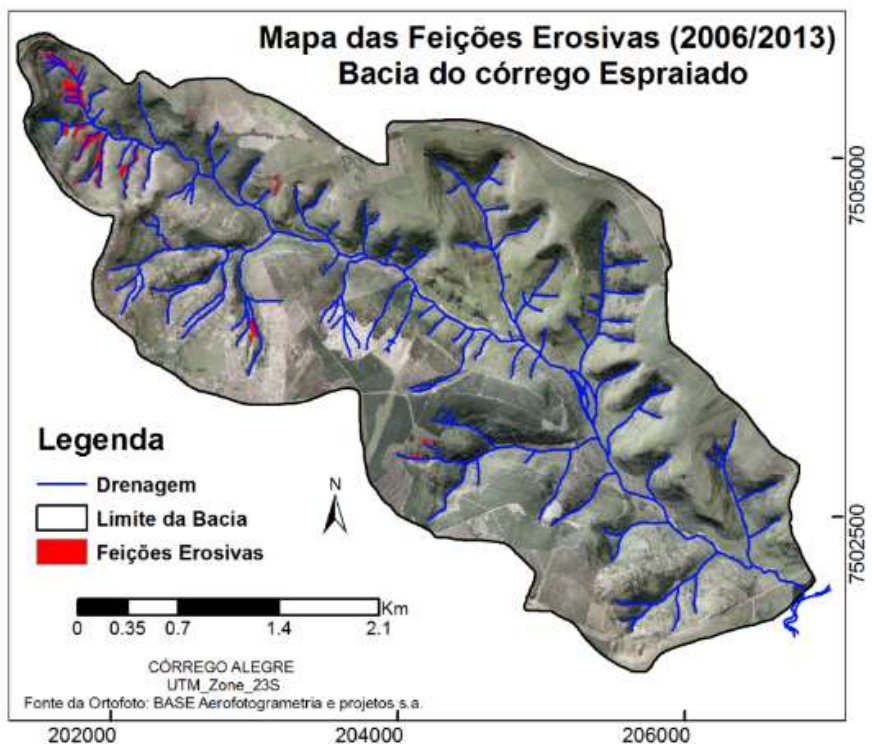


Figura 24: Mapa das feições erosivas do cenário de 2006/2013. Fonte: Daniel e Vieira (2015).

4.6 Uso do Solo

De forma geral, são identificadas práticas de pastagens, cana de açúcar, culturas anuais, o plantio de eucaliptos e a urbanização. Em locais restritos, como nas áreas côncavas, margens do canal principal e afluentes e parte superior de algumas encostas ainda encontra-se a vegetação original (mata latifoliada) (YAMANOUTH, 2003; ZUQUETTE *et al.*, 2007). Grande parte da mata ciliar encontrada atualmente deve-se ao replantio de mudas (DANIEL *et al.*, 2021), sendo que de forma geral, a distribuição da vegetação está condicionada principalmente pela presença de solos de tipos diferenciados tais como as características de fertilidade e de profundidade (CARPI JUNIOR, 1996).

Daniel *et al.*, (2021) analisaram as implicações do uso do solo e sua influência na gênese e distribuição das feições erosivas a partir do mapeamento de quatro cenários: 1962, 1972, 2000 e 2020 (**Figura 25**) com o auxílio de ortofotos, trabalho de campo e aplicação do índice estatístico potencial de erosão. Tal estudo identificou que as classes de solo exposto e pastagens são as mais suscetíveis em todos os cenários (**Figura 26**), com a redução da área total das feições erosivas a partir de 2000, devido ao aumento do percentual das classes mata, área urbana consolidada e silvicultura. Os autores também concluíram que as maiores suscetibilidades das classes de solo exposto e de pasto também estão associadas às classes de curvaturas côncavas e declividade entre 20 e 40%.

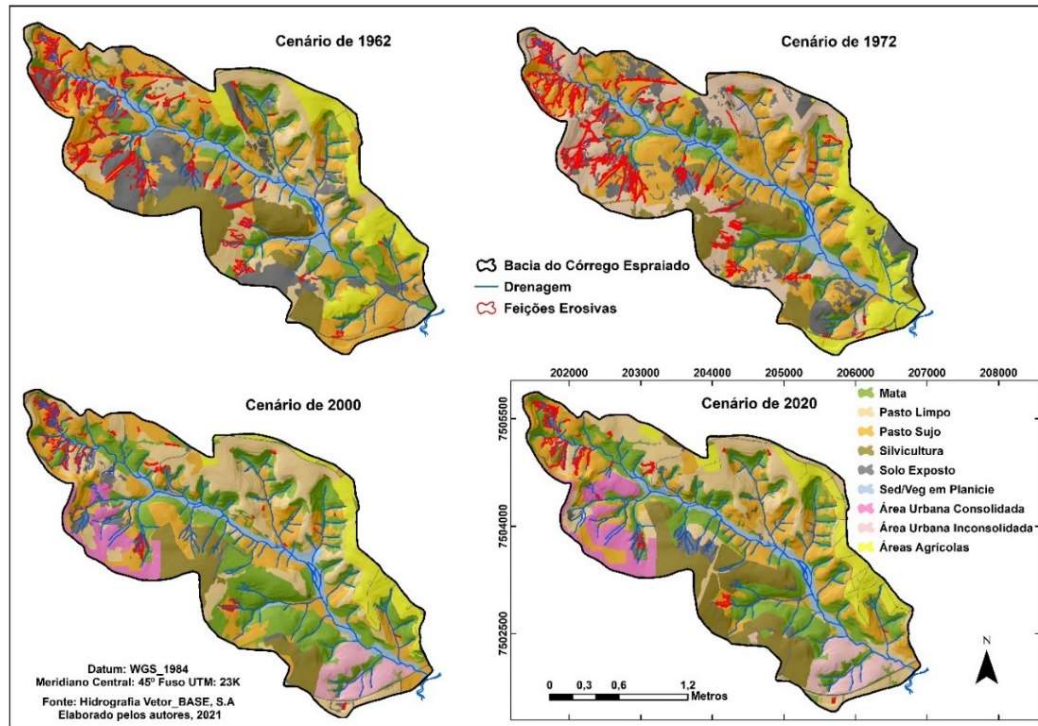


Figura 25: Mapas de uso do solo e das feições erosivas nos cenários de 1962, 1972, 2000 e 2020. Fonte: Adaptado de Daniel *et al.*, (2021).

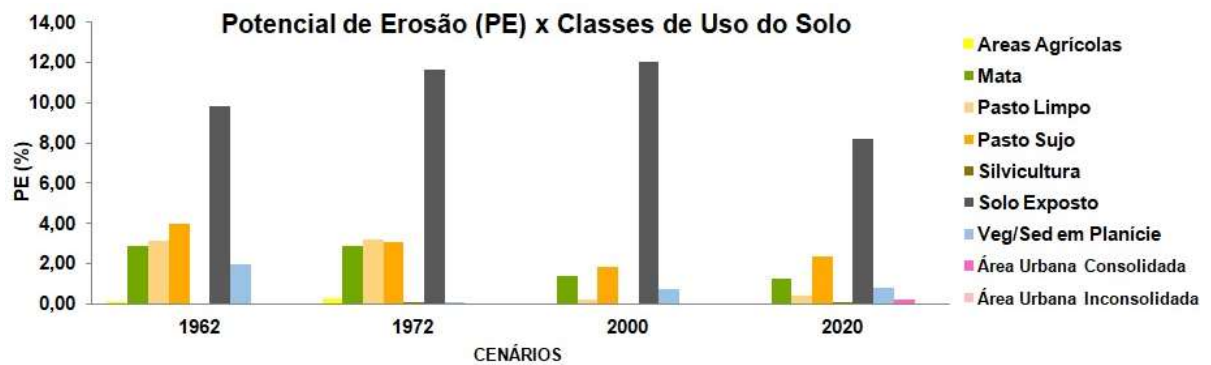


Figura 26: Valores dos índices de PE de acordo com as classes de uso do solo em todos os cenários. Fonte: Adaptado de Daniel *et al.*, (2021).

5. MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA

Segundo CHRISTOFOLETTI (1999), os modelos matemáticos são abstrações no sentido de substituir objetivos, forças, eventos por uma expressão que contém variáveis, parâmetros e constantes matemáticas, envolvendo a adoção de certo número de idealizações dos vários fenômenos estudados e atribuições as várias propriedades definidas.

A modelagem matemática tem seu início sistematizado no trabalho de Chorley e Haggett (1967) e, posteriormente no Brasil, com Christofoletti (1999), que fornece a idéia e a possibilidade de modelar (ou mesmo analisar) sistemas ambientais em simulações (FERNANDES, 2016). Essa ferramenta é utilizada para examinar a relação de parâmetros, variáveis condicionantes e processos em simulações a partir de uma análise de sensibilidade ou teste de hipóteses, além de reduzir experimentos e atividades em campo ou laboratório (SODRÉ, 2007; FERNANDES, 2016).

No âmbito da Geografia Física, a modelagem tem como exemplo clássico o emprego em datações morfológicas e nas últimas décadas a utilização de modelos de evolução da paisagem e a simulação de grandes áreas tridimensionais, considerando processos tais como: o escoamento superficial, o rastejo, a incisão fluvial, o intemperismo, entre outros (FERNANDES, 2016). Neste sentido, o SIMWE muito empregado no âmbito geomorfológico, é um modelo de base física, espacialmente distribuído, que simula a erosão, o transporte e a deposição por fluxo superficial (MITAS; MITASOVA 1998).

5.1 Modelos usados para erosão hídrica no Mundo

Neste item são descritos alguns exemplos de modelos de predição erosiva. Ressalta-se também que os mesmos, em grande parte, foram desenvolvidos e os seus parâmetros ajustados para condições de clima temperado, condições estas bem diferentes do clima tropical e assim importante a verificação da aplicabilidade destes modelos para as condições edafoclimáticas brasileiras, uma vez que o desenvolvimento de um modelo é bastante oneroso em termos de tempo e de recursos necessários, tanto do ponto de vista de coleta de dados quanto dos diversos níveis do conhecimento que envolve o processo erosivo (AMORIM, 2004).

Um grande exemplo do método quantitativo é o modelo de previsão da erosão do solo conhecido como a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS / USLE), o mais notório,

difundido e estudado. Tal modelo (**Equação 1**) possui fácil compreensão e utilização, desenvolvido em 1954 pelo Centro de Pesquisa em Agricultura da Universidade de *Purdue* (USA) e posteriormente revisado por Wischmeier e Smith (1965 e 1978) (ELLIOT *et al.*, 1989; AMORIM, 2004).

$$A = R.K.L.S.C.P \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

A é a perda de solo ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$);

R é o fator erosividade da chuva em $MJ.mm/(ha.h^{-1}.ano^{-1})$;

K é o fator erodibilidade do solo em $t.ha^{-1}.h^{-1}/(ha.MJ^{-1}.mm^{-1})$;

L é o fator comprimento de rampa, baseado nos valores, em metros, do comprimento de rampa (adimensional);

S é o fator declividade, baseado nos valores, em porcentagem, da declividade (adimensional);

C é o fator uso e manejo (adimensional);

P é o fator práticas conservacionistas (adimensional).

Este modelo empírico pode ser empregado em vários locais e permite a quantificação das taxas de perdas de solos proveniente da erosão laminar e por sulcos, durante um determinado período, a partir de parcelas experimentais e de parâmetros associados a erosividade, erodibilidade, topografia, uso ou cobertura vegetal, como também a adoção de práticas conservacionistas (WISCHMEIER; SMITH, 1978; NEARING *et al.*, 1990; LANE *et al.*, 1992).

A USLE não leva em consideração de forma individualizada os processos físicos envolvidos na erosão, como o desprendimento e o transporte de partículas do solo, sendo apenas discriminadas as significâncias dos diferentes fatores que regem o processo erosivo. Tal modelo também não prediz a distribuição espacial e temporal da erosão hídrica (**Figura 27**), como também a deposição e aporte de sedimentos, além da identificação pontual (localizada) das voçorocas (WILLIAMS, 1975; FOSTER, 1982; CASTRO, 1992; RANIERI, 2000; PRUSKI, 2006; CARVALHO, 2014; PINTO, 2014).

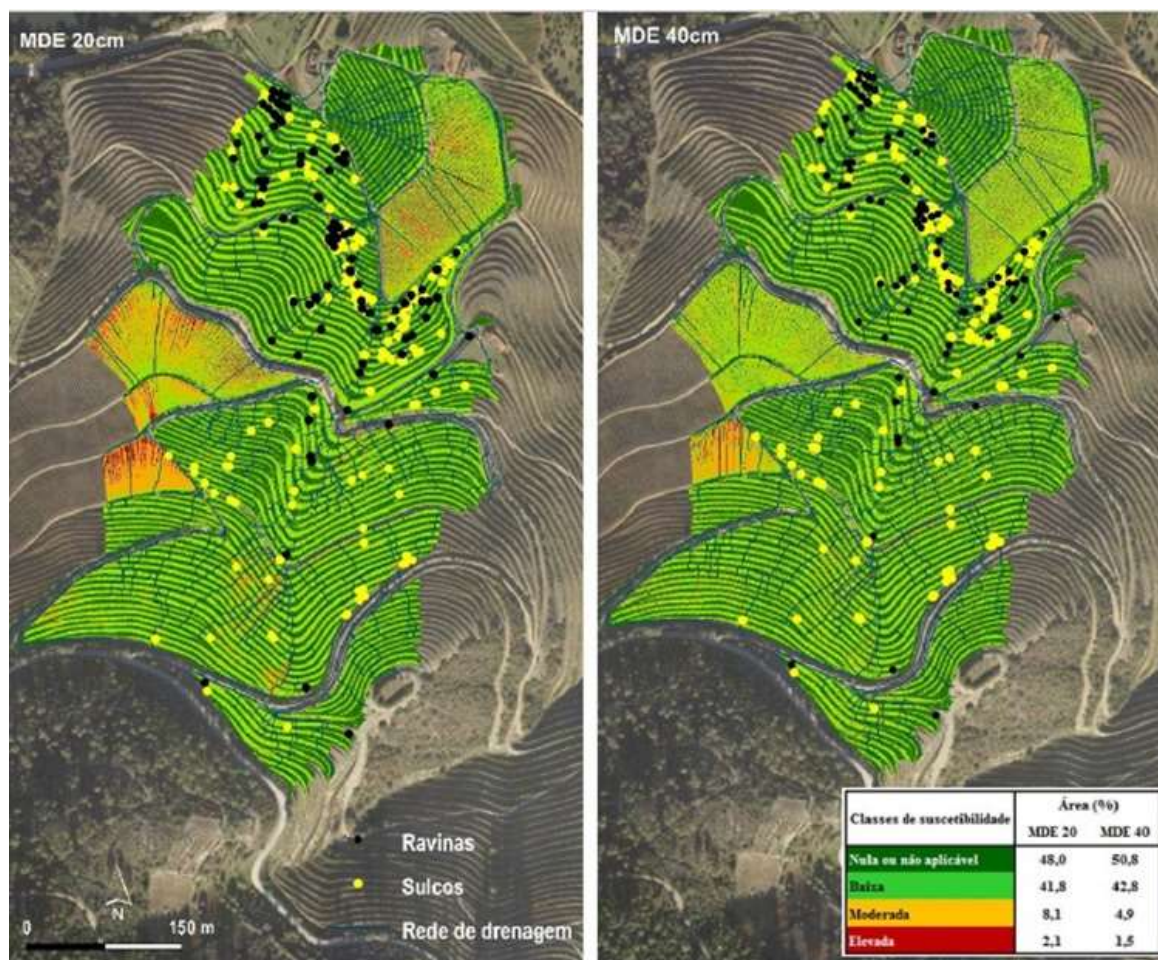


Figura 27: Exemplo de representação espacial de suscetibilidade gerado pelo Modelo USLE. Fonte: Adaptado de COSTA (2016).

A **Tabela 7** apresentada por Silva e Crestana (2004), ilustra alguns modelos desenvolvidos e utilizados para estimativa do processo de erosão em bacias hidrográficas a partir da USLE. Para exemplificar destaca-se de forma mais detalhada a *RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)* (RENARD *et al.*, 1991; RENARD *et al.*, 1997) e a *MUSLE (Modification Universal Soil Loss Equation)* (WILLIAMS, 1975) que surgiram para corrigir e superar as limitações da USLE.

A *RUSLE (Figura 28)* estima a perda de solo média anual a partir da precipitação e o escoamento as quais consideram o mínimo de vinte anos de mensuração e não apenas um único evento, inclui conceitos da modelagem da erosão baseada na descrição do processo físico como forma de melhorar as previsões de erosão, estima as perdas de solos provocadas pelas erosões laminar e em sulcos em situações onde não é possível aplicar a USLE (AMORIM, 2004; ABDO

e SALLOUM, 2017). As limitações da RUSLE são: (i) ter base empírica que dificulta muito sua aplicação para outras condições edafoclimáticas, (ii) desconsidera o processo de deposição o que dificulta a sua aplicação para grandes áreas as quais a deposição tem importância expressiva (PINTO, 2014).

Tabela 7: Exemplo de modelos utilizados para estimativa de erosão em bacias hidrográficas.

Modelo	Nome	Autor e Ano
USLE	Universal Soil Loss Equation	Wischmeier; Smith (1978)
ANWERS	Areal Non - Point Source Watershed Environmental Response Simulation	Beasley <i>et al.</i> (1980)
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator	Williams (1975)
AGNPS	Agricultural Non-point Pollution Source	Young <i>et al.</i> (1987)
CREAMS	Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems	Knisel (1991)
WESP	Watershed Erosion Simulation Program	Lopes (1987)
GLEAMS	Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems	Knisel (1991)
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation	Renard <i>et al.</i> (1991)
SWAT	Soil and Water Assessment Tool	Arnold <i>et al.</i> (1998)
CHDM	Catchment Hydrology Distributed Model	Lopes (1995)
KINEROS	Kinematic runoff and Erosion Model	Smith <i>et al.</i> (1995)
EUROSEN	European Soil Erosion Model	Morgan <i>et al.</i> (1998)
EROSION3D	3D Erosion Model	Schmidt <i>et al.</i> (1999)
LISEN	Limburg Soil Erosion Model	Jetten e De Roo (2001)
TOP MODEL	Topography-based hydrological model	Beven e Freer (2001)
SLURP	Semi-distributed Land Use- based Runoff Process	Lacroix <i>et al.</i> (2002)
WEPP	Water Erosion Prediction project	Flanagan <i>et al.</i> (2001)
IMPIERO	Agricultural Soil Erosion Evaluation Model	Lieznar; Nearing (2003)

Fonte: Modificado de Silva e Crestana (2004).

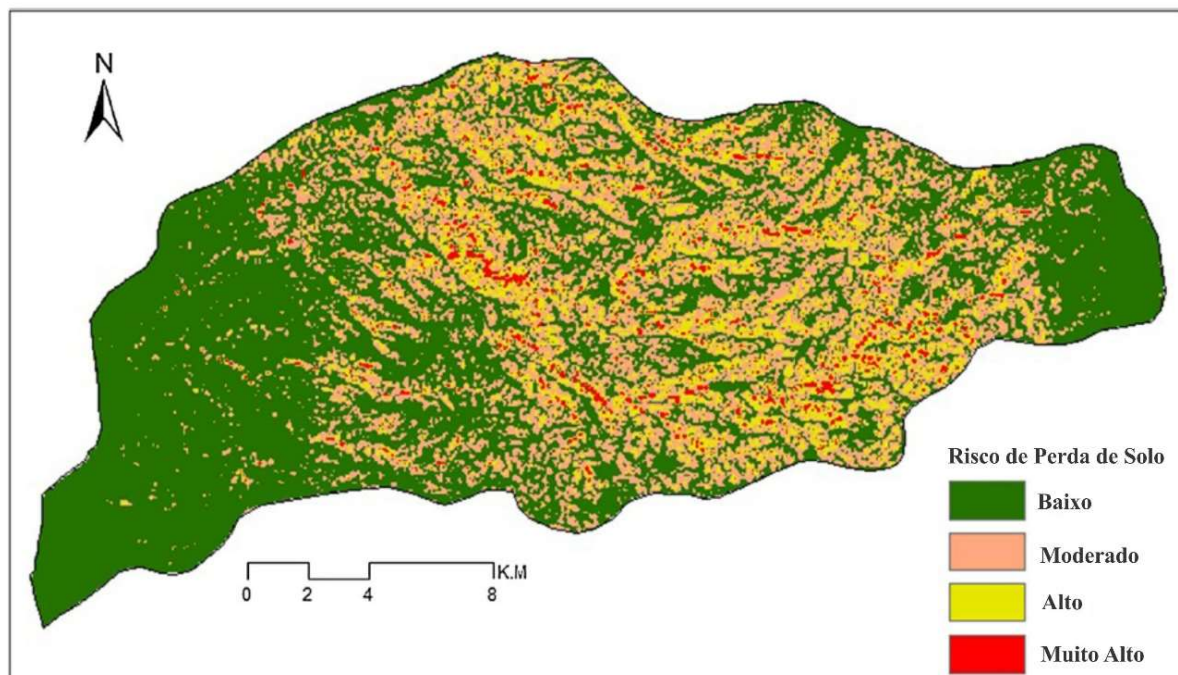


Figura 28: Exemplo de representação espacial de perda de solo na bacia Marqya/Síria a partir da utilização do modelo RUSLE. Fonte: Adaptado de Abdo e Salloum (2017).

Em relação à MUSLE trata-se de uma Equação modificada da USLE desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965; 1978), em que a principal diferença é o cálculo da média anual bruta da erosão em função da substituição do fator energia cinética da chuva (R) por fatores de escoamento e vazão (WILLIAMS, 1975). Tal modelo melhora a projeção e a estimativa da produção de sedimentos em vertentes, pois substitui a precipitação pelo escoamento e permite que a Equação seja aplicada para eventos individuais de chuva (AVANZI *et al.*, 2008; PANDEY *et al.*, 2009; SILVA, 2015).

O modelo TOPMODEL (*Topography Based Hydrological Model*) desenvolvido por Beven e Kirkby (1979), também simula cenários de erosão e consiste na idéia de que a topografia exerce um controle dominante sobre o escoamento que se propaga em bacias hidrográficas sob diferentes usos e condições edafoclimáticas (BHASKAR *et al.*, 2005; LIN *et al.*, 2010; PAN e KING, 2012). Trata-se de um modelo de transformação de chuva em vazão do tipo conceitual e distribuído, o qual utiliza relações físicas para representar bacias hidrográficas e seus processos hidrológicos, sendo as variáveis de entrada a precipitação e a evapotranspiração potencial, consideradas homogêneas em toda a bacia e, portanto, valores médios para as mesmas (BEVEN *et al.*, 1995; HOLLANDA *et al.*, 2015; MELO, 2017).

O EUROSEM (*European Soil Erosion Model*) de Morgan (1986), trata-se de um modelo dinâmico, distribuído, capaz de simular o transporte, a erosão e a deposição de sedimentos associado a processos de sulcos erosivos em tempestades únicas para campos individuais e pequenas bacias hidrográficas (MORGAN *et al.*, 1998). Esse modelo inclui a produção do escoamento, perda total de solo, hidrograma e gráfico de sedimentos, simulação do fluxo entre sulcos e efeitos da cobertura vegetal, fragmentos da rocha, infiltração e velocidades do fluxo e erosão por salpicamento (MORGAN *et al.*, 1998).

O WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) (**Figura 29**) que consiste na base do modelo SIMWE foi lançado em 1995 para aplicação em terras agrícolas. Possui a capacidade de estimar as taxas de erosão, distribuições espacial e temporal da perda de solo e deposição na vertente ou em cada ponto dela, a nível diário, mensal ou anual (MEYER e WISCHMEIER, 1969; FOSTER e MEYER, 1972; MEYER *et al.*, 1975; FLANAGAN e NEARING, 1995; AKSOY e KAVVAS, 2005; LEITE, 2009). Trata-se de um modelo dinâmico que diante das limitações dos modelos empíricos buscou-se uma alternativa a partir dos princípios físicos dos processos de erosão e hidrologia que regem o desprendimento, o transporte e a deposição das partículas de solo com equações de continuidade relacionadas aos processos inerentes à erosão do solo em estado estacionário (NEARING *et al.*, 1989; FLANAGAN *et al.*, 2001).

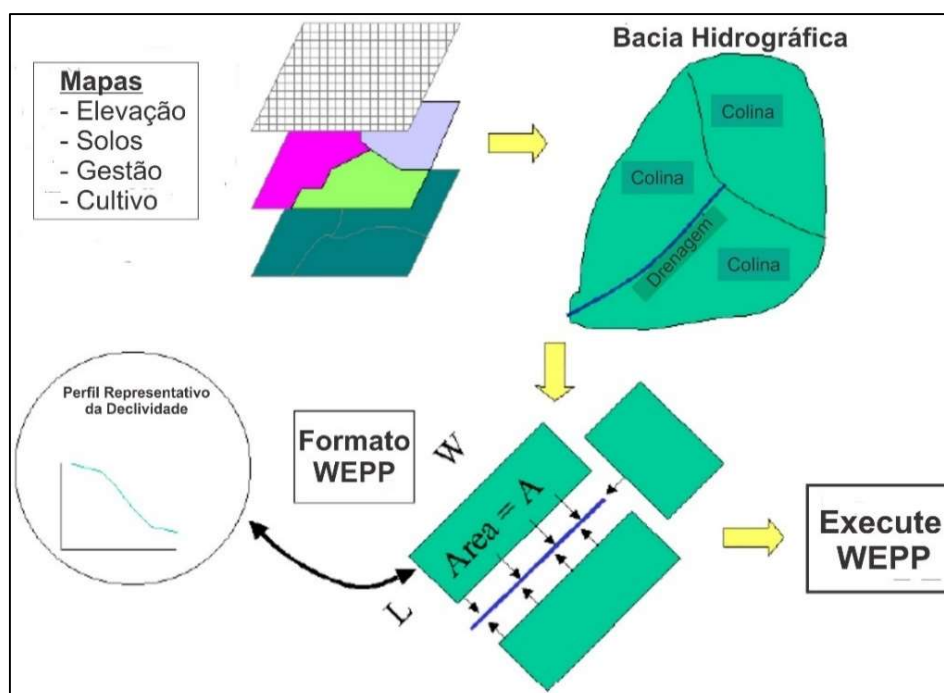


Figura 29: Etapas do processo de simulação de uma bacia hidrográfica pelo WEPP. Fonte: Adaptado de FLANAGAN *et al.*, (2000).

A maior complexidade associado ao elevado número de parâmetros necessários a aplicação do WEPP (**Equação 2**) resulta na capacidade de simular e calcular os processos (áreas de sulcos erosivos) em função do clima, hidrologia (infiltração de água, balanço hídrico diário), cobertura vegetal, solos, erosão laminar e em sulcos, deposição e irrigação, além de prever se haverá escoamento superficial, embora não contemple as voçorocas e canais perenes (LANE e NEARING, 1989; LANE *et al.*, 1992; MACHADO *et al.*, 2003; FUJIHARA 2002; FLANAGAN *et al.*, 2000; FLANAGAN *et al.*, 2004; FLANAGAN *et al.*, 2007; LEITE, 2009).

$$\frac{\delta G}{\delta X} = Kr (t - tc) \left(1 - \frac{G}{Tc}\right) + KiI^2 \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

G = carga de sedimento em um ponto x (m) da encosta, kg/m.s;

Kr = parâmetro de erodibilidade em sulcos, s/m;

t = tensão de cisalhamento que atua nas partículas de solo, Pa;

tc = parâmetro de resistência ao cisalhamento, Pa;

Tc = capacidade de transporte dos sedimentos pelo escoamento, kg/m.s;

Ki = parâmetro de erodibilidade entre sulcos, kg/m.s;

I = intensidade da chuva, m/s.

Como forma de auxiliar nas medidas de conservação o WEPP divide a encosta em faixas homogêneas e trata cada faixa como uma encosta independente com entrada adicional de água e sedimento, as quais podem ter topografia complexa embora todas as propriedades sejam consideradas homogêneas (NEARING *et al.*, 1989; FLANAGAN *et al.*, 2001). Tal modelo considera as mudanças de uso do solo e modela a variabilidade espacial e temporal na topografia, na rugosidade da superfície, nas propriedades do solo, nas culturas e condições de uso da terra em encostas que afetam os processos hidrológicos e erosivos (RISSE *et al.*, 1991; AMORIM, 2004; PEREIRA, 2014).

A estrutura do WEPP apresenta três versões básicas: vertentes (“*hillslope version*”), bacias hidrográficas (“*watershed version*”), quadrícula (“*grid version*”) (LANE e NEARING, 1989; MACHADO *et al.*, 2003; LEITE, 2009) com operações diárias para calcular as condições

de solo e vegetação e prever a hidrologia (precipitação, infiltração e escoamento superficial) e erosão a partir de eventos individuais (LAFLEN, *et al.*, 1994; LEITE, 2009; COSTA 2015).

As limitações do WEPP quando aplicado em ambiente tropical estão associadas ao elevado número de parâmetros de entrada necessário para aplicação do modelo, o que limita a sua utilização em situações com poucos dados, a necessidade de treinamento para a efetiva implementação do modelo e a impossibilidade de prever a erosão em voçorocas (MERRITT *et al.*, 2003; AMORIM, 2004).

Uma segunda versão do WEPP, o modelo GeoWEPP (**Figura 30**) se configura pela capacidade de superar as limitações do WEPP, pois permite o processamento de dados digitais com o MDE, ortofotos, levantamentos de solos, mapas de uso do solo e dados de agricultura de precisão (MACHADO *et al.*, 2003; YUKSEL, *et al.*, 2008). Tal modelo, também fornece estimativas espaciais e temporais mais detalhadas da desagregação dos solos e da deposição de sedimentos na vertente ou em cada ponto dela em intervalos diários, mensais ou anuais (FLANAGAN *et al.*, 2007).

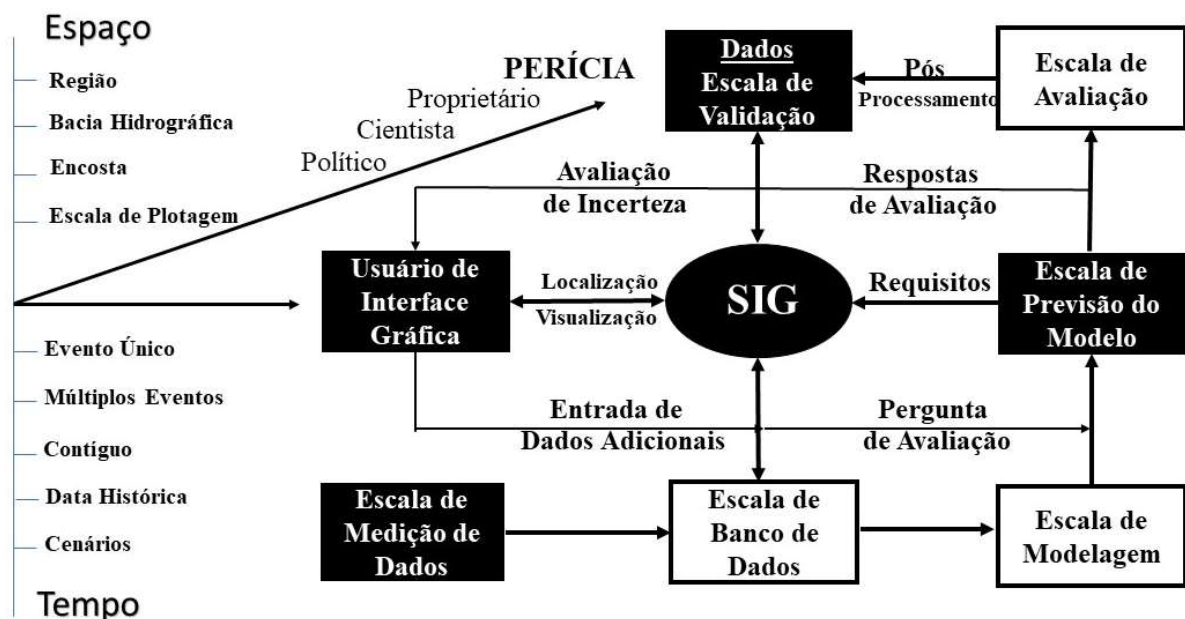


Figura 30: Fluxograma do modelo GeoWEPP. Fonte: Adaptado de Renschler (2003)

Os dados de entradas do GeoWEPP estão associados a declividade, tipos de cobertura da terra, mapa do solo, clima e são integrados aos bancos de dados espaciais do WEPP e os resultados são produzidos a partir do SIG. Para prever a produção de sedimentos e escoamento

na escala da bacia hidrográfica o GeoWEPP integra o modelo WEPP e o software TOPAZ (*Topography Parameteri Zation*) onde os arquivos são gerados e os dados topográficos são parametrizados com base no MDE. Ressalta-se que os limites do modelo estão associados aos estudos no Brasil, principalmente pela indisponibilidade de dados de entrada e o seu emprego para as condições edafoclimáticas brasileiras (YUKSEL *et al.*, 2008).

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (**Figura 31**), é um modelo de domínio público desenvolvido conjuntamente pela USDA Agricultural Research Service (USDA-ARS) e Texas A e M AgriLife Research. Tal modelo de base física foi projetado para testar e prever a circulação de água e sedimentos em bacias hidrográficas, em intervalos diários, mensal e anual, para analisar e prevenir os efeitos erosivos, o impacto ambiental do uso da terra e mudanças climáticas sobre os escoamentos superficiais e subterrâneos, produção de sedimentos e qualidade da água (MACHADO, 2002; MARCHIORO *et al.* 2011; MELO, 2017).

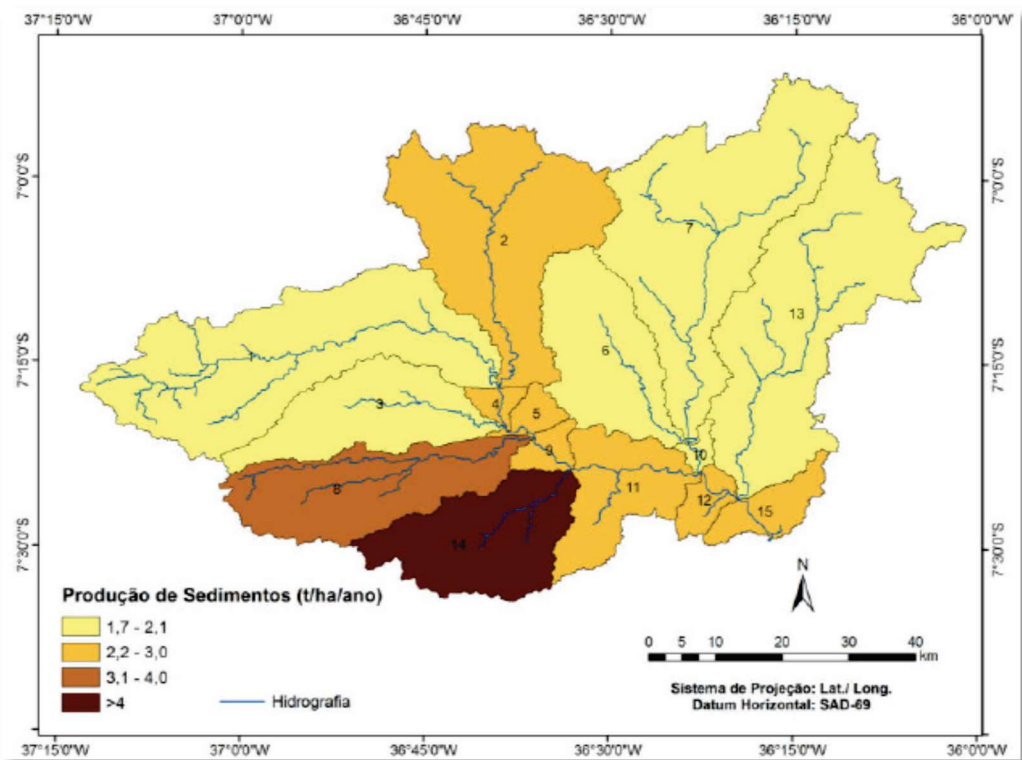


Figura 31: Exemplo de utilização do Modelo SWAT e o método e a forma de espacialização de produção de sedimentos representado na bacia do Rio Taperoá/PB para o período de 1973 a 1990. Fonte: Adaptado de Dantas *et al.*, (2015).

Capaz de simular longos períodos (> 100 anos) de forma a computar os efeitos das alterações no uso do solo, o SWAT pode ser aplicado em bacias com dimensões variadas (ARNOLD e ALLEN, 1996; MACHADO, 2002; DURÃES, 2010; CARVALHO, 2014; MARCHIORO *et al.* 2014). Possibilita a divisão da bacia em unidades de resposta hidrológica (HRUs), considera as classes de solo, cobertura vegetal, topografia, uso do solo e possibilita a subdivisão de inúmeras células, sendo cada célula uma sub-bacia (DURÃES, 2010). Para determinar a produção de sedimentos, o SWAT utiliza a Equação da MUSLE e, portanto, o escoamento superficial e a simulação para um único evento (DANTAS *et al.*, (2015).

Para acrescentar essa breve descrição de modelos matemáticos de erosão, a **Tabela 8** apresenta um resumo de modelos aprimorados em função de resoluções de dados topográficos e da incorporação de dados precisos de pedologia, geomorfologia e climatologia. Ressalta-se que esta discussão não teve como objetivo esgotar os exemplos e possibilidade da modelagem matemática para o estudo, investigação e avaliação da erosão, mas apenas apresentar o aumento da preocupação com a gravidade do fenômeno.

Tabela 8: Exemplo de modelos matemáticos quanto às escalas e limitações.

MODELO	TIPO	ESCALA	SAÍDA DE DADOS	LIMITAÇÃO	REFERÊNCIA
USLE	Empírico	Encosta e Bacia Hidrográfica	Erosão do Solo	Não é preciso para simulação de único evento chuvoso; não estima deposição, carga de sedimentos e erosão no canal ou em voçorocas.	Wischmeier; Smith (1978)
SWRRB	Físico	Bacia Hidrográfica	Produção de sedimentos, propagação de nutrientes e pesticidas por sub bacia.	Não simula erosão para eventos isolados.	Willians <i>et al.</i> (1985)
EPIC	Físico	Encosta e Bacia Hidrográfica	Produção de Sedimentos	Não simula escoamento superficial.	Willians <i>et al.</i> (1984)
CREAMNS	Físico	Bacia Hidrográfica de 40 a 400ha.	Produção de sedimentos e qualidade da água	Não fornece informações durante a chuva; a hidráulica do fluxo é aproximada para o fluxo gradualmente variado.	Knisel (1980)
WEPP	Físico	Encosta e Bacia Hidrográfica	Escoamento e Produção de Sedimentos	É limitado devido à elevada necessidade de dados; não simula erosão para voçorocas.	Foster (1987)
SWAT	Físico	Bacia Hidrográfica	Erosão/ produção de sedimentos e qualidade da água em forma de mapas e gráficos.	Não simula erosão para eventos isolados; indisponibilidade para grandes bacias; assume a dimensão do canal como estática.	Arnold e Srinivasan (1995)
SIMWE	Físico	Bacia Hidrográfica	Erosão/ produção e deposição de sedimentos	Em processo de análise e validação.	Mitasova <i>et al.</i> (1998)

Fonte: Modificado de Pinto (2014).

5.2 Modelos usados para erosão hídrica no Brasil

Os trabalhos publicados no Brasil nos últimos anos, estão relacionados ao emprego de vários modelos já citados no subitem anterior. Neste sentido, segue exemplos de trabalhos publicados no Brasil e que estão apresentados em ordem cronológica.

Carvalho (2014) avaliou o desempenho do modelo SWAT numa determinada bacia experimental situada em Brasília a partir de índices de desempenho e coleta pontuais de água submetidos a análise em laboratório. Os resultados associados às vazões foram satisfatórios e em relação a produção de sedimentos foram inadequados, mesmo com o ajuste obtido (calibração automática com uma ampla gama de parâmetros) entre os valores calculados pelo modelo e os observados em campo também demonstraram insatisfatórios.

Cecatto (2014) analisou a aplicação do modelo de Hartley numa determinada bacia em Lages/SC por meio da análise de perda de solo e água, simulações e auxílio do índice de confiança (concordância e correlação). Tal estudo identificou que o modelo é capaz de prever as perdas de água, com índices de correlação entre 0,75 e 0,91, semelhantes aos índices de concordância de 0,73 a 0,91, com variação de sofrível a muito bom. Em relação às perdas de solo, o modelo apresentou índices superiores, com valores de 0,96 (correlação) e 0,95 (concordância), considerados ótimos.

Marchioro *et al.* (2011) analisaram a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do córrego Santa Maria (RJ) decorrente de profundas transformações do uso e ocupação do solo a partir da aplicação do modelo SWAT, dados topográficos, uso e cobertura da terra, bem como dados climáticos e hidrossedimentológicos diários e mensais e, portanto, a simulação de cenários ambientais associado ao reflorestamento. Os resultados evidenciaram que o reflorestamento minimiza a produção de sedimentos e a concentração de sólidos em suspensão na água do canal em relação ao cenário ambiental atual.

Dantas *et al.* (2015) realizaram um estudo para estimar a produção de sedimentos na bacia do rio Taperoá/PB por meio da aplicação do modelo SWAT e a utilização de dados de precipitação, temperatura e umidade no período de 1970 a 1993, além de mapas de solo, uso e ocupação do solo e topografia. Os valores obtidos pelo modelo SWAT foram comparados com os dados estimados de vazão e produção de sedimentos, os quais demonstraram satisfatórios,

com vazão média de 6,86 m³/s e vazão média simulada de 7,73 m³/s, enquanto a produção de sedimentos para todo o período registrou 2,5 t/ha/ano.

Guimarães *et al.* (2015) aplicaram o modelo USLE em Teixeira de Freitas/BA, com a instalação de parcelas de perdas de solo numa área com fragmentos de eucalipto, mata nativa e solo exposto. Os resultados demonstraram que a USLE superestimou os valores de perdas de solo em mata e eucalipto, embora na fase inicial do plantio o modelo foi eficaz para reduzir as perdas de solo por erosão hídrica; a área coberta com eucalipto apresentou menor perda que a área de mata nativa, devido ao fator topográfico médio da mata (0,66) ser superior da floresta homogênea de eucalipto (0,61). Por fim, a declividade e a ausência de vegetação contribuíram para a maior perda de solo e a formação de enxurradas e arraste de partículas.

Hollanda *et al.* (2015) avaliaram a aplicabilidade do modelo hidrológico TOPMODEL em simular os hidrogramas de escoamento superficial gerado por eventos isolados de precipitação numa bacia de Alegre/ES. Os autores utilizaram-se características físicas, hidrológicas, edáficas, hidrogramas de escoamento superficial relativos a eventos de vazão e precipitação medidos entre 2009 e 2012. Tal estudo observou que o modelo demonstrou tendência em subestimar a vazão máxima e a lâmina total de escoamento superficial, embora o TOPMODEL seja promissor na modelagem dos hidrogramas de escoamento superficial de eventos de chuva isolados.

Michette (2015) aplicou a USLE no município de Brotas/SP como forma de avaliar a erosão pluvial laminar com o auxílio de ferramentas de SIG e métodos distintos de cálculo do fator topográfico (LS). Os resultados apresentaram suscetibilidade predominantemente baixa entre 90,36% e 42,82% da área, com perda de solo tolerável e expectativa de erosão predominantemente ausente, ou seja, o uso e manejo do solo atual estão provocando erosão abaixo do limite de tolerância. Assim, as taxas de perda de solo por erosão variaram de 0 a > 200 t.ha⁻¹.ano⁻¹, sendo que o registro das feições erosivas estão relacionadas com as áreas de maiores suscetibilidades.

Silva *et al.* (2015) estudaram a perda de solo com o auxílio do GeoWEPP, dados de entradas do solo, clima, uso e topografia numa bacia em Terra Dura/RS (**Figura 32**). A perda de solo média estimada foi de 1,42 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, sendo maiores no solo descoberto, seguido da floresta de eucalipto mais jovem, floresta de eucalipto mais antiga e floresta nativa. Ressalta-se que tais dados foram maiores que a tolerância admitida em apenas 2,2% da bacia, sendo que

a espacialização da perda de solo possibilitou identificar os locais mais críticos, priorizados na adoção de práticas conservacionistas.

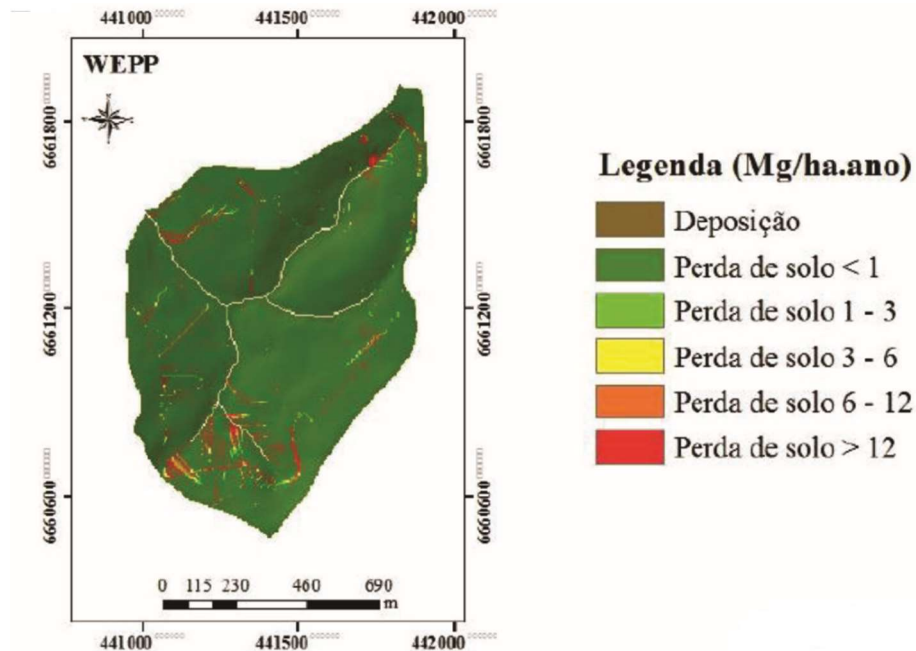


Figura 32: Espacialização das perdas de solo na sub-bacia do horto florestal Terra Dura. Adaptado de Silva *et al.*, (2015)

Tavares *et al.* (2017) estimaram a perda de solo no município de Furnas/MG a partir das aplicações do modelo RUSLE e do Método de Erosão Potencial (EPM) (**Figura 33**). Tal estudo identificou variação entre 0,0087 e 5,50 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e no modelo RUSLE entre 0,05 e 18,64 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. As perdas médias de solo registraram 1,46 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ pelo EPM e 1,52 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ pela RUSLE, valores similares e menor que o limite mínimo da Tolerância de Perda de Solo (TPS).

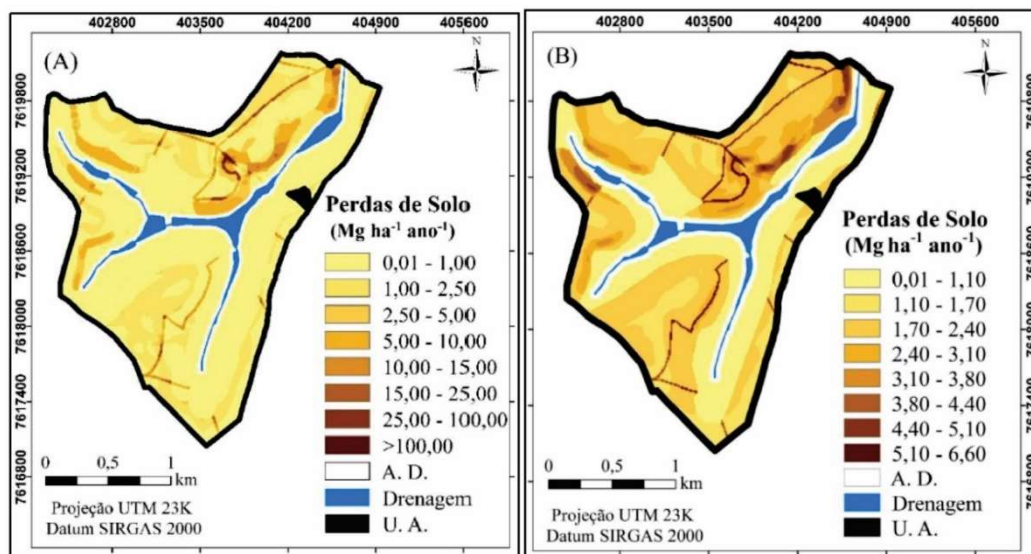


Figura 33: (A) Perdas de solo no modelo RUSLE e (B) Perdas de solo no modelo EPM. Fonte: Adaptado de Tavares *et al.* (2017).

Barros *et al.* (2018) estimaram a perda de solo e analisaram o uso do solo em duas bacias hidrográficas (Lontra e Manoel Alves Pequeno/TO) numa escala evolutiva (1990 a 2007) por meio do emprego da RUSLE. Tais autores registraram a erosão hídrica numa variação de 25% (extremamente alto, relevo declivoso e prática da pastagem) a 52% (suave, baixa erodibilidade e relevo plano e presença de vegetação).

Demarchi e Piroli (2020) a partir do emprego do modelo WaTEM/SEDEM numa bacia em Santa Cruz do Rio Pardo/SP analisou o uso de 2018 e o cenário de adequação do uso à legislação florestal brasileira (LF). O estudo concluiu que houve redução das perdas de solo por erosão e do aporte de sedimentos a jusante, com aumento da deposição de sedimentos na bacia no cenário LF em relação a 2018, o qual apresenta cobertura vegetal, práticas conservacionistas e retenção de sedimentos.

Francisco (2020) mapeou as áreas desflorestadas numa unidade de conservação da Amazônia, com dados em ambiente SIG, aplicação da USLE e do índice de erosividade. O autor registrou 20,7 mil ha em Neossolos Litólicos e a estimativa de 1,2 milhão de t/ha/ano; no Argissolo de textura média estimou-se 1,37 t/ha/ano numa área de 34 mil t/há/ano; em textura grossa que corresponde a 82% das áreas desflorestadas entre 2007 e 2016 as perdas de solos ocorreram na ordem de 12,7 milhões de t/ha/ano, portanto, alta produção de sedimentos e risco de assoreamento.

Ferraz Jardim *et al.* (2020) a partir do emprego da USLE numa bacia em Serra Talhada/PE estimou a perda de solo por erosão hídrica em diferentes períodos (1996 - 2015). Os autores identificaram as maiores perdas de solo em torno de $5,03 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto que as menores $3,88 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, resultados satisfatórios que permitiram hierarquizá-las em função dos períodos estabelecidos.

Nachtigall *et al.* (2020) avaliaram a estimativa de perda de solo pela sazonalidade agroclimática a partir do emprego da RUSLE e análise dos fatores erosividade (R), erodibilidade (K), topografia (LS), cobertura do solo (CS) e a média anual da precipitação numa determinada bacia do Rio Grande do Sul. Os autores identificaram que a variação sazonal teve efeito na perda de solo, com maiores taxas de erosão no período de verão e primavera, as perdas de solo entre 5 e $50 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ foram registradas em 24% da área, influenciadas pela R, LS e CS.

Ferreira *et al.*, (2021) monitoraram e identificaram precipitações erosivas e as perdas de solos por meio da instalação de parcelas experimentais e aplicação do modelo WEPP (**Figura 34**) numa bacia em Poços de Caldas/MG. Os autores concluíram que 57,3% dos eventos são erosivos, em que os quatro de maiores magnitudes participaram com 47,2% da erosividade, além de 50% da área de estudo apresentar solo exposto com maior perda de solo do que as áreas vegetadas.

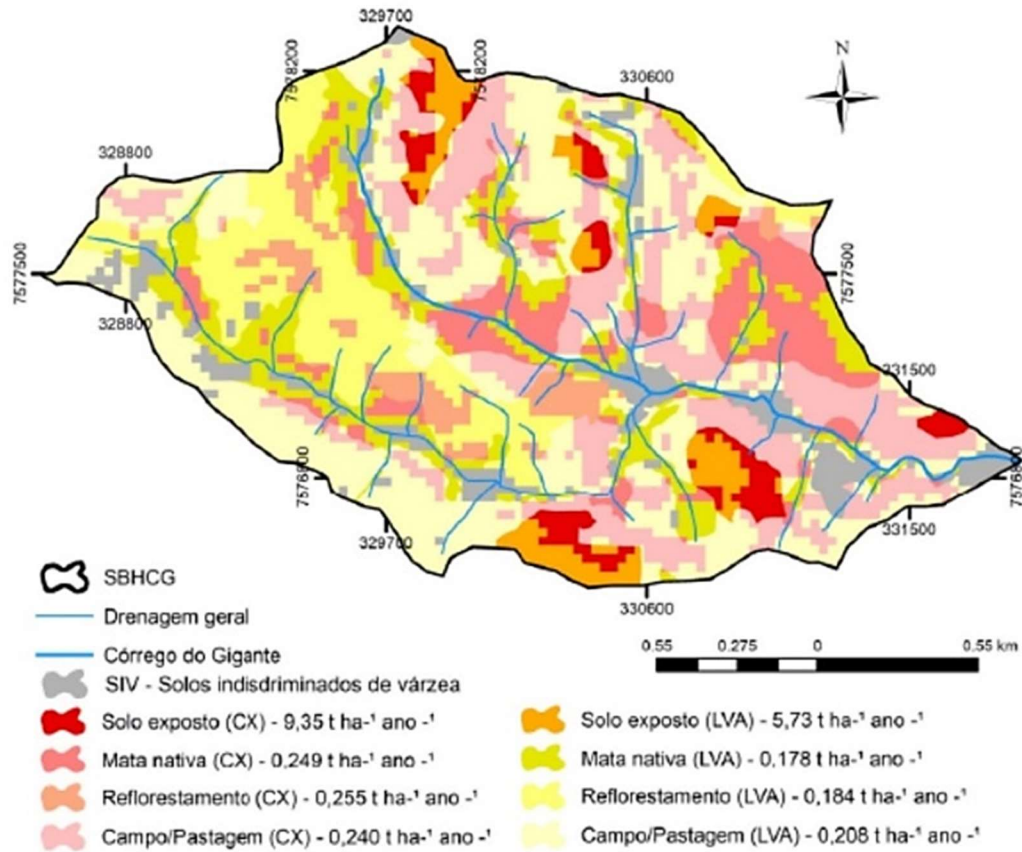


Figura 34: Espacialização das taxas de perda de solo (nas classes de uso do solo) na Bacia do Córrego do Gigante. Fonte: Adaptado de Ferreira *et al.* (2021).

Fiorese (2021) avaliou as perdas potenciais de solo das áreas de cafeicultura e pastagem do município de Cachoeira de Itapemirim (ES) por meio do emprego da USLE e auxílio do SIG ArcGis. Foram levantados dados de declividade, comprimento da rampa, erosividade e erodibilidade. O autor identificou que na cafeicultura a maior classe de intensidade é a “moderada forte” com 57,85%, mas, juntas, as classes compreendidas de “moderada a forte” a “muito forte” somam 71,24%; nas pastagens, registrou 50,94% para a primeira classe e 41,86% para as classes “fraca” e “moderada”, além do registro de várias feições erosivas, principalmente em pastagens.

Toniolo *et al.* (2021) estimaram a perda de solo (**Figura 35**) numa determinada bacia do interior do estado de São Paulo com auxílio de técnicas de geoprocessamento e dos índices Risco de Erosão Potencial (REP) e Risco de Erosão Emergente (EEP) além do emprego da USLE. Os resultados mostraram que no ano de 2015, a bacia perdeu em média $5,21 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ de solo, com a predominância de classe do tipo “Nulo a Muito Baixo” em cerca de 80% da

área, com o registro muito alto (49% em relação à área total) para o REP e 70% (muito baixo) para o REE.

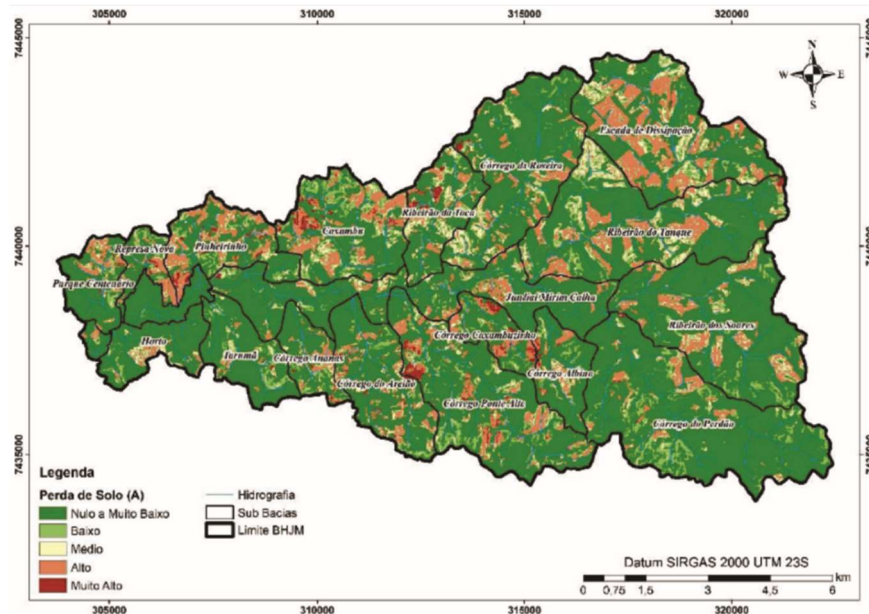


Figura 35: Representação espacial de perda de solo da bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim. Fonte: Adaptado de Toniolo *et al.* (2021).

Macêdo *et al.* (2021) avaliaram as áreas mais suscetíveis à erosão hídrica no Parque Nacional da Serra da Capivara (PNSC) sudeste do Piauí com o auxílio da USLE, que identificou e quantificou as áreas mais suscetíveis aos processos erosivos e escoamento superficial. O mapeamento dos fluxos demonstrou a presença de quatro micro redes de drenagem influenciadas pela distribuição da elevação e das unidades morfoestruturais.

A **Tabela 9** acrescenta um panorama geral sobre trabalhos publicados em períodos mais antigos no Brasil. Ressalta-se que os trabalhos apresentados não esgotam as pesquisas realizadas ou que estão em andamento referente ao emprego de modelos de erosão hídrica no Brasil, visto que, o intuito foi apresentar um panorama geral, como forma de compreender a situação e a realidade nacional.

Tabela 9: Exemplos de modelos empregados em estudos realizados no Brasil.

AUTOR	MODELO	LOCAL	RESUMO
Santos, (2001)	TOPMODEL/ UMBRAL	São José dos Pinhais/PR	<p>O TOPMODEL apresentou eficiência às condições de clima úmido e relevo suave. A qualidade da simulação (medições de aderência entre as vazões observadas e simuladas) registrou 0,7 em quatro dos seis períodos simulados.</p> <p>O UMBRAL apresentou resultados coerentes com as características ambientais. Os parâmetros que possuem representatividade física foram estimados de forma correta e o modelo é adequado para estabelecer umbrais (delimitação espacial dos processos erosivos).</p> <p>Tais modelos apresentaram capacidade e potencial para o emprego em ações de planejamento ambiental. Pois permitiram discutir e orientar as ações antrópicas sobre o meio físico com base no entendimento dos processos naturais e na quantificação da perda de solo em áreas suscetíveis de erosão laminar e das propriedades mecânicas por ensaios geotécnicos de cisalhamento.</p>
Avanzi <i>et al.</i> , 2008)	MUSLE	Aracruz/ES	Tal modelo mostrou-se apropriado para predições das perdas de solo na microbacia, recomendando-se os coeficientes “a” e “b” iguais a 14,96 e 0,59, respectivamente, com fator topográfico de 1,28.
Gonçalves, (2008)	WEPP	Viçosa/MG	Os parâmetros de solo mais críticos são: a erodibilidade, tensão cisalhante e condutividade hidráulica que definiram os tipos de solos que ocorrem as maiores perdas.
Paiva <i>et al.</i> , (2009)	WEPP	Cariri - PB	Resultados adequados para o escoamento e produção de sedimentos. No entanto, nas microbacias houve discrepâncias na produção de sedimentos.
Cariello <i>et al.</i> , (2012)	USLE e a MUSLE	Pará	Mostrou-se eficiente a quantificação dos sedimentos gerados para se aperfeiçoar a gestão dos recursos hídricos e a perda de solo por erosão.
Brito (2014)	LISEM	Manaus	A simulação do escoamento superficial e o transporte de sedimentos geraram dados de perdas de solo e deposição, mapas pontuais dos locais com maior suscetibilidade aos processos erosivos.

6. MODELO SIMWE

O SIMWE (*Simulated of Water Erosion*) é um modelo dinâmico de base física projetado por Mitas; Mitasova (1998), espacialmente distribuído, que simula a erosão, o transporte e a deposição por fluxo superficial causadas por eventos com uma única tempestade.

Seus parâmetros de entrada consistem no modelo de erosão de encostas WEPP (*Water Erosion Prediction Project*), que definem as condições iniciais do processo de erosão/deposição e possibilitam o SIMWE ser aplicado em situações complexas do terreno (geralmente paisagens antropogênicas), solo e tipos de uso, além da capacidade de elucidar como os fenômenos e as propriedades naturais influenciam o processo de erosão (MITASOVA, *et al.*, 1997; MITAS; MITASOVA, 1998; KOCO, 2011; HOFIERKA; KNUTOVA, 2015; HARMON *et al.*, 2019). Tal modelo não assume que a bacia hidrográfica consiste em encostas uniformes, o que permite estimar a erosão do solo totalmente distribuída em áreas com topografia altamente variadas (MITAS; MITASOVA, 1998).

O modelo utiliza duas equações como base para o seu produto final: o fluxo de água superficial (*overland water flow*), consiste da Equação proposta de Julien *et al.*, (1995) (**Equação 3**) e o fluxo de sedimentos (*sediment flow*) com base na Equação proposta por Haan *et al.*, (1994) (**Equação 4**) (HOFIERKA; KNUTOVA, 2015).

$$\frac{\partial h(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = i(\mathbf{r}, t) - \nabla \cdot \mathbf{q}(\mathbf{r}, t) \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

$h(\mathbf{r}, t)$: profundidade da água (m);

t - tempo;

$i(\mathbf{r}, t)$: excesso de precipitação³ (mm/h);

$\mathbf{q}(\mathbf{r}, t)$: fluxo de água (m³/s);

$\mathbf{r} = x, y$: parâmetros de georreferenciação (coordenadas) derivados do MDE (Modelo Digital de Elevação).

³ Para este trabalho a chuva será substituída pelo termo precipitação.

$$\partial [p \cdot c(r, t)h(r, t)] / \partial t + \nabla \cdot q_s(r, t) \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

$q_s(r, t)$: taxa de fluxo de sedimentos (kg/m.s);

$c(r, t)$: concentração de sedimentos (partículas/m³);

ρ : massa por partículas de sedimentos (partículas/m³);

$D(r, t)$: taxa de deposição (kg/m²s);

$D(r)$ é derivada da capacidade de transporte de sedimentos;

$T(r)$ corresponde à capacidade de transporte de sedimentos;

$|q_s(r, t)|$ representa a taxa real do fluxo de sedimentos

Dentre as interações seqüentes, a **Figura 36** apresenta os resultados de alguns modelos representados sobre o MDE e a comparação da evolução de um modelo empírico relativamente mais simples a uma abordagem mais complexa com processo associado ao SIG, que consiste no processamento, análise e visualização dos dados e resultados da simulação. Destaca-se a magnitude da mudança do fluxo de água e as características do terreno que determinam a possibilidade de ocorrer a erosão ou deposição, pois o modelo SIMWE é capaz de calcular não somente a quantidade de água do fluxo superficial, mas também as direções e as mudanças do fluxo de água conforme o tempo e a relação entre o transporte e a deposição do material erodido (MITAS; MITASOVA, 1998; KOCO, 2011; CARVALHO, 2019).

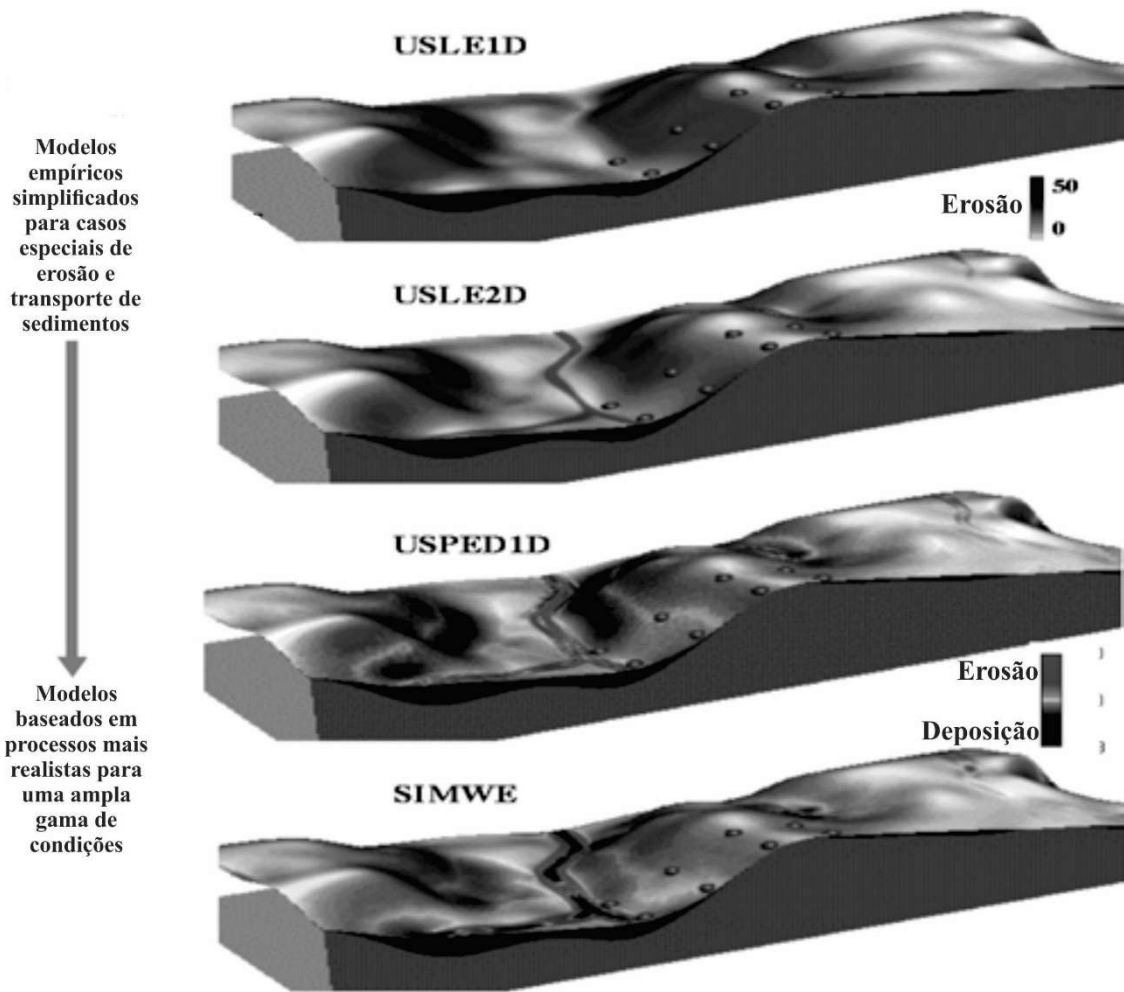


Figura 36: Modelos de erosão em ordem de complexidade: A) USLE com o comprimento da encosta; B) USLE modificada e o ângulo da encosta; C) USPED e a erosão e deposição; D) SIMWE considerando a erosão e deposição (Adaptado de MITASOVA *et al.*, 2001).

Diante deste contexto, o SIMWE está estruturado a partir de dois módulos (**Figura 37**): módulo dos fluxos hidrológicos superficiais (*r.sim.water*) que simula o escoamento superficial determinado por variáveis espaciais como a precipitação e os solos; e o módulo dos fluxos de sedimentos (*r.sim.sediment*) que calcula a erosão do solo, o transporte e a deposição de sedimentos originados pelo fluxo de água (NETELER; MITASOVA, 2008). Sua operação pode ser feita por meio do GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*), um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto, versão 8.0 (GRASS, 2021) e as operações são realizadas com base em um Modelo Digital de Elevação (MDE) que possibilitará a simulação dos fluxos de água e sedimentos (MITAS; MITASOVA, 1998; CARVALHO, 2019).

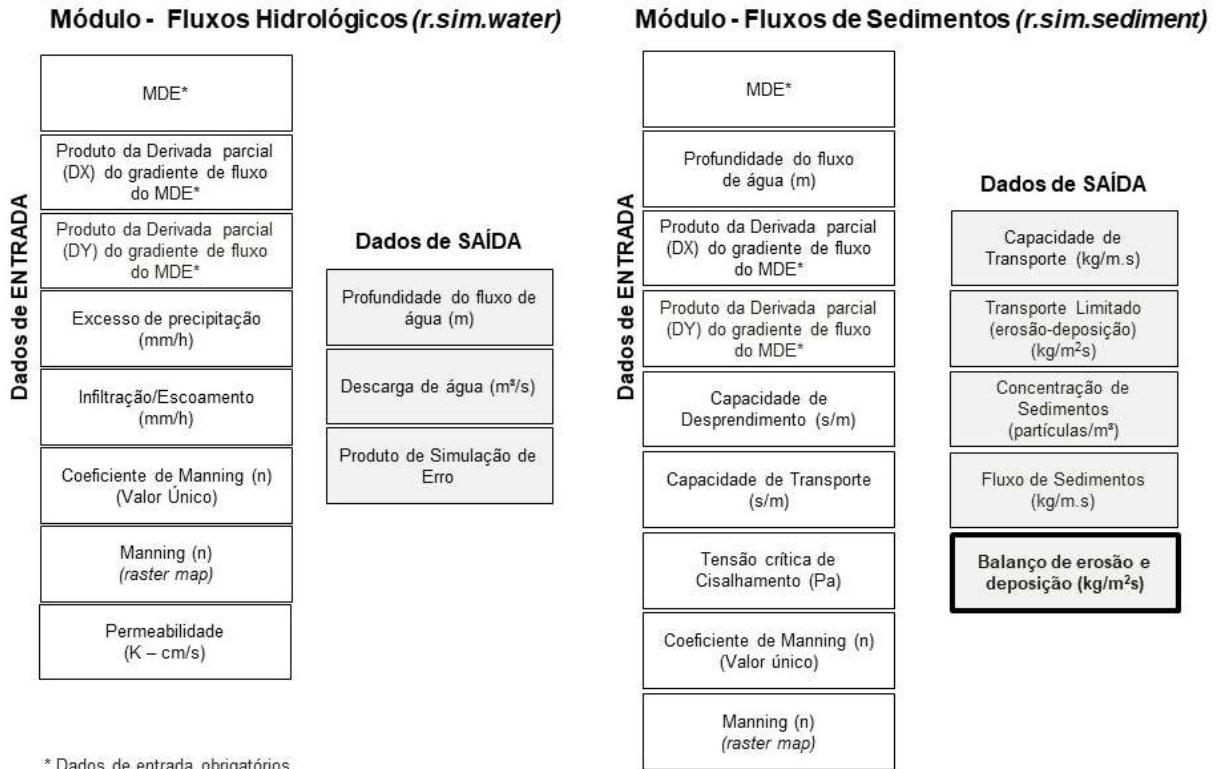


Figura 37: Estrutura dos módulos: fluxo hidrológico superficial (*r.sim.water*) e fluxo de sedimentos (*r.sim.sediment*). Adaptado de Fernandes (2014).

6.1 Módulo dos fluxos hidrológicos superficiais (*r.sim.water*)

Este módulo simula o fluxo de água superficial (m³/s) em situações variáveis de precipitação (excesso, infiltração, intensidade) sob diferentes condições espaciais do terreno, solo e cobertura (MITA; MITASOVA, 1998). Tal fluxo é representado em duas dimensões descritas pela forma bivariada das equações de *Saint Venant* e pelo método estocástico de Monte Carlo elaborado por Julien *et al.*, (1995).

A proposta de *Saint Venant* considera o escoamento superficial como um processo distribuído, pois está relacionado a uma série de parâmetros como o cálculo da vazão (abundância), velocidade e altura do fluxo de água ou profundidade que variam no tempo e no espaço, sempre na direção longitudinal do canal. Neste sentido alguns pressupostos desta Equação são (LANÇA, 2000; SILVA, *et al.*, 2006; SIMÕES, *et al.*, 2011):

- a) o escoamento é unidimensional, a velocidade é constante e a superfície da água é horizontal numa secção perpendicular ao eixo longitudinal do canal.
- b) o escoamento varia gradualmente ao longo do canal, podendo-se desprezar as acelerações verticais e considerar a distribuição de pressões segundo a vertical hidrostática.
- c) O eixo longitudinal do canal é aproximadamente uma linha reta, portanto, caso o declive seja pequeno e o fundo estático, os efeitos do desprendimento e deposição não influenciam o escoamento.
- d) Os coeficientes de rugosidade são aplicáveis, sendo válida a Equação de Manning para quantificá-los além dos fluidos ser incompressível e com densidade constante.

A partir do aumento da velocidade do processamento de dados e informações, as equações de *Saint Venant* são resolvidas pela abordagem estocástica baseada na função de *Green* do método de Monte Carlo, que tem sido amplamente utilizado pela capacidade de solucionar as complexas equações, tais como: as descontinuidades das diferentes operações dos coeficientes que para o caso deste modelo estão associadas às declividades abruptas, as mudanças na cobertura, nos fluxos hidrológicos e sedimentos e, conseqüentemente na análise do processo de erosão e deposição (MITAS; MITASOVA, 1998; HOFIERKA; KNUTOVA, 2015)

Ambas as soluções numéricas (*Saint Venant* e Monte Carlo) trabalham com pontos de amostragem (dualidade entre o campo e a representação das partículas do fenômeno modelado) (**Figura 38**) e, deste modo descrevem o fluxo de água e sedimentos, além de seus campos de representações físicas espaciais (NETELER; MITASOVA, 2008; KOCO, 2011). Tal situação está associada à modelagem e os programas de sistema de informação geográfica, onde a amostra é calculada a partir dos pixels do *grid* que representam o fenômeno e, portanto, tal representação pode ser substituída por uma aproximação contínua usando um campo físico espacial. Ressalta-se a necessidade de ter no mínimo duas partículas por *pixel* para garantir uma reprodução suave do fluxo de água simulado (MITAS; MITASOVA, 1998; MITAS; MITASOVA, 1998b).

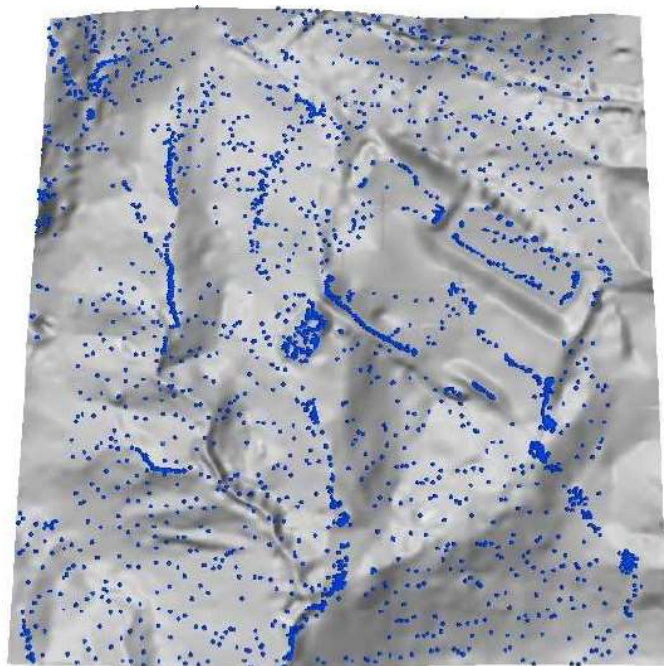


Figura 38: Exemplo de solução da Equação de *Saint Venant* com o método de amostragem. Densidade de pontos dispostos sobre um MDE representa a profundidade da água em evolução sob cobertura variável do solo e condições topográficas (apenas 20% das partículas são mostradas) (Adaptado de HOFIERKA *et al.*, 2002).

Ainda sobre o método de amostragem, o mesmo é proposto para resolver as equações de continuidade que descrevem fluxos sobre superfícies complexas da paisagem (**Figura 39**), pois utiliza ampla gama de dados de entrada e condições complexas, que podem ser modeladas sem alterar os dados de entrada, situação comum para os métodos tradicionais. Tal método também incorpora tratamentos multiescalar e multiprocesso, importante para o desenvolvimento de ferramentas de simulação do fluxo superficial, transporte de sedimentos e erosão (MITASOVA *et al.*, 2005).

As entradas e saídas de simulações do SIMWE são representadas por funções multivariadas contínuas (campos de vetores/segmentos ou escalas) (WARREN, 1998). Neste sentido o impacto da variabilidade espacial do terreno, do solo e da cobertura é totalmente incorporado, considerando os fluxos de água e de sedimentos como bivariados, em detrimento a utilização do fluxo 1-D, comum em vários modelos de distribuição (MITASOVA; MITAS, 1998).

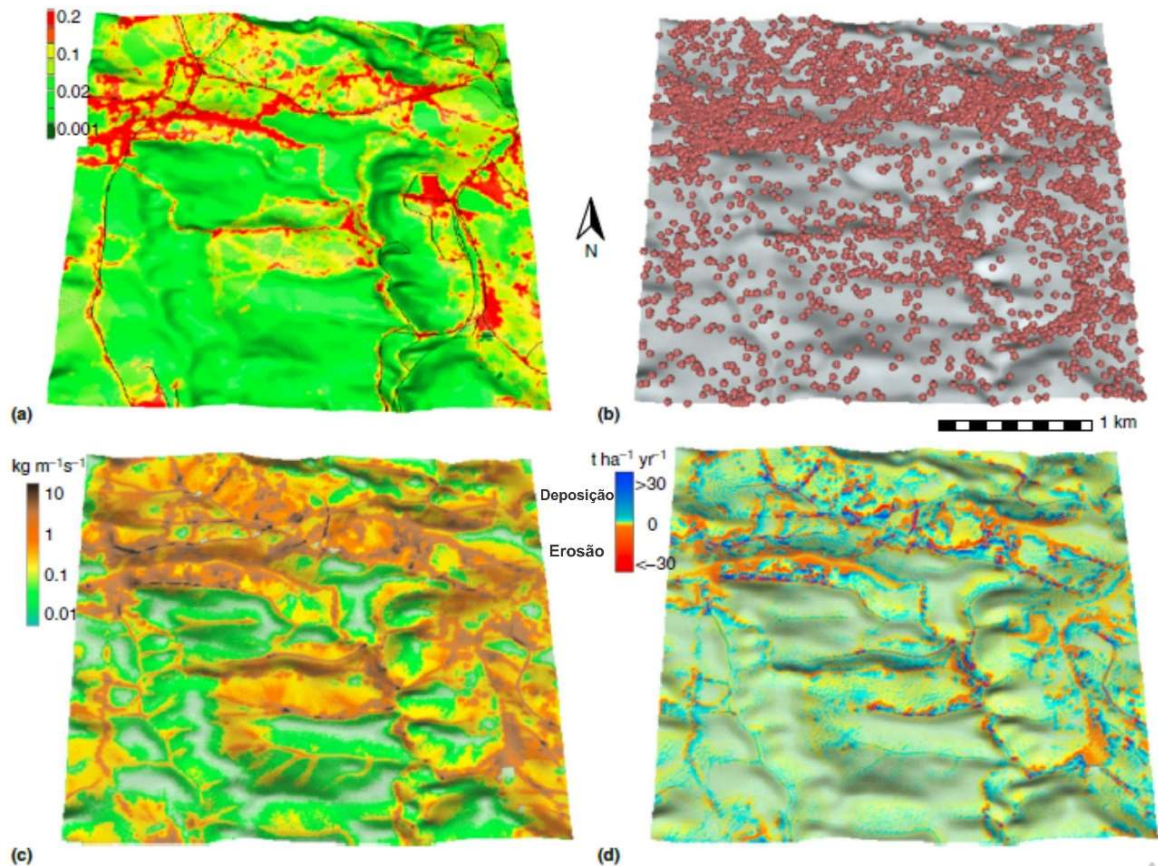


Figura 39: Aplicação do método de amostragem: (A) Área exposta em vermelho; (B) Desprendimento do solo representado pelas partículas, onde a densidade é maior em solo exposto; (C) Taxa de fluxo de sedimentos em função da densidade de partículas e o *grid*; (D) Balanço da erosão e deposição em função do fluxo de sedimentos (Adaptado de MITASOVA *et al.*, 2013).

Diante deste contexto o módulo dos fluxos hidrológicos superficiais tem como parâmetros de entrada: a) o gradiente de fluxo (derivado do MDE), b) a taxa de infiltração (mm/h), c) a taxa de excesso de precipitação (mm/h), d) o coeficiente de *Manning* (*n*), e) a permeabilidade (cm/s) (MITAS; MITASOVA 1998; WARREN, 1998; KOCO, 2011; MITASOVA *et al.*, 2013; FERNANDES, 2014).

a) Gradiente de fluxo (derivado do MDE)

O MDE consiste como um dos parâmetros obrigatórios de operacionalização do SIMWE, sendo inserido pelo comando *r.in.gdal* (importação e inserção) do GRASS. Deste modo é possível extrair do MDE a partir do comando *r.slope.aspect* do mesmo SIG, os aspectos morfométricos do relevo (declividade e aspecto), como também as derivadas parciais (*dx* e *dy*)

do campo de elevação (m/m) que são utilizadas para as simulações de padrões de fluxos (águas e sedimentos). Tais derivadas são parâmetros obrigatórios para a geração dos produtos de saída e do cálculo do escoamento superficial, da direção e da magnitude do fluxo de água (MITAS; MITASOVA, 1998).

Warren (1998) explica que a distribuição espacial da erosão e deposição é controlada pela mudança na profundidade do fluxo superficial e pela geometria do terreno (incluindo curvas de perfil e tangenciais), as quais estão associadas as derivadas (dx e dy) e as características da paisagem (ex: canais, vales, fissuras, rugosidades, entre outros) (**Figura 40**). Neste sentido, as interações entre a magnitude da mudança do fluxo de água e as curvaturas do terreno contribuem para analisar a possibilidade de ocorrer erosão ou deposição, pois as direções influenciam no controle de convergência e divergência do fluxo de água, no aumento do escoamento e do potencial de erosão. Em segundo lugar provoca a mudança na velocidade do fluxo de sedimentos, pois a concavidade tangencial tem efeito contrário (redução do transporte de sedimentos) criando condições para o potencial de deposição (MITASOVA *et al.*, 1997; WARREN, 1998; HOFIERKA; KNUTOVA, 2015).

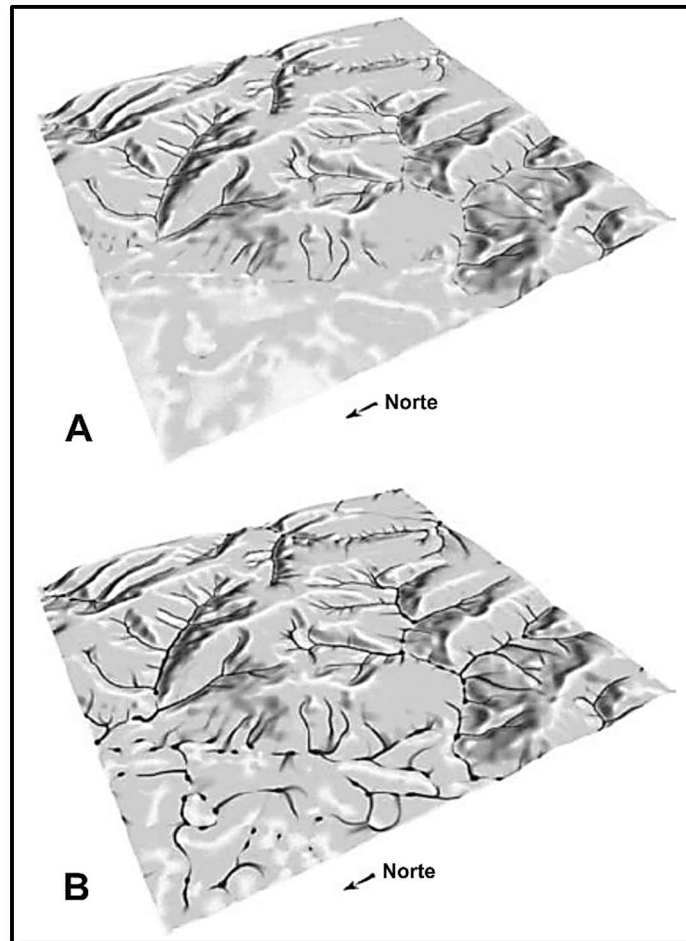


Figura 40: Exemplo de aplicação do módulo *r.sim.water* numa determinada área a partir de dados de solo e chuva, com a saída na forma de uma série temporal de mapas (A e B) Evolução do fenômeno modelado (Adaptado de HOFIERKA *et al.*, 2009).

b) Taxa de infiltração (mm/hr)

A taxa de infiltração também está associada aos dados de precipitação (intensidade da precipitação), que devem ser fornecidos em mm/h e obtidos de forma geral em estações meteorológicas (NETELER; MITASOVA, 2008). Ressalta-se que tais dados dependem de vários fatores como o tipo e natureza dos materiais inconsolidados (textura, estrutura, grau de evolução, composição química e mineralógica), declividade do terreno, vegetação e outras formas de ocupação e profundidade do solo, sendo que a mesma varia no espaço e no tempo (ZUQUETTE e PALMA, 2006; MITASOVA *et al.*, 2013).

Tal parâmetro pode ser inserido no SIMWE por meio de um produto ou a opção pelo valor único de infiltração em milímetros por horas (mm/h). Em solo saturado e fluxo de água

constante, podem ser utilizados dados estimados de taxas de condutividade hidráulica saturada com base em medições de campo ou valores de referência encontrados na literatura (NETELER e MITASOVA, 2008; MITASOVA *et al.*, 2013).

c) Taxa de excesso de precipitação (mm/hr)

A taxa do excesso de precipitação pode ser inserida no modelo por meio de um produto (mapa) com valores (fluxo superficial) distribuídos espacialmente ou a opção pelo valor único de precipitação em milímetro por horas (mm/h) que está relacionado ao valor de um média/ponderada durante um intervalo de tempo. Ressalta-se que a partir da utilização de um mapa, o modelo tem a capacidade de simular o fluxo terrestre, mesmo que o excesso de precipitação ocorra apenas em uma parte da área estudada e, portanto, sendo útil para eventos de precipitação com volume menor ou em área com propriedades do solo e cobertura variáveis (MITAS; MITASOVA 1998; KOCO, 2011; HOFIERKA e KNUTOVA, 2015).

A taxa de excesso de precipitação (mm/hr) é estimada com os dados da intensidade da precipitação menos a taxa de infiltração (mm/h), a qual pode ser calculada a partir de um módulo separado ou pelo comando *r.mapcalc* com base em dados do solo. Em outras palavras, trata-se da quantidade de água disponível para o escoamento que influencia e aumenta a magnitude das taxas de erosão/deposição, mas não altera o seu padrão espacial (**Figura 41**) (MITASOVA *et al.*, 1997; WARREN, 1998).

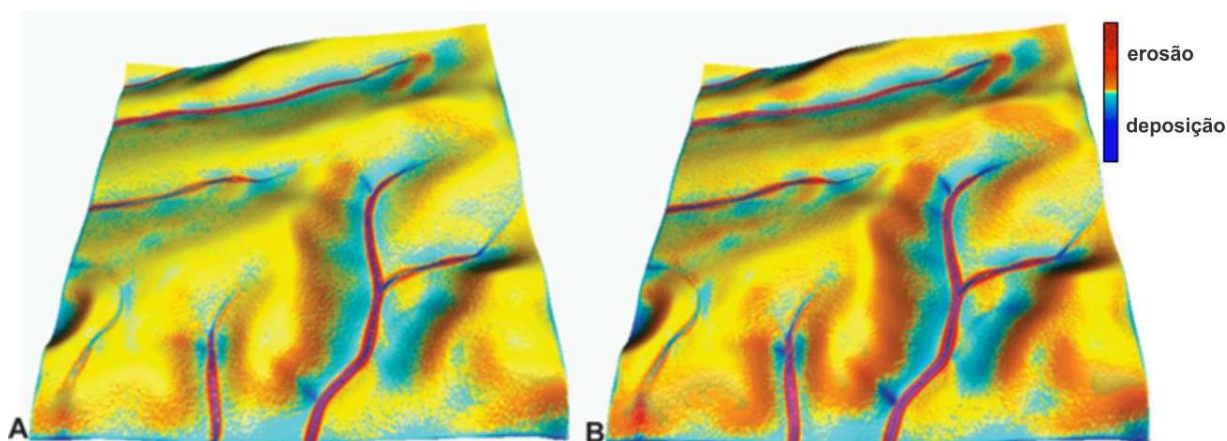


Figura 41: Simulação do modelo SIMWE referente ao impacto da taxa de excesso de precipitação de (A) 36mm/h e (B) 72mm/h numa determinada bacia hidrográfica. Nota-se o aumento da taxa de erosão e deposição proporcional ao aumento do excesso de precipitação, mas sem alteração no padrão espacial (Adaptado de MITASOVA *et al.*, 1997).

Tal parâmetro possui variável espacial e temporal, pois depende das propriedades e cobertura do solo e, portanto, sua estimativa torna-se mais complexa e geralmente está associada a um alto nível de incerteza. Quando o solo está saturado e o fluxo de água em estado estacionário, o cálculo pode ser realizado a partir das taxas de condutividade hidráulica (medições de campo) ou usando valores de referência encontrados na literatura (HOFIERKA *et al.*, 2002; NETELER; MITASOVA, 2008; HOFIERKA; KNUTOVA, 2015).

d) Coeficiente de *Manning* (*n*)

O coeficiente de Manning (*n*) refere-se à rugosidade da superfície e tem como parâmetro de entrada no modelo SIMWE o produto (mapa) ou o valor único do coeficiente. Hofierka e Knutova (2015) explicam que a estimativa deste parâmetro é geralmente uma fonte de incerteza para superfícies naturais, devido à dificuldade de mensurar o valor (*n*) em áreas de paisagem grandes e complexas e, portanto, a calibração consiste em valores aproximados da resposta hidrológica da bacia. Ressalta-se que os valores desse parâmetro podem ser obtidos a partir de experimentos ou também por meio de dados disponíveis na literatura e no manual do usuário do WEPP (FLANAGAN e NEARING, 1995).

Os baixos valores deste parâmetro indicam rugosidade mínima (canais retificados, artificiais) e os altos referem-se à rugosidade significativa (canais revestidos por rochas irregulares, leito rochoso). Deste modo, a rugosidade da superfície ou o *n* de Manning depende da cobertura vegetal, da superfície do solo, do atrito do fluxo em direção a declividade, os quais influenciam a velocidade do fluxo de água e sedimentos. Portanto, os padrões de erosão e deposição (**Figura 42**) sofrem alterações, onde superfície lisas o processo de deposição é menor, geralmente restrito em áreas côncavas, já em ambientes de superfície rugosas é maior a capacidade de deposição e conseqüentemente sua área (MITASOVA *et al.*, 1997; WARREN, 1998; COLLISCHONN e TASSI, 2008; MITAS; MITASOVA, 2008; SANTOS, 2001).

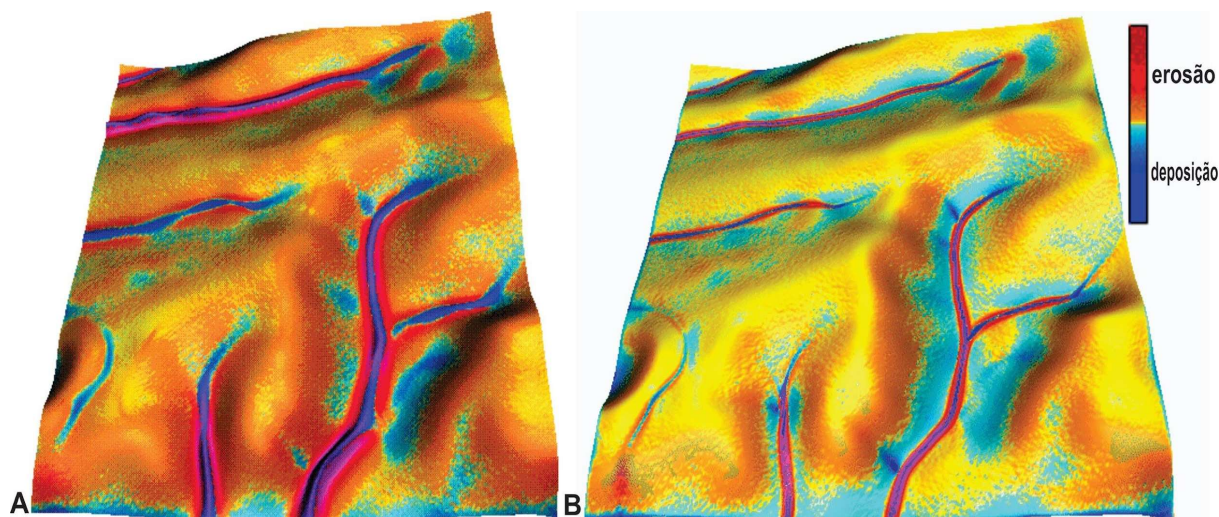


Figura 42: Exemplo de simulação do modelo SIMWE referente ao impacto da rugosidade da superfície. A) $n = 0,01$ (superfície lisa); B) $n = 0,10$ (superfície rugosa) numa determinada bacia hidrográfica (Adaptado de MITASOVA *et al.*, 1997).

Morgan (2005) explica que o nível de rugosidade depende da morfologia, da densidade da cobertura vegetal e da profundidade do fluxo, pois quando o fluxo é raso a vegetação fica relativamente rígida e transmite um alto grau de rugosidade, que podem ser representados por gramíneas com valores de n entre 0,25 a 0,30. No entanto, quando ocorre o aumento da profundidade do fluxo superficial reduz a resistência da vegetação e conseqüentemente do coeficiente de Manning (**Tabela 10**).

Tabela 10: Valores para n de Manning.

Cobertura (Uso da Terra)	Manning's (n) (Min – Máx)
Solo exposto	0,010 – 0,049
Gramínea (espaçadas)	0,015 – 0,200
Gramínea (densa)	0,300 – 0,480
Pastagem Natural	0,100 – 0,320
Pastagem Cortada	0,020 – 0,240
Concreto ou Asfalto	0,010 – 0,013
Sem lavoura	0,030 – 0,470

Fonte: Modificado de Morgan (2005).

e) Permeabilidade (K – cm/s)

O parâmetro permeabilidade tem como procedimento de entrada no modelo SIMWE o produto (mapa) ou a inserção de valores que podem variar de 0 a 1, os quais expressam a probabilidade de as partículas passarem pela estrutura do solo (HOFIERKA e KNUTOVA, 2015), indica a facilidade da água percolar no solo, equivalente a velocidade de fluxo sob gradiente unitário (FERNANDES, 2014).

Após o processamento dos parâmetros de entrada, os produtos de saída gerados pelo módulo dos fluxos hidrológicos superficiais são: a) profundidade do fluxo de água (m), b) a descarga (fluxo) da água (m³/s) e o c) produto (mapa) de simulação de erro (RMSE) (MITAS; MITASOVA 1998; WARREN, 1998; KOCO, 2011; MITASOVA *et al.*, 2013; FERNANDES, 2014).

a) Profundidade do fluxo de água (m)

As áreas planas e depressões não são locais de maior suscetibilidade à erosão, mas desempenham um papel importante dentro de bacias hidrográficas, pois retém a água e reduz o fluxo de água para encostas mais íngremes vizinhas ou para os canais (HOFIERKA *et al.*, 2002). Deste modo os mesmos autores explicam que o SIMWE incorpora o termo de difusão espacialmente variável (r) e fornece capacidade para simular aproximadamente a profundidade d'água nesses locais (**Figura 43**), pois preenche as depressões ou se espalha na área plana e flui na direção do fluxo predominante

A distribuição espacial da erosão/deposição é controlada pela mudança na profundidade do fluxo terrestre e pela geometria do terreno local, incluindo curvaturas de perfil e tangencial. Assim, o mapa da profundidade do fluxo refere-se à altura da lâmina de água escoada, ou seja, o nível da lâmina de água precipitada mensurada em metros, necessária para a medição dos respectivos volumes escoado e precipitado, podendo tratar-se do coeficiente de “*run off*” (WARREN, 1998).

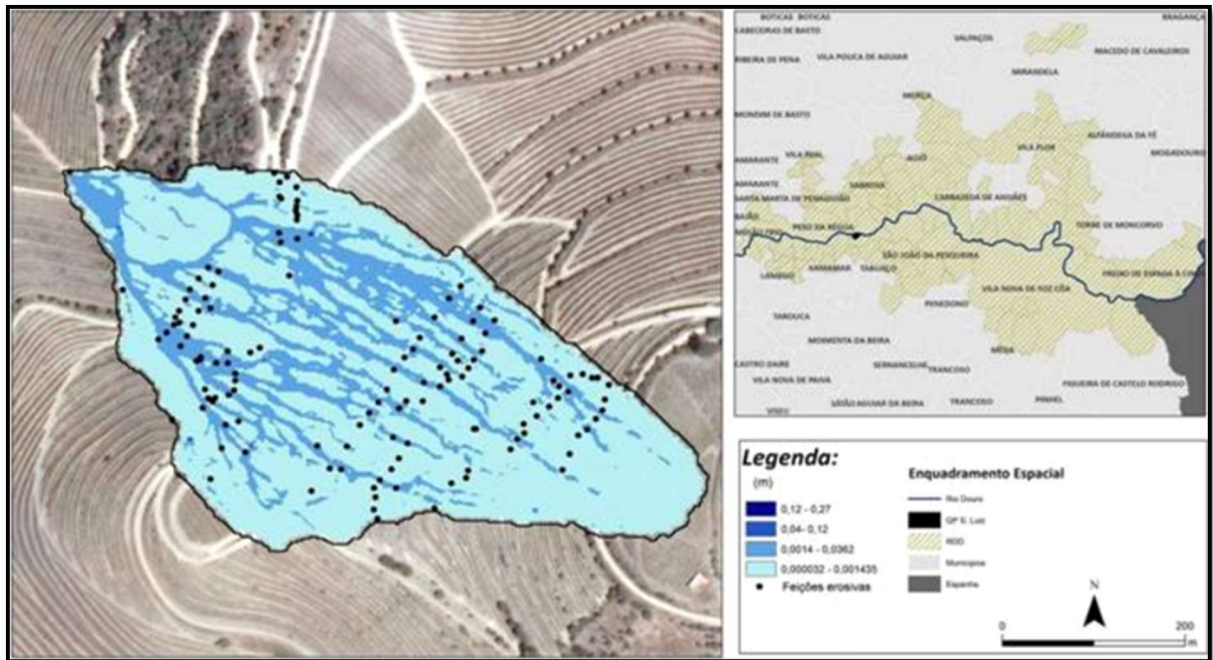


Figura 43: Exemplo de produto final (mapa) profundidade de água e destaque para a distribuição das feições erosivas (ponto preto) a partir da aplicação do modelo SIMWE na região demarcado do Douro/Portugal (Adaptado de BATEIRA, 2020).

b) Descarga (fluxo) da água (m^3/s)

O fluxo de água conduzido pelas derivadas parciais do topografia, permite que supere depressões ou obstáculos naturais presentes numa paisagem complexa, o qual é calculado pela média das direções do fluxo e dos pixels (MITAS; MITASOVA, 1998). Este produto de saída é resultado da solução da Equação de continuidade bivariada de *St. Venant* para fluxo em estado constante, o que representa o excesso de chuva, enquanto o volume modelado é uma função da profundidade da água (HOFIERKA *et al.*, 2002).

O conceito na sua definição geral é determinado pelo volume de água que passa em uma determinada seção de um fluxo (m^3/s) (**Figura 44**), sendo definido pelas variáveis de profundidade, largura e velocidade do fluxo (VILLELA e MATTOS, 1975).

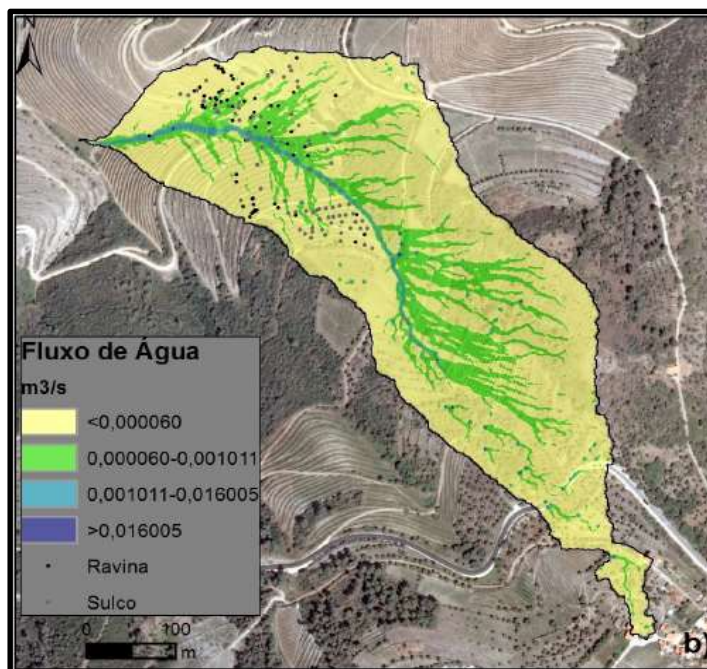


Figura 44: Exemplo de produto final (mapa) fluxo (vazão) de água, a partir da aplicação do modelo SIMWE na região demarcado do Douro/Portugal em relação com a ocorrência de ravinas e sulcos erosivos (Adaptado de FERNANDES, 2014).

c) Simulação de Erro (RMSE)

O último produto de saída trata-se do Mapa de Simulação de Erro (RMSE) que está associado à possibilidade de ocorrer algum erro não corrigido pela solução numérica e assim, a ser analisado de forma visual, principalmente em relação à profundidade da água resultante ser uma média. O RMSE pode ser usado para analisar e visualizar a distribuição espacial das variáveis (parâmetros) em diferentes momentos da simulação. Portanto, a distribuição espacial do erro numérico associado ao procedimento da solução de amostragem possibilita ser analisada usando o produto (mapa) de erro de saída (m). Vale ressaltar que o erro também é uma atribuição referente ao número de elementos utilizados na simulação, que pode ser reduzido pelo aumento do número de valores (probabilidade) dados pelos parâmetros (CARVALHO, 2019).

6.2 Módulo dos fluxos de sedimentos (*r.sim.sediment*)

O módulo fluxo de sedimentos representado pelo código *r.sim.sediment* simula a erosão do solo, o transporte e a deposição de sedimentos causados pelo fluxo de água. Trata-se de um módulo complementar para o funcionamento do modelo SIMWE, que incorpora alguns parâmetros tais como: o gradiente de fluxo (derivado do MDE), a profundidade da lâmina d'água (m), o coeficiente de Manning (n) e correlaciona as informações e os produtos de saída do módulo anterior. Tal módulo também é baseado nos princípios do modelo de erosão de encostas do WEPP como também no método de Monte Carlo e projetado para condições variáveis do terreno, solo, cobertura e precipitação (MITAS; MITASOVA 1998; CARVALHO, 2019).

Os parâmetros de entrada exclusivos deste módulo representado pela proposta de Haan *et al.*, (1994) são: o coeficiente da capacidade de desagregação e desprendimento (s/m), o coeficiente da capacidade de transporte de sedimentos (s) e a tensão de cisalhamento (Pa) (MITAS; MITASOVA 1998; WARREN, 1998; KOCO, 2011; MITASOVA *et al.*, 2013; FERNANDES, 2014).

Existem várias equações que podem ser aplicadas para capacidade de transporte e capacidade de desprendimento, no entanto, para este modelo de trabalho utilizou-se a Equação da tensão de cisalhamento proposta por Foster e Meyer (1972). Neste sentido, Mitas; Mitasova (1998) também propuseram uma abordagem estocástica baseada na função *Green* resolvida pelo método de Monte Carlo para resolução desta Equação e do módulo.

Diante deste contexto, a simulação através da geração de pontos de amostragem (**Figura 45**), que são posteriormente propagados de acordo com a Equação *Green Ampt* e do cálculo da média das amostras, fornece uma estimativa real dos mapas da profundidade da água (*water depth*) e concentração de sedimentos, com uma precisão estatística que é inversamente proporcional à raiz quadrada do número das amostras (MITAS; MITASOVA, 1998; MITASOVA e MITAS, 2001).

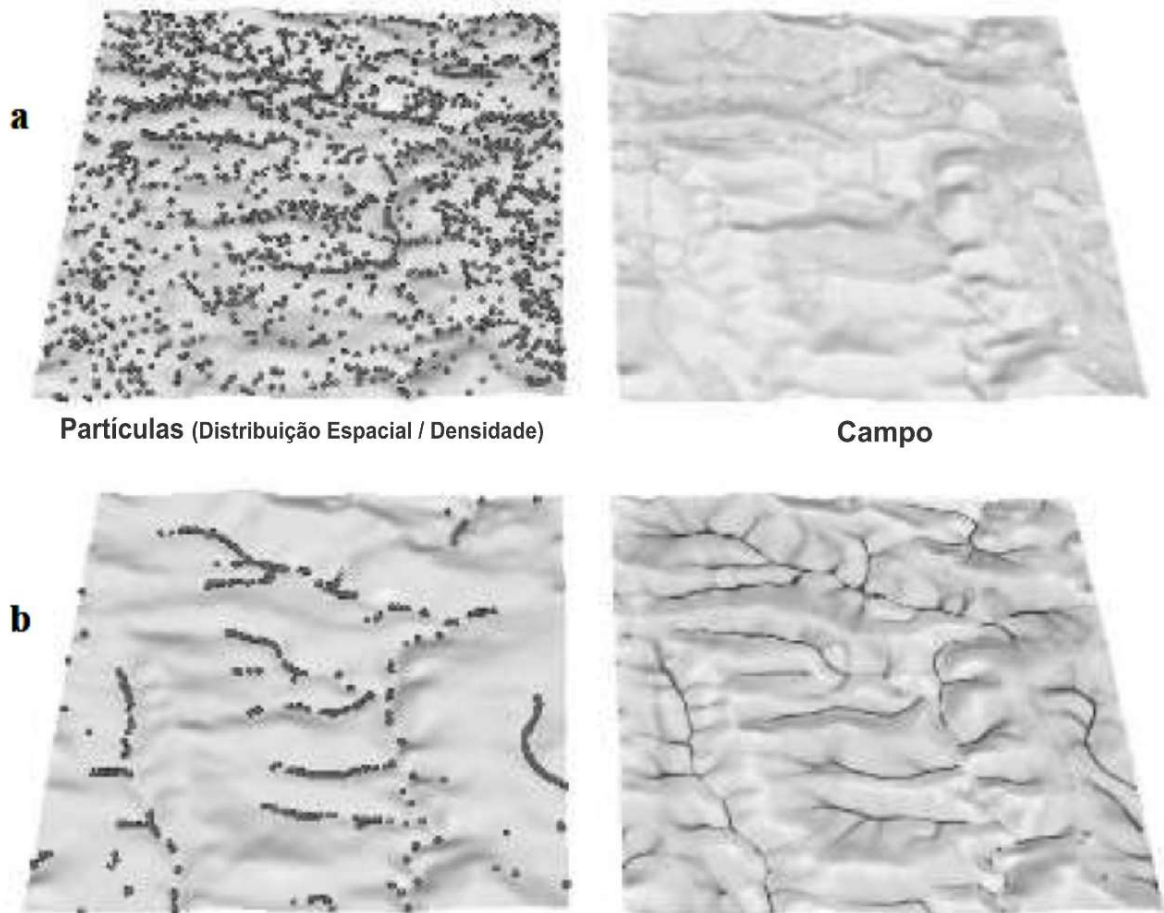


Figura 45: Exemplo de aplicação do método de amostragem para a profundidade da água (h) usando a dualidade entre a representação de partículas e o campo: A) profundidade da água em 1 minuto; B) profundidade da água após 24 minutos (Adaptado de MITASOVA e MITAS, 2001).

a) Coeficiente da capacidade de desprendimento (s/m)

A capacidade de desagregação e desprendimento (s/m) tem como procedimento de entrada o produto (mapa). Esse parâmetro está associado à erodibilidade, sendo uma medida da suscetibilidade do solo, que pode ser definido pelo destacamento do solo por unidade ao aumento da tensão de cisalhamento do fluxo de água (FLANAGAN; NEARING, 1995; WARREN, 1998). Tal parâmetro representa a taxa de fluxo potencial máxima de desprendimento que está associada às funções da tensão de cisalhamento (MITASOVA; MITAS, 2001; HOFIERKA *et al.*, 2002).

A mudança no fator de erodibilidade mantendo constantes os outros parâmetros alteram a relação entre a capacidade de transporte e desprendimentos e conseqüentemente a mudança no caráter do processo de erosão e deposição. Desta forma quando reduz a

erodibilidade também diminui a capacidade de transporte e, da mesma forma quando é maior a erodibilidade também aumenta naturalmente a capacidade de transporte (MITASOVA *et al.*, 1997; MITASOVA *et al.*, 2013).

O impacto da erodibilidade é menor na magnitude da carga de fluxo de sedimentos, pois a medição da carga de sedimentos na saída da bacia hidrográfica não fornece informações suficientes para analisar os processos de erosão nas encostas das bacias hidrográficas, uma vez que os processos são diferentes e podem gerar os mesmos níveis de concentração de sedimentos (MITASOVA *et al.*, 1997).

b) Coeficiente da capacidade de transporte de sedimentos (s)

WARREN (1998) explica que a capacidade de transporte de sedimentos (s) tem o produto (mapa) como entrada do modelo SIMWE, sendo que tal parâmetro representa o fluxo de sedimentos (**Figura 46**), uma medida da capacidade do solo ser transportado pelo fluxo de água, o qual depende das propriedades do solo e da influência da vegetação. HOFIERKA *et al.*, (2002) complementa que a capacidade de transporte de sedimentos representa a taxa de fluxo potencial máxima de sedimentos, uma das funções da tensão de cisalhamento.

A medição deste parâmetro não é realizada diretamente e não é fornecido pelo WEPP, assim o coeficiente é estimado indiretamente e pode ser derivado para alguns tipos de solos (ex: solo arenosos), ocasionando um impacto profundo no processo de erosão. Pois tal situação influencia a distribuição espacial e a magnitude do fluxo de sedimentos e as taxas de erosão e deposição (MITASOVA *et al.*, 1997; NEARING *et al.*, 1997; WARREN, 1998).

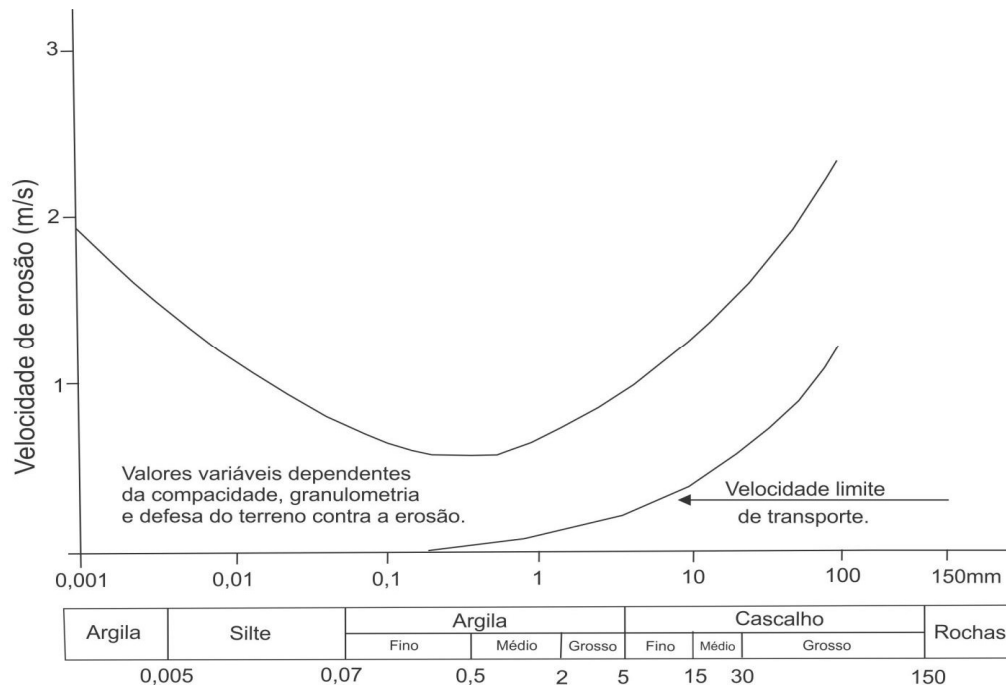


Figura 46: Velocidade da erosão dos terrenos em função da sua granulometria (Adaptado de NASCIMENTO, 1952).

O transporte de sedimentos por fluxo terrestre é descrito pela continuidade da massa de sedimentos associada a formulação bivariada conforme Haan *et al.*, (1994) e Mitsova *et al.*, (2001), e, portanto, o fluxo de sedimentos (**Figura 47**) é calculado como o produto das densidades ponderadas das partículas e da velocidade do fluxo de água (HARMON *et al.*, 2019).

Warren (1998) explica que a capacidade de desprendimento e a capacidade de transporte estão interligadas, visto que, a interação controla o padrão e a magnitude da erosão e, qualquer alteração em um dos dois parâmetros, necessariamente altera a proporção entre os dois coeficientes e, portanto, o processo de erosão e deposição. Conforme Mitsova *et al.* (2013) quando a capacidade de desprendimento do solo é inferior que o transporte (solo argiloso), a erosão do solo é limitada pelo desprendimento. Quando a capacidade de desprendimento é superior que o transporte (solo arenoso), a erosão do solo é limitada pelo transporte.

A velocidade de erosão aumenta de valor tanto no sentido da remoção dos materiais mais finos como na remoção e transporte dos materiais de maior diâmetro. Terrenos com partículas maiores apresentam alta capacidade de desprendimento e baixo transporte, ao passo

que nos terrenos com partículas de menor diâmetro ocorre o inverso: baixa desprendimento e alto transporte (RODRIGUES, 1982; SILVA, 1999).

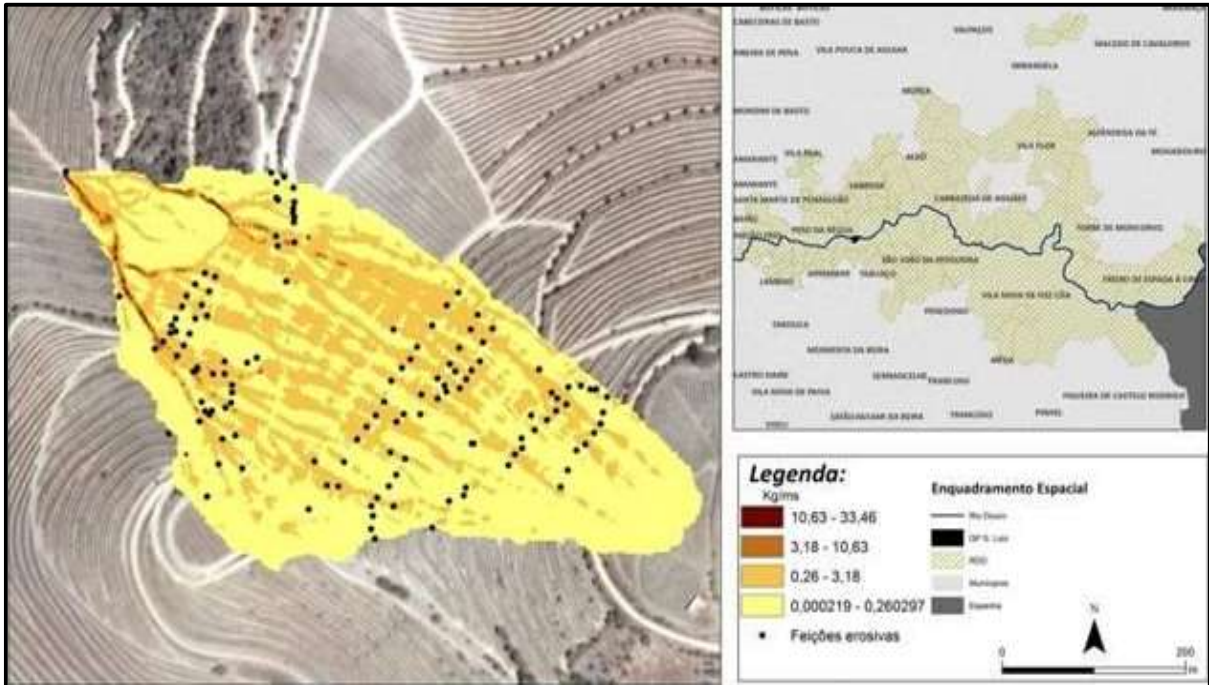


Figura 47: Exemplo de produto final (mapa) da capacidade de transporte de sedimentos do modelo SIMWE numa determinada bacia hidrográfica na Região Demarcada do Douro//Portugal. Nota-se que as feições erosivas (ponto preto) estão em grande parte situadas na segunda maior classe 3,18 a 10,63 kg/m.s (Adaptado de BATEIRA, 2020).

c) Tensão de cisalhamento (Pa)

A tensão de cisalhamento (Pa) é o último parâmetro obrigatório do módulo de fluxos de sedimentos. Tal parâmetro, representa a resistência (propriedade e cobertura) de um solo às forças de cisalhamento do fluxo de água (**Figura 48**) e tem seus valores disponíveis no manual WEPP (FLANAGAN; NEARING, 1995).

Quando a tensão de cisalhamento de um fluxo de água for menor que a tensão de cisalhamento crítica do solo, nenhum solo será destacado e, portanto, ocorre a redução da extensão espacial da erosão. No entanto, a água com menor carga de sedimentos em suspensão tem maior potencial para transportar sedimentos e, assim maior capacidade de aumentar a magnitude de taxas de erosão em encostas mais íngremes e áreas com fluxo concentrado (MITASOVA *et al.*, 1997; WARREN, 1998).

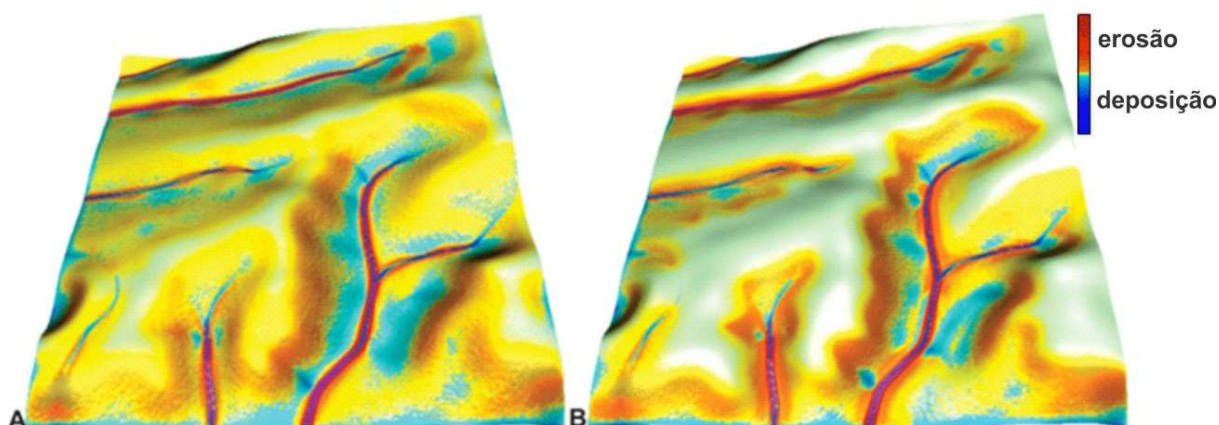


Figura 48: Simulação do modelo SIMWE referente à tensão crítica de cisalhamento (resistência do solo) ao impacto das forças de cisalhamento do fluxo da água numa determinada bacia hidrográfica. (A) Valor = 3 as taxas de erosão possuem maior extensão espacial e a deposição concentra nas áreas de fluxos concentrados. (B) Valor = 7 as taxas de erosão atuam nas encostas e áreas com fluxos concentrados e, portanto, uma redução significativa da extensão espacial da erosão (Adaptado de MITASOVA *et al.*, 1997).

Por outro lado, quando a tensão crítica de cisalhamento da água for igual ou maior que a tensão crítica de cisalhamento do solo, pode ocasionar a expansão da extensão espacial da erosão, pois vale lembrar que a água com maior carga sedimentos em suspensão tem menor potencial para transportar sedimentos e conseqüentemente menor capacidade em aumentar a magnitude das taxas de erosão (MITASOVA *et al.*, 1997; WARREN, 1998).

Após o processamento dos parâmetros de entrada, os produtos de saída gerados pelo módulo dos fluxos de sedimentos são: a capacidade de transporte ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$), a capacidade de transporte limitada erosão/deposição ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$), o fluxo de sedimentos ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$), a concentração de sedimentos (partículas/m^3) e por fim o balanço da erosão/deposição ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$) (MITAS; MITASOVA 1998; WARREN, 1998; KOCO, 2011; MITASOVA *et al.*, 2013; FERNANDES, 2014).

- **Capacidade de transporte limitada erosão/deposição ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$)**

O produto de saída limite da capacidade de transporte ou deslocamento limitado de erosão e deposição (**Figura 49**) pode estar associado a uma série de circunstâncias, mas de

forma geral está relacionado à razão entre a capacidade de desprendimento e a capacidade de transporte que determinam a distância ou deslocamento do transporte de sedimento. Neste sentido, quando a capacidade de transporte é superior ao desprendimento, os sedimentos podem ser transportados por longas distâncias no caso de argilas não agregadas. No entanto, quando o desprendimento excede o transporte de sedimentos o solo sofre erosão rapidamente, mas deposita a curtas distâncias, principalmente para agregados mais pesados (ex: solo arenoso) (HOFIERKA *et al.*, 2002).

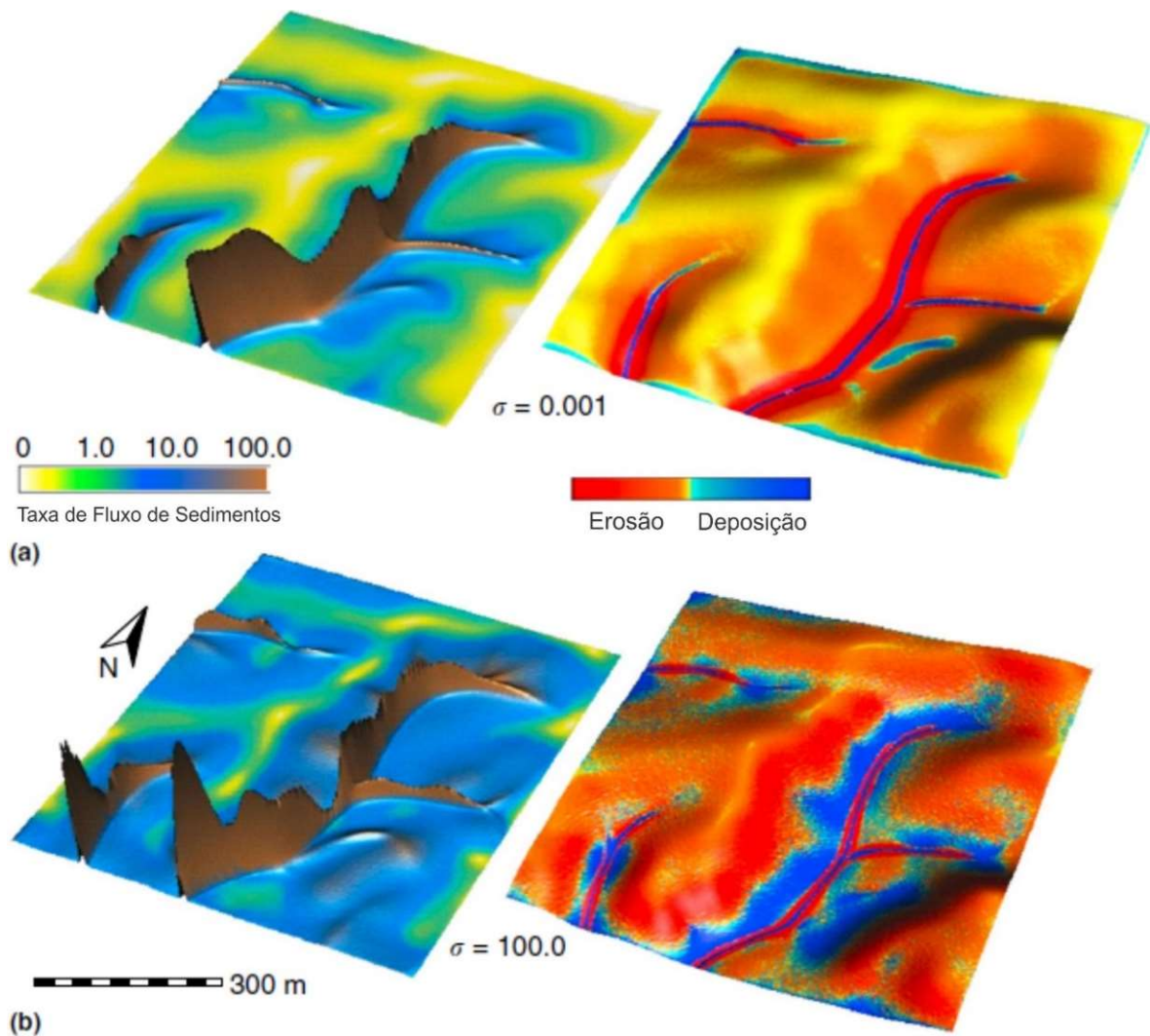


Figura 49: Distribuição espacial da velocidade do fluxo de sedimentos (visualizado como uma superfície) e a erosão/deposição (coberto como um mapa de cores sobre o MDE). (A) Valor baixo próximo a 0,001, com a capacidade de desprendimento (D_c) menor que a capacidade de transporte (T_c) e a erosão é limitada pelo desprendimento e não ocorre deposição. (B) Valor alto próximo de 100, capacidade de desprendimento (D_c) maior que a capacidade de transporte (T_c) e a erosão é limitada pelo transporte, ocorrendo a deposição (Adaptado de MITASOVA *et al.*, 2013).

A capacidade de desprendimento (s/m) e a capacidade de transporte de sedimentos (s) não agem independentemente, pois estão inter-relacionados e associados às propriedades do solo e cobertura, os quais controlam o padrão e a magnitude da erosão. Assim, qualquer alteração na capacidade de desprendimento ou na capacidade de transporte de sedimentos necessariamente altera a proporção entre ambos e conseqüentemente a mudança na dinâmica erosiva (FLANAGAN; NEARING, 1995).

Para uma situação em que a capacidade de transporte do fluxo de sedimentos excede o desprendimento, a erosão do solo é limitada pela capacidade de desagregação e, portanto, não ocorre deposição, exemplificado em solos argilosos, que possui alta capacidade de transporte de partículas leves, porém com o destacamento limitado. Quando a capacidade de desprendimento é maior que o transporte (solos arenosos) a erosão do solo é limitada pela capacidade de transporte do escoamento e, portanto, ocorre deposição (FOSTER e MEYER, 1972; FLANAGAN; NEARING, 1995; HARMON *et al.*, 2019; KOCO, 2011; MITAS; MITASOVA, 1998).

Diante deste contexto, tal produto de saída pode representar a distribuição espacial das taxas de erosão e deposição para um evento (tempestade), bem como médias mensais e anuais ou demais situações particulares. Ressalta-se que para prever com precisão as taxas de erosão e deposição para terrenos complexos e condições de cobertura da terra espacialmente variáveis, o modelo SIMWE precisa ser calibrado de acordo com a área geográfica específica (MITASOVA *et al.*, 2013).

- **Velocidade de fluxo de sedimentos (kg/m.s)**

A velocidade do fluxo de sedimentos representa a relação da capacidade do transporte de sedimentos e a capacidade de desprendimento, pois interferem na velocidade do fluxo de sedimentos, como também os parâmetros de entrada tensão de cisalhamento e coeficiente de Manning (FOSTER; MEYER 1972). Tais parâmetros estão relacionados às propriedades e coberturas do solo e seus valores estão associados à classificação dos solos, cobertura, práticas agrícolas e ações mitigadoras desenvolvidas dentro do modelo WEPP, além de características da resistência do solo e, portanto, a força de cisalhamento do fluxo de água (FLANAGAN; NEARING, 1995).

Tal produto também expressa a geometria do terreno, pois tem importante impacto na distribuição espacial do processo de erosão e deposição, os quais estão associados a curvatura do terreno que possui papel importante na profundidade e velocidade dos fluxos de sedimentos (MITAS; MITASOVA, 1998).

- **Concentração de sedimentos (partículas/m³)**

Esse produto de saída (**Figura 50**) está associado a disponibilidade de sedimentos (quantidade e granulometria) e as características do escoamento nas vertentes, considerando a velocidade do escoamento que influencia na concentração e pode variar da superfície até o fundo do rio e também ao longo da largura da seção transversal (MITASOVA *et al.*, 2001).

A deposição e concentração de sedimentos tem sua origem com o impacto da gota de precipitação no solo, transportado pelo fluxo de água até o limite da capacidade de transporte e, portanto, a deposição de sedimentos (HAAN *et al.*, 1994).

CARVALHO (2008) explica que o processo de deposição e conseqüentemente a concentração, ocorre quando a força do escoamento se reduz até a condição de não poder continuar a deslocar a partícula. O depósito dos sedimentos geralmente se dá em locais relativamente mais baixos, podendo ocorrer em depressões naturais do terreno ou mesmo em encostas de declividade mais suave. Neste sentido, o material pode adentrar a rede de drenagem, sendo transportado pelos cursos d'água até o oceano ou ficar *retido* em reservatórios, nas margens de cheia, em planícies de inundação, deltas e estuários (ARROIO JUNIOR, 2013).

Tal produto também representa a localização das feições erosivas, exemplificado pelo trabalho de Fernandes (2014) em que as classes média e muito elevada de concentração de sedimentos integram a maior porcentagem das feições erosivas.

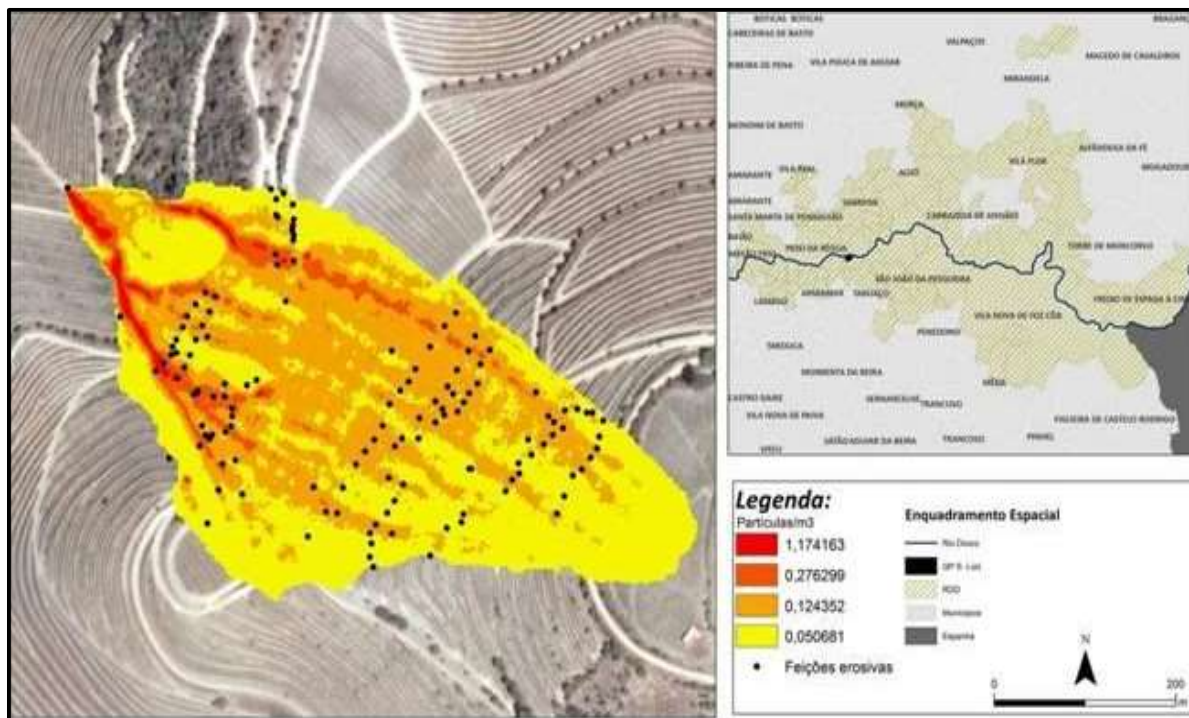


Figura 50: Exemplo de produto final (mapa) concentração de sedimentos (partículas/m³) do modelo SIMWE numa determinada bacia hidrográfica na região demarcada do Douro/Portugal (Adaptado de BATEIRA, 2020).

- **Balanco da erosão/deposição (kg/m²s)**

O produto de saída trata-se de um mapa que apresenta o balanço de sedimentos, a diferença entre erosão (valores positivos) e deposição (valores negativos) na bacia. Corresponde a relação entre a adição e a remoção de sedimentos que propriamente controlam a produção e o deslocamento de sedimentos (**Figura 51**). Ressalta-se que tal produto está relacionado a um determinado intervalo de tempo e sob os parâmetros iniciais de entradas, que oferecem condições para avaliar e analisar qualitativamente e quantitativamente a taxa de erosão e deposição.

As taxas de erosão estão relacionadas à produção de sedimentos que podem ser entendidas como a quantidade de partículas erodidas transportadas pelo curso d'água (ARROIO JUNIOR, 2013; PEREIRA, 2010). Tal produção, de sedimentos em uma bacia pode ser dividida em três grandes compartimentos: os interflúvios ou vertentes, que constituem a área de captação e produção de sedimentos; os leitos ou calhas, em que se concentra o escoamento e que têm por papel principal realizar a propagação dos sedimentos produzidos pelos interflúvios até a saída

da bacia; e as planícies aluviais ou várzeas, que circulam as calhas e que funcionam como receptores dos sedimentos produzidos mais a montante (ARROIO JUNIOR, 2013; BORDAS e SEMMELMANN, 2001).

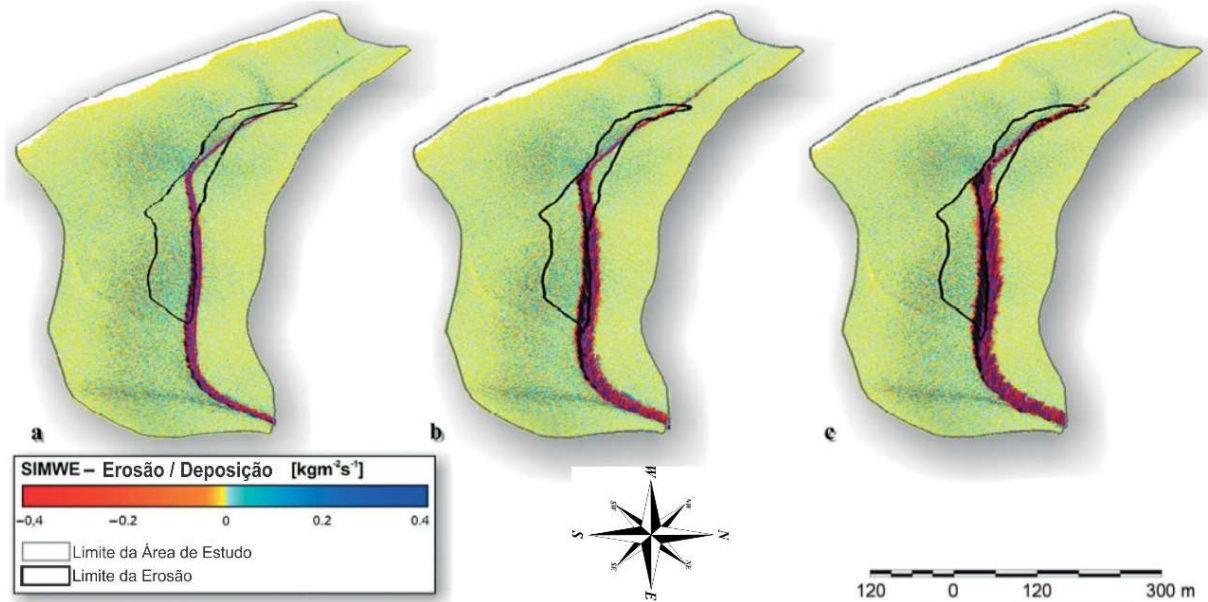


Figura 51: Exemplo de mapa final de erosão/deposição simulada pelo modelo SIMWE. Destaca-se o aumento da ravina regressivamente a partir da 3^a (a), 5^a (b) e 7^a (c) interação, como também os valores de erosão/deposição no fundo do fluxo concentrado de uma determinada bacia na Eslováquia (Adaptado de KOCO, 2011).

7. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar o objetivo principal desta pesquisa, que consiste em analisar a dinâmica dos processos erosivos e a deposição de sedimentos a partir da aplicação do modelo matemático SIMWE (*Simulated of Water Erosion*), as etapas foram divididas em 7.1) Dados Topográficos; 7.2) Características Pedológicas; 7.3) Dados Pluviométricos; 7.4) Levantamento dos Parâmetros de Entrada; 7.5) Simulação dos Cenários de Erosão e 7.6) Validação dos Cenários (Figura 52).



Figura 52: Fluxograma correspondente às Etapas Metodológicas da Pesquisa.

7.1 Dados topográficos

O Modelo Digital de Elevação (MDE⁴) foi elaborado a partir de curvas-de-níveis com 5 metros de equidistância, pontos cotados e hidrografia, extraídos da carta topográfica São Pedro I (SF-23-Y-A-IV-1-NO-B) elaborada pela Terra Foto (Secretaria de Economia e Planejamento do Estado de São Paulo, 1979) em escala 1:10.000. Esses dados foram empregados na ferramenta *Topo to Raster* que permite a construção de uma superfície contínua (*raster*) a partir da proposição de Hutchinson (1988), assim como utilizado pelos trabalhos de Carmo *et al.*, (2015), Faria *et al.*, (2017), Salekin *et al.*, (2018) e Zirakbash *et al.*, (2020).

A resolução espacial (ou tamanho do *pixel*) do *raster* foi definida a partir da proposição de Hengl (2006), um método conhecido como complexidade do relevo. Tal procedimento, que resulta no tamanho adequado do *pixel*, consiste na relação entre as informações das curvas de nível e a área, portanto, considera o tamanho máximo referente a área total do estudo e o tamanho mínimo (5% da área total com maior concentração de curvas de nível). Portanto, o tamanho máximo do *pixel* calculado para a área foi de 14,11m, enquanto o tamanho mínimo foi de 6,03m, conseqüentemente, a resolução espacial utilizada foi à média entre os dois valores anteriores, a qual chegou à definição de 10m, que concluiu esta etapa de construção, análise e definição da resolução do *pixel* do MDE = 10m.

Na sequência foi aplicado a ferramenta *Sinks* para identificar os vazios, discrepâncias e imperfeições da superfície do MDE (MARK, 1988) e posteriormente o *Fill* para o preenchimento dos vazios e correções (TARBOTON, *et al.*, 1991). Ressalta-se que tais procedimentos demonstram e justificam a importância do MDE, que consiste como uma das principais bases para o desenvolvimento e operacionalização do modelo SIMWE.

Para análise dos aspectos morfométricos e a relação com a dinâmica das feições erosivas e deposicionais, foram construídas as cartas de declividade (**Figura 53**) e curvatura (**Figura 54**). Também a partir da ferramenta *Tabulate Intersection* do programa ArcGis 10.5 foram quantificados a distribuição da área de estudo e das feições erosivas em relação às classes de tais parâmetros morfométricos (intervalos de declividade e classes de curvatura).

⁴ Embora os dados de elevação tenham sido obtidos a partir das curvas de nível, o que permite ser definido como um Modelo Digital de Terreno (MDT) optou-se nesse trabalho por adotar a terminologia Modelo Digital de Elevação (MDE).

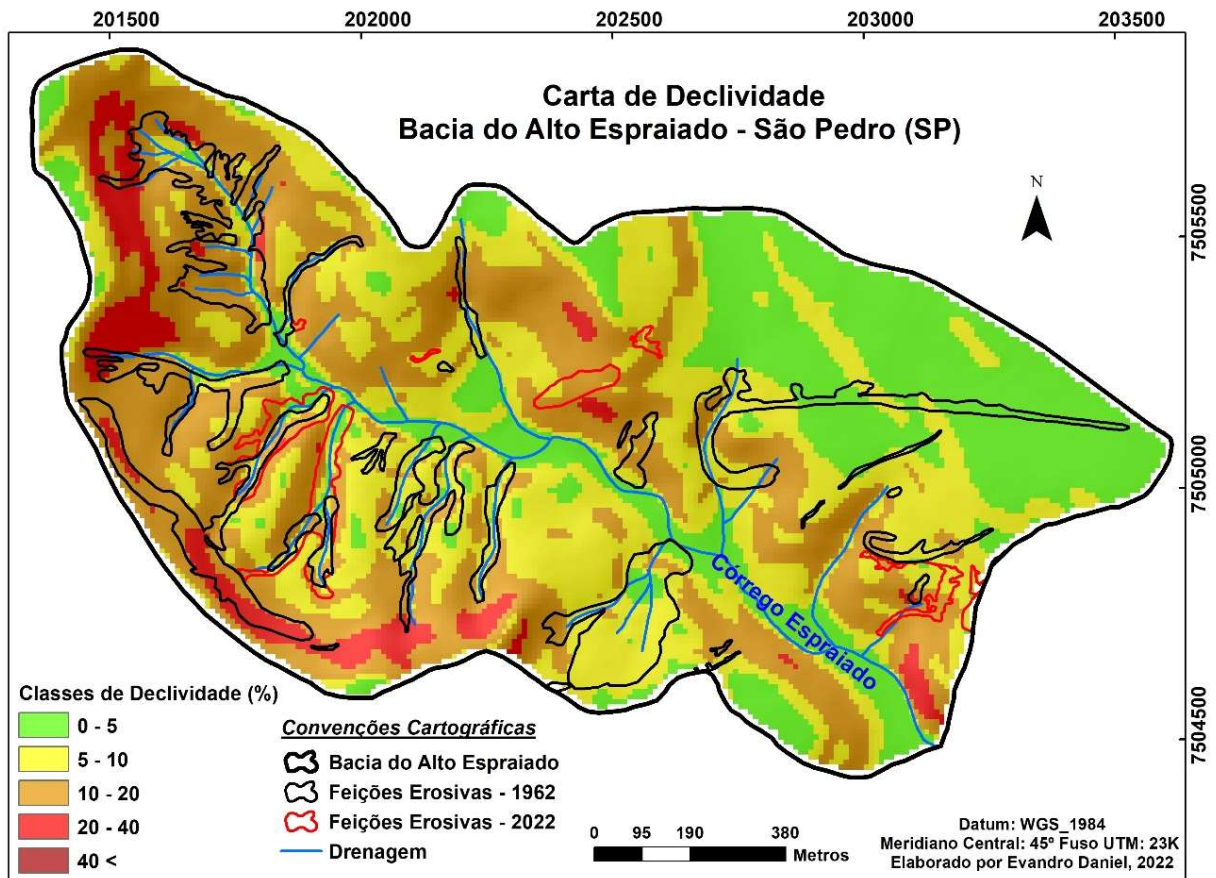


Figura 53: Carta de Declividade da bacia do Alto Espraiado e a distribuição das feições erosivas mapeadas nos cenários de 1962 (polígonos pretos) e 2022 (polígonos vermelhos).

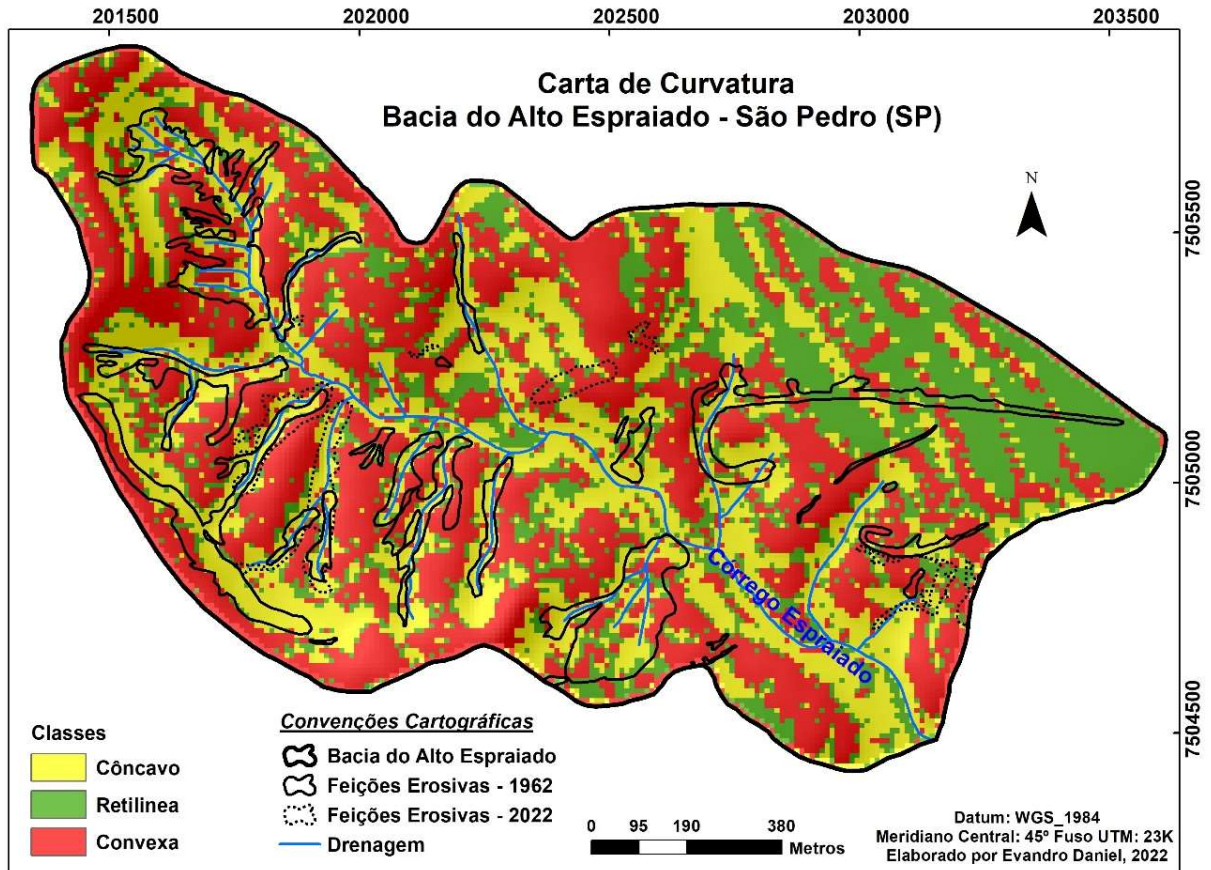


Figura 54: Carta de Curvatura da bacia do Alto Espraiado e a distribuição das feições erosivas mapeadas nos cenários de 1962 (polígonos pretos) e 2022 (polígonos em preto tracejado).

7.2 Características pedológicas

As características pedológicas (**Figura 55**) da área de estudo por meio do estudo de Furquim (2022) numa escala 1:32.000 consiste dos registros de Neossolo Litólico e Gleissolo e Neossolo Quartzarênico em grande parte da área, além da presença do Neossolo Flúvico mais Gleissolo ao longo do canal principal e do Latossolo Vermelho que complementa a área de estudo e está situado na área circundante a montante do canal principal (FURQUIM, 2002). Ressalta-se que a partir da ferramenta *Tabulate Intersection* do programa ArcGis 10.5 foi realizado a correlação da distribuição da área de estudo e das feições erosivas com as classes de solos como forma de contribuir para análise da dinâmica das feições erosivas e deposicionais.

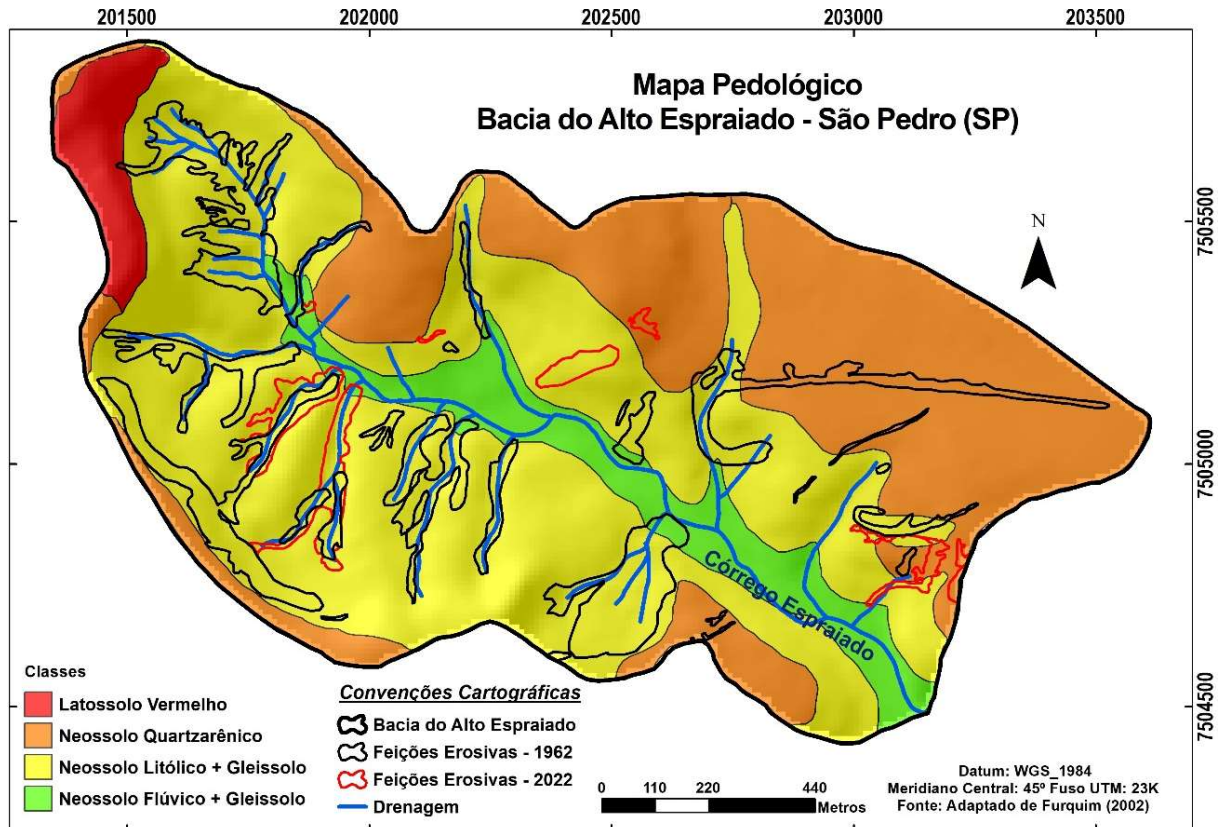


Figura 55: Caracterização pedológica da bacia do Alto Espraiado e a distribuição das feições erosivas mapeadas nos cenários de 1962 (polígonos preto) e 2022 (polígonos vermelho). Adaptado de Furquim (2002).

A **Figura 56** apresenta a distribuição espacial dos materiais inconsolidados a partir do estudo de Yamanouth (2003) numa escala 1:10.000, em que a bacia do alto Espraiado constitui pelo Solo Residual (Rs01 a Rs06), Saprolítico (Rsp01), Rocha Muito Alterada (Ram01 a Ram03), Rocha Pouco Alterada (Rap01 e Rap02), Materiais Retrabalhados (Rt01 a Rt08) e Solos Aluvionares (Al)⁵ ou Deposito. Destaca-se também que a partir da ferramenta *Tabulate Intersection* do programa ArcGis 10.5 foi quantificado a distribuição da área de estudo e também das feições erosivas em correlação com as classes dos materiais inconsolidados para auxiliar na análise da dinâmica das feições erosivas e deposicionais.

⁵ Ressalta que para este estudo não estão todas as classificações conforme consta na **Figura 54**, pois este trabalho aborda apenas o alto Espraiado.

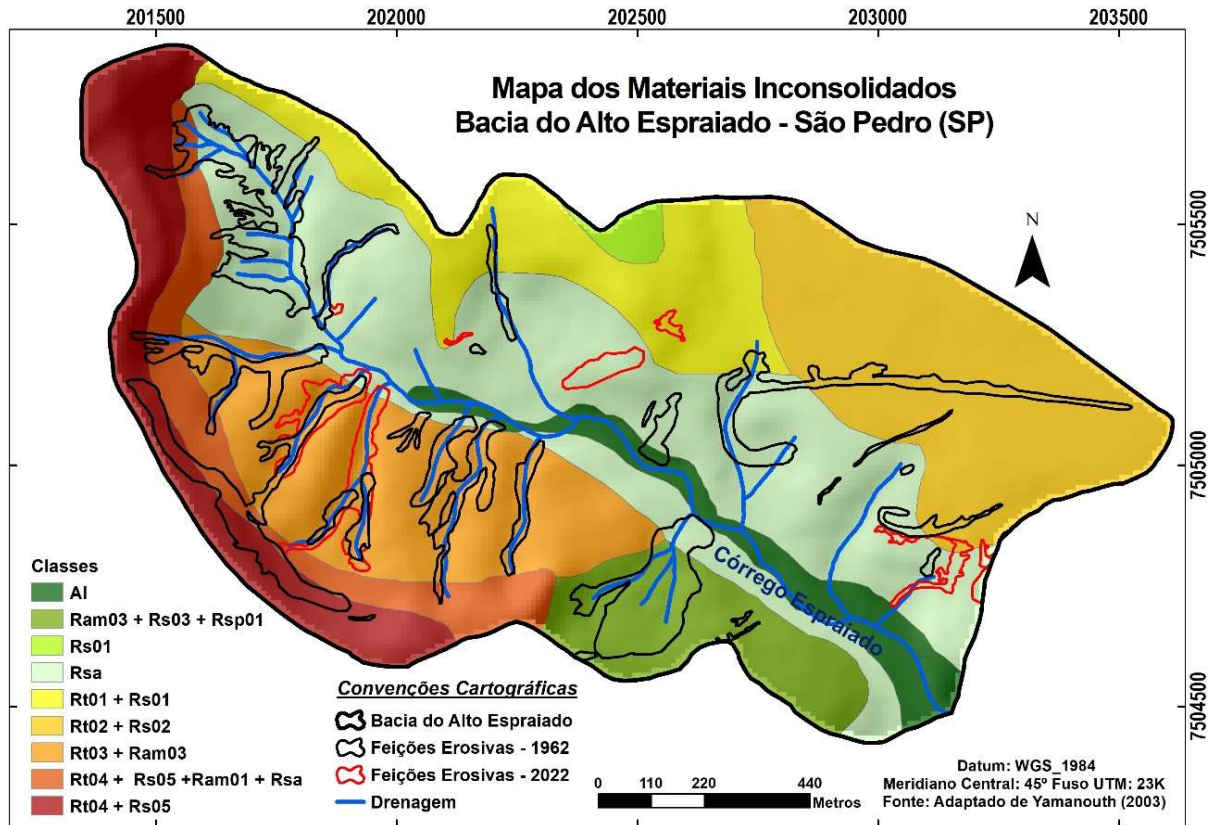


Figura 56: Distribuição espacial dos materiais inconsolidados e a distribuição das feições erosivas mapeadas nos cenários de 1962 (polígonos em preto) e 2022 (polígonos em vermelho). Adaptado de Yamanouth (2003).

7.3 Dados Pluviométricos

Como forma de contextualizar as características pluviométricas do município de São Pedro (SP), foi realizado uma série de tabulações de dados levantados a partir das medições diárias da estação meteorológica com o Prefixo D4 – 060 do Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE). Neste sentido a **Figura 57** apresenta a distribuição da precipitação diária superior a 80mm no período de 1942 a 2011, tais registros durante o período de 69 anos comprovam que o cenário não é atípico, pois houve 28 mensurações acima de 80 mm e três dias (25/12/2000, 04/02/2005 e 19/02/2007) ao longo deste período com volume superior acima de 120mm. Ressalta-se que volume igual ou superior a 10mm são consideradas como erosivas conforme os trabalhos de Cassol *et al.*, (2007); Almeida (2009); Santos *et al.*, (2010); Almeida *et al.*, (2012) e Silva *et al.*, (2022).

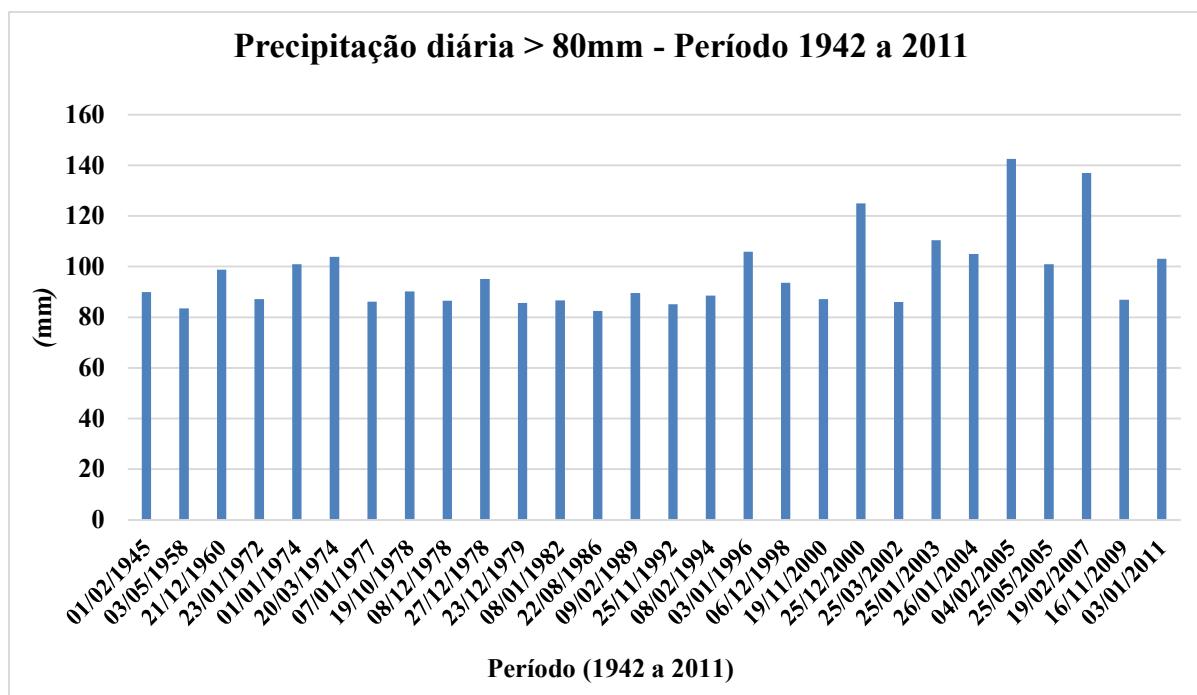


Figura 57: Levantamento pluviométrico do município de São Pedro (SP). As datas referem-se aos registros de precipitação maiores que 80mm durante o período de 1942 a 2011. Fonte: SIGRH (2011).

Ainda sobre tal contexto, consta neste município o Balanço Hídrico Semanal do período de 2000 a outubro de 2019 elaborado pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) do Governo do Estado de São Paulo, com dados referente ao excedente hídrico, ao déficit hídrico e também da capacidade de armazenamento de água do solo, da temperatura e da evapotranspiração.

Diante deste contexto a **Figura 58** apresenta dados de excedente hídrico (valores > 100mm) equivalente ao período de 20 anos (2000 a 2019). Foram constatados registros de 103mm (novembro de 2007) até 207mm (fevereiro de 2019), sendo que os meses julho e agosto não tiveram volumes pluviométricos registrados acima de 100mm, porém os meses de dezembro a fevereiro resultaram no maior número de registros.

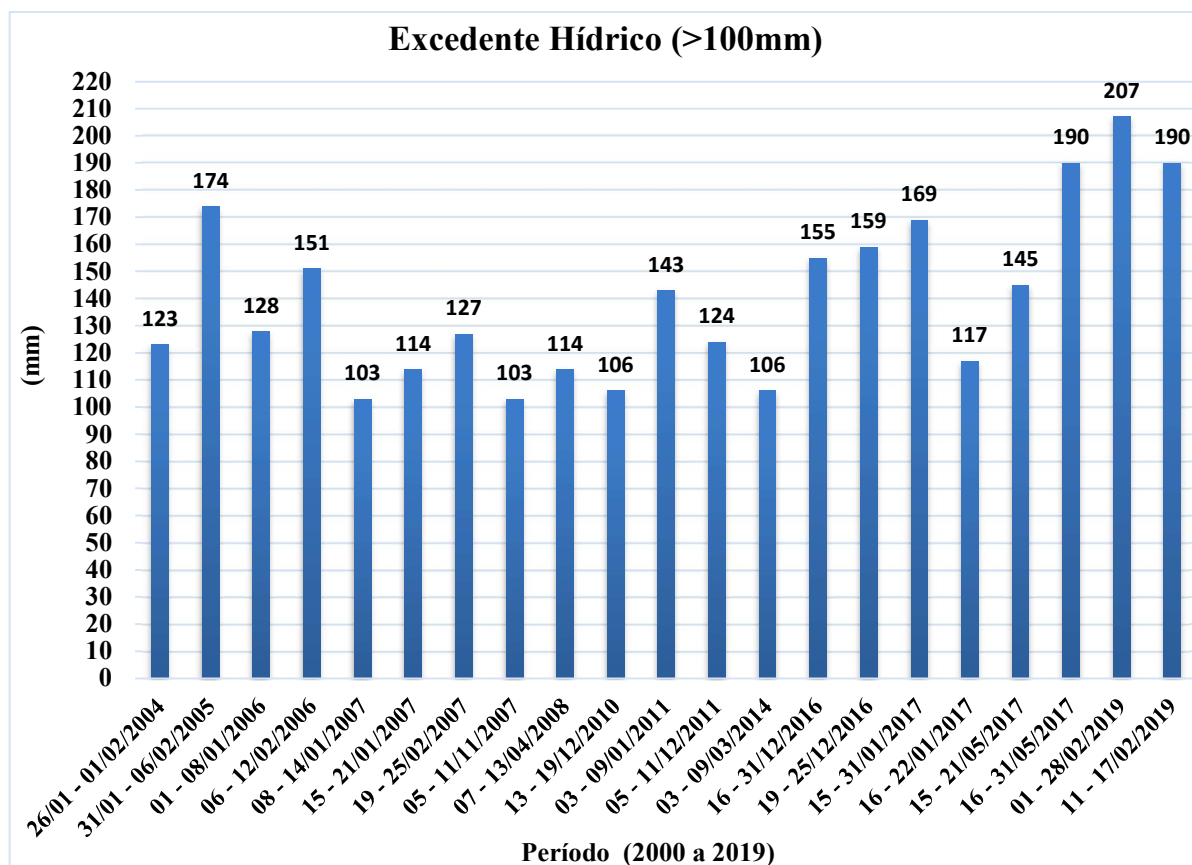


Figura 58: Distribuição do excedente hídrico (> 100 mm) acumulado no período de 2000 a 2019 no município de São Pedro (SP), e portanto, constam apenas as datas neste período, com volume superior a 100mm. Fonte: CIIAGRO (2022).

De maneira geral, as estações do ano verão (dezembro a março), outono (março a junho), primavera (setembro a dezembro) e inverno (junho a setembro) estão condizentes com esta investigação, pois o período de maior volume de chuva ocorreu consequentemente o registro de excedente hídrico. Destaca-se que os maiores valores (190mm, 169mm, 145mm e 117mm) foram registrados nos meses de janeiro (verão) e maio (outono), este último período refere-se a estação naturalmente com menor volume de chuva.

Em relação ao déficit hídrico (valores > 25mm), a **Figura 59** apresenta o levantamento referente ao período de 2000 a 2019. Foram verificados registros em praticamente todos os meses do ano (exceto maio e agosto), com dados críticos de até 135 mm (outubro de 2019), embora a grande maioria desta estatística esteja próximo de ~ 60mm.

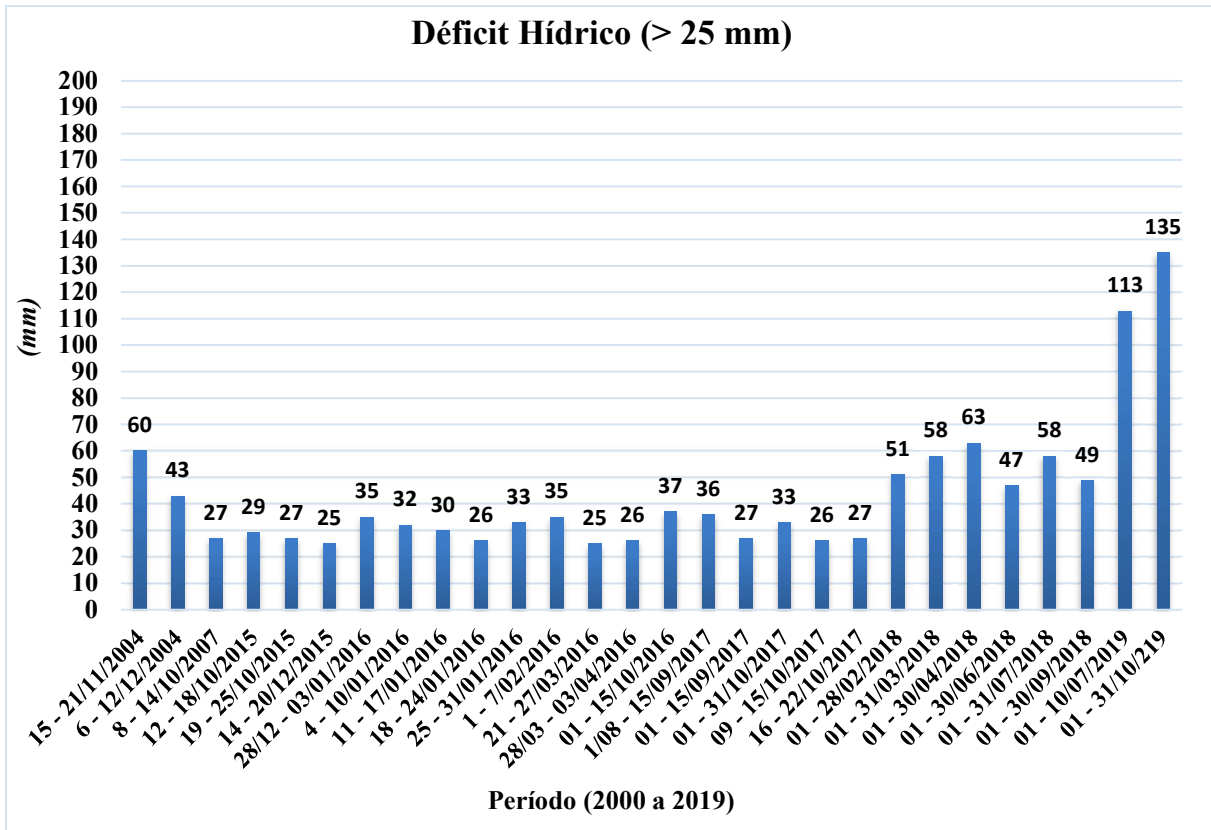


Figura 59: Distribuição do déficit hídrico (> 25 mm) acumulado no período de 2000 a 2019 no município de São Pedro (SP). Fonte: CIIAGRO (2022).

Ainda sobre o déficit hídrico a **Figura 60** apresenta dados mais detalhados referente aos anos de 2017 e 2018 (período disponível mais recente). Tal levantamento demonstra mensurações > 10mm, com certa predominância de valores entre ~ 10mm e ~ 30mm, embora haja registros acima de ~ 50mm e ausência de mensurações nos meses de janeiro e agosto, além da situação crítica nos meses de julho e setembro (maior quantidade de registros) de insuficiência hídrica.

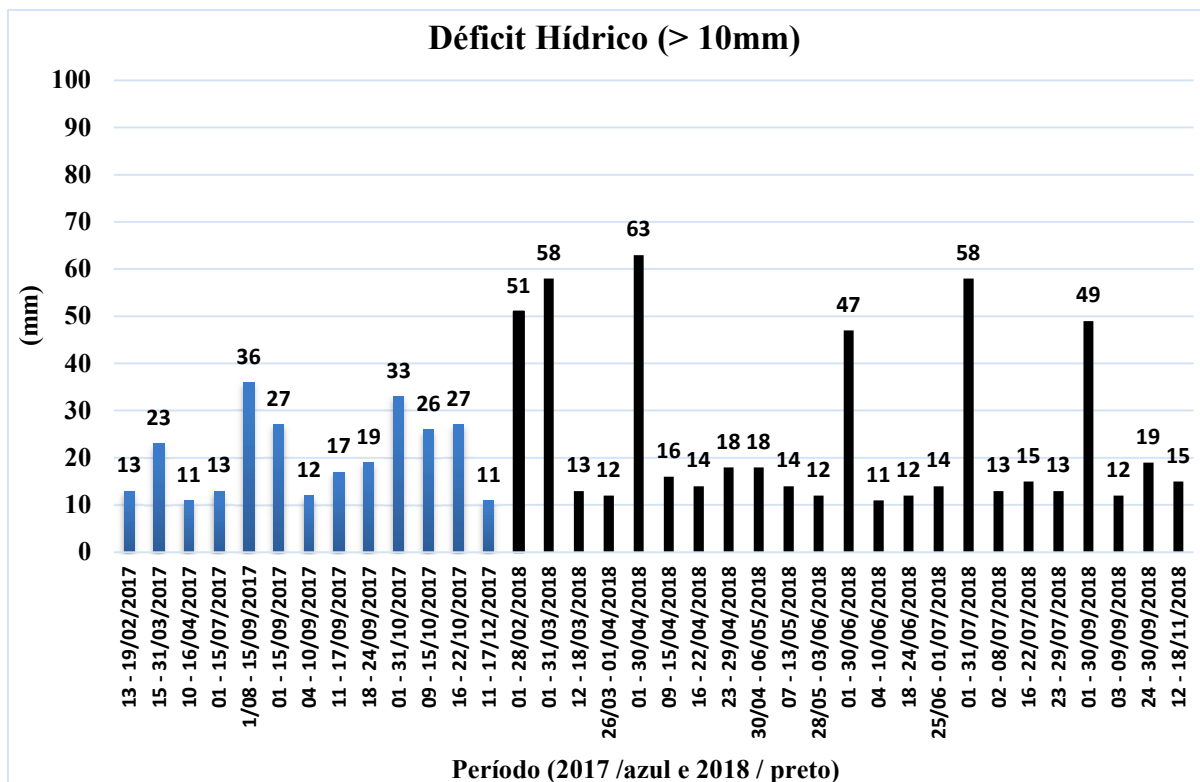


Figura 60: Distribuição do déficit hídrico a partir de > 10mm durante o período de 2017 e 2018 no município de São Pedro (SP). Fonte: CIIAGRO (2022).

7.4 Levantamentos dos Parâmetros de Entrada

Nesta etapa foi utilizado o programa GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*), que a partir do comando *r.in.gdal* (importação e inserção) foi inserido o MDE e definido a região de estudo por meio do comando *r.region*. Na sequência iniciou-se a operacionalização do modelo SIMWE, com a interpolação de todos os dados raster dos módulos fluxos hidrológicos superficiais (*r.sim.water*) e fluxo de sedimentos (*r.sim.sediment*).

O levantamento dos dados pluviométricos e propriedades de solo foi realizado a partir de trabalhos e estudos já realizados na área de estudo, como também em áreas próximas com características e propriedades naturais semelhantes, além de estações pluviométricas.

Também foram realizadas inúmeras simulações/cenários que contribuíram para calibrar o modelo SIMWE, identificar a sensibilidade dos parâmetros, definir as classes (cinco classes) e tonalidades dos produtos finais e, portanto, mais adequados a representação dos processos de erosão e deposição. Neste sentido destaca-se o procedimento de inserção e seleção dos dados que apresentaram melhores desempenhos e, portanto, mais próximo a realidade da

área de estudo, os quais também serviram para analisar a estrutura do modelo SIMWE e suas ferramentas, parâmetros, layout dos produtos, espacialização dos processos de erosão e deposição, precisão, resolução e acurácia.

7.4.1 Módulo Fluxo Superficial (*r.sim.water*)

a) Taxa de Excesso de Precipitação (mm/h)

Os dados deste parâmetro foram utilizados a partir do levantamento do balanço hídrico semanal da CIIAGRO (2021) que refere-se ao Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas do município de São Pedro (SP), referente ao período de 08 de julho de 2002 a 31 de outubro de 2019 (data limite disponível). Neste balanço hídrico consta o período (semana), temperatura média (°C), precipitação (mm), armazenamento (mm), evapotranspiração real (mm), déficit hídrico (mm), excedente hídrico (mm), manejo do solo e desenvolvimento vegetal. Ressalta-se que a precipitação é classificada como erosiva desde que registre volume igual ou superior a 10 mm conforme os trabalhos de Cassol *et al.* (2007); Almeida (2009); Santos *et al.* (2010); Almeida *et al.* (2012) e Silva *et al.* (2022).

A **Figura 61** apresenta a localização das duas estações pluviométricas das quais se obteve os valores empregados no balanço hídrico da área de estudo: a estação do Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) distante a 1,41km do limite da bacia e a estação do IAC (Instituto Agrônômico de Campinas) há cerca de 2,28 km da área de estudo.



Figura 61: Localização das duas estações pluviométricas DAAE e IAC em relação à bacia hidrográfica do Alto Espreado.

b) Coeficiente de Manning (n):

Os valores 0,035 (solo exposto) e 0,079 (pastagem) foram retirados de Mingoti (2012) e, tais valores representam respectivamente a rugosidade mínima que registrou algum tipo de influência nos produtos finais e a rugosidade máxima da superfície com maior interferência.

O trabalho de Mingoti (2012) avaliou as alterações na produção de água ocasionadas pela posição das áreas com cobertura florestal em relação aos solos rasos por meio da aplicação do GSSHA (*Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis*) em bacias hidrográficas no município de Piracicaba (SP). Tal modelo calibrado com dados meteorológicos, fluviométricos, pluviométricos, condutividade hidráulica e curva de retenção dos solos simularam três cenários de uso e ocupação do solo em um intervalo de 15 anos. O autor ressalta-se que os dados do coeficiente de Manning foram levantados após a conversão dos coeficientes CN (*Curve Number*) pela Equação do parâmetro Água Disponível e a classificação do grupo hidrológico

dos solos (**Tabela 11**) com índices de erodibilidade (K) baseada em Lombardi Neto *et al.* (1989).

Tabela 11: Grupos de solos reunidos de acordo com suas qualidades e características.

Grupo/ Solos	Valores (K)	Características
A	1,25	Porosos, alta taxa de infiltração, alto grau de resistência e tolerância à erosão, geralmente profundos (1 a 2m) ou muito profundos (> 2m). Ex: latossolo roxo, latossolo vermelho-escuro, latossolo vermelho amarelo, latossolo vermelho amarelo fase arenosa e latossolo vermelho escuro fase arenosa.
B	1,10	Profundidade entre 1 a 2m, permeabilidade moderada ou rápida, textura arenosa e arenosa média ou arenosa argilosa, taxa de infiltração moderada e resistência moderada e tolerante à erosão. Ex: Podzólico Vermelho Amarelo e Regossolo
C	0,90	Baixa taxa de infiltração, baixa resistência e tolerância à erosão, profundidade (1 a 2m) ou moderadamente profundos (0,5 a 1m). Ex: solos Podzólico Vermelho Amarelo, Podzólico com cascalho.
D	0,75	Baixa taxa de infiltração, baixa resistência a erosão do solo, moderadamente profundo (0,5 a 1m) ou raso (0,25 a 0,50m), permeáveis ou então com mudança abrupta aliada a argila de alta atividade ou ainda com camada de impedimento à infiltração de água. Ex: Litossolos e Podzólico Vermelho Amarelo (quando raso).

Fonte: Modificado de Lombardi Neto *et al.* (1989)

c) Taxa de Infiltração (mm/h) e Permeabilidade (cm/s)

Foram usados os seguintes valores para a taxa de infiltração: 12 mm/h e 4 mm/h, obtidos a partir do trabalho de Gomes (2002) na bacia do ribeirão do Meio no município de São Pedro (SP). Tal estudo determinou a taxa de infiltração dos solos *in situ* usando o infiltrômetro de Anel Duplo (IAD - Norma ASTM-D 3385-88) em materiais inconsolidados transportados da formação Pirambóia e justamente onde estão situadas e registradas as feições erosivas.

Os valores de permeabilidade 0.00488 cm/s e 0.00024 cm/s foram obtidos a partir dos trabalhos de Rodrigues (1982), Santoro (1991), Santos e Fulfaro (1996) e Ferreira (2004)

realizados no município de São Pedro/SP. Tais estudos analisaram a ocorrência de voçorocas e executaram medições de permeabilidade a partir da utilização do permeâmetro de água constante com amostras indeformadas extraídas dos taludes das voçorocas em profundidades variadas entre 1 a 6m.

7.4.2 Módulo Fluxo de Sedimentos (*r.sim.sediment*)

a) Capacidade de Desprendimento (s/m), Transporte de Sedimentos (s) e Tensão de Cisalhamento (Pa)

Os valores 0,7 s/m para o coeficiente da capacidade de desprendimento e 0,6 s referente ao coeficiente da capacidade de transporte foram obtidos a partir dos trabalhos de RODRIGUES (1982) e Silva (1999), os quais se referem a situações de solos arenosos e utilizados para o Cenário 1. Também foi considerado o valor de 0.001 para ambos os parâmetros (coeficiente da capacidade de desprendimento e coeficiente da capacidade de transporte) obtido e proposto pelo manual do modelo SIMWE de Mitas e Mitasova (1998).

Com a simulação dos cenários identificou-se a sensibilidade do parâmetro tensão de cisalhamento (pa) nos resultados/mapas do balanço de erosão e deposição e, neste sentido foi decidido o emprego do valor nulo (0) e 0.5pa da proposta de Mitas e Mitasova (1998), visto que, com estes valores o modelo SIMWE apresentou melhor desempenho.

Ressalta-se que as simulações desconsideradas se utilizaram de valores mínimo 11000 e máximo 18000 (Pa) do trabalho de Ferreira (2004) obtidos a partir de coletas de amostras indeformadas de acordo com a norma ASTM D3080 (*American Society for Testing and Materials*) no formato de caixas 20 cm x 20cm (diâmetro/altura) e a compactação proctor normal na etapa de laboratório.

7.5 Simulação dos Cenários: Erosão/Deposição

Após a descrição e exposição dos métodos e procedimentos adotados para a obtenção dos dados dos parâmetros de entrada, foi realizado o processo de simulação do SIMWE

propriamente dito, em que os cenários representaram condições e propriedades naturais (solo e chuva) e a relação com os processos de erosão e deposição.

Diante deste contexto, foram gerados quatro cenários (**Tabela 12**) que apresentaram os melhores desempenhos, os quais foram denominados de Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4. Tais cenários possuem dados de entrada que simulam condições e características naturais próximas da realidade e que justificam tal seleção, assim como condições para análise da sensibilidade dos parâmetros e a eficiência do modelo e, conseqüentemente, a possibilidade de identificar os setores de maior suscetibilidade erosiva e deposicional.

Tabela 12: Parâmetros empregados e os dados de entradas dos cenários.

Módulo	<i>r.sim.water</i> (Fluxo Hidrológico Superficial)				<i>r.sim.sediment</i> (Fluxo de Sedimentos)		
	Taxa de Excesso de Precipitação (mm/h)	Coefficiente de Manning (n)	Taxa de Infiltração (mm/h)	Permeabilidade (cm/s)	Coefficiente capacidade de desprendimento (s/m)	Coefficiente capacidade de transporte de sedimentos (s)	Tensão de Cisalhamento (Pa)
Cenário 1	190	0.035 (solo exposto)	12	0.0048	0.7	0.6	Valor Nulo (0)
Cenário 2	190	0.035 (solo exposto)	12	0.0048	0.001	0.001	0.5
Cenário 3	190	0,079 (Pastagem)	4	0.00024	Valor Nulo (0)	Valor Nulo (0)	Valor Nulo (0)
Cenário 4	190	Valor Nulo (0)	4	0.00024	Valor Nulo (0)	Valor Nulo (0)	Valor Nulo (0)

Fonte dos dados: CHIAGRO; Rodrigues (1982); Santoro (1991); Santoro e Fulfaro (1996); Silva (1999); Gomes (2002); Ferreira (2004); Mingoti (2012); Manual do Modelo SIMWE (MITAS e MITASOVA, 1998).

O valor de 190 mm/h para a taxa de excesso de precipitação foi empregado em todos os cenários, sendo um dos valores mais altos, coletados a partir do balanço hídrico do município de São Pedro/SP. Assim o cenário 1 procurou simular o fluxo hidrológico superficial com o maior dado de infiltração, menor valor de rugosidade e baixa resistência do solo (valor nulo para a tensão cisalhante).

O cenário 2 manteve os valores do módulo fluxo de água, mas com os valores padrões oferecidos pelos autores Mitas; Mitasova (1998). O cenário 3 apresenta maiores valores de rugosidade e redução da infiltração e da permeabilidade e valores nulos (0) para os demais parâmetros do módulo fluxo de sedimentos. O cenário 4 considerou o valor nulo (0) para rugosidade, menor valor para taxa de infiltração e permeabilidade e valores nulos (0) para os parâmetros do módulo fluxo de sedimentos.

7.5.1 Feições Erosivas em São Pedro/SP

Para a elaboração do inventário das feições erosivas empregadas nos testes de cenários do trabalho em tela, foram utilizados os trabalhos de Daniel e Vieira (2015) e Daniel *et al.*, (2021) que mapearam numa perspectiva histórica (1962, 1972, 2006 e 2013) a bacia do córrego Espreado. Neste sentido, foram consideradas as feições erosivas de 1962 (**Figura 62**) e (**Tabela 13**), visto que, apresenta o registro das mesmas em maior número, as quais foram acrescentadas (atualizadas) com as feições observadas *in loco* por meio da realização de trabalho de campo foi definido, como cenário 2022 (**Figura 63**).

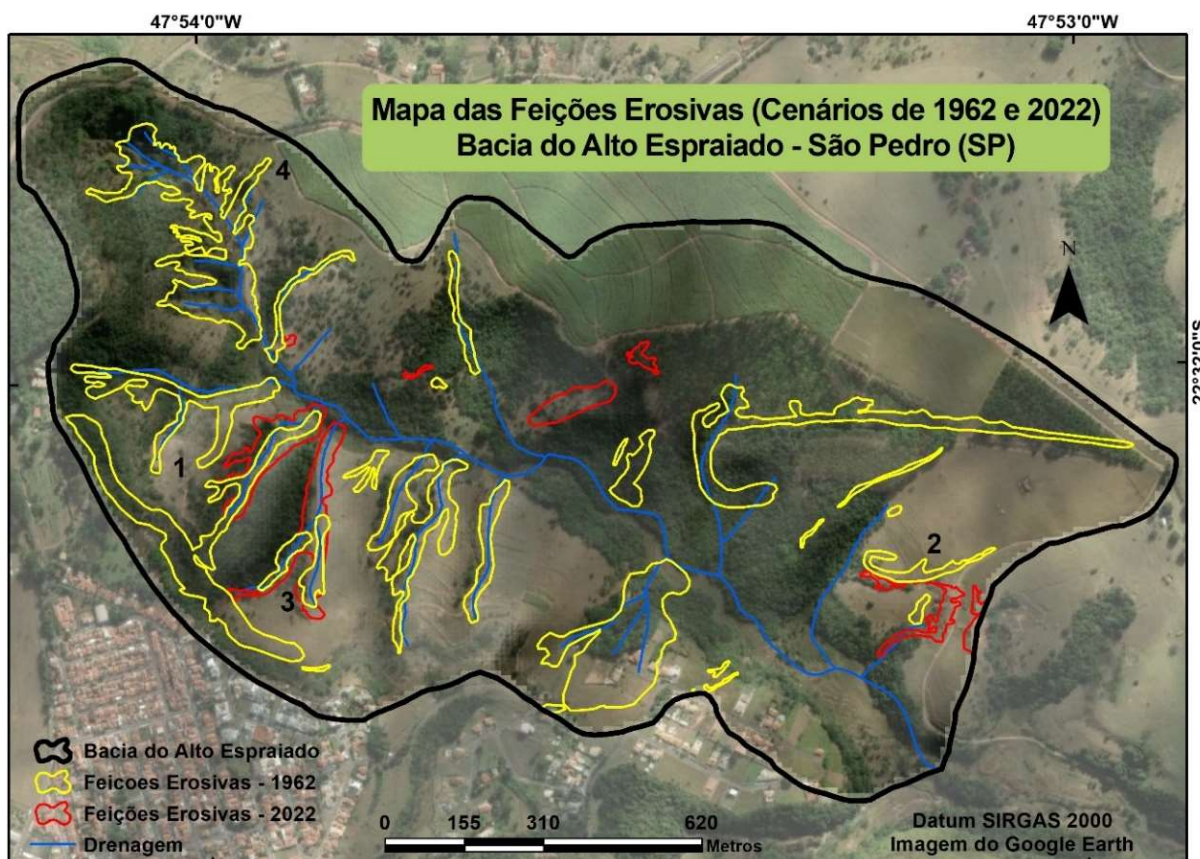


Figura 62: Mapa das feições erosivas, destacados pelos polígonos amarelos (cenário de 1962) e vermelhos (cenário de 2022). Adaptado de Daniel e Vieira (2015)

Tabela 13: Polígonos e área das feições erosivas dos Cenários de 1962 e 2022.

Cenário de 1962				Cenário de 2022	
Polígonos	Área (m ²)	Polígonos	Área (m ²)	Polígonos	Área (m ²)
1	49.163,40	14	361,39	1	335,30
2	3.580,34	15	489,48	2	11.915,35
3	17.590,90	16	4.538,56	3	8.571,46
4	2.043,29	17	971,26	4	5.405,25
5	14.631,90	18	291,67	5	1.475,54
6	6.625,48	19	342,51	6	798,81
7	7.269,90	20	388,05	7	6.817,13
8	4.980,29	21	1.376,32	8	1.448,55
9	373,81	22	369,45	9	374,19
10	3.517,33	23	117,63	Total	37.142 m²
11	27.974,00	24	35.756,40		
12	41.101,30	25	2.854,90		
13	560,69	26	4.296,63		
Total		231.567 m²			

Fonte: Adaptado de Daniel e Vieira (2015).



Figura 63: Registro de feições erosivas na bacia do alto Espraiado em diferentes estágios, as quais estão numeradas de acordo com a Figura 62 (anterior). A número 1 em destaque a linha vermelha que representa o limite da feição. A feição número 2 (feição erosiva em estágio avançado - voçoroca) e as feições número 3 e 4 (feição erosiva em estágio intermediário - ravina).

7.5.2 Validação do Modelo SIMWE

O objetivo desta etapa foi realizar uma correlação integrada e quantitativa entre as feições erosivas lineares e as diferentes classes do produto final Balanço da Erosão e Deposição, por meio do cálculo do índice de PE, método proposto por Gao (1993) que consiste na razão entre o número de células, de cada classe (erosão e deposição), afetadas pelas feições erosivas (N_f) e o total de células dessa mesma classe (N) para toda a área, conforme **Equação 5**:

$$PE = \frac{N_f}{N} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Alguns procedimentos importantes foram executados para a implementação do índice de PE: modificação do *layer* (formato *shape*) das feições erosivas para o mesmo formato que os mapas gerados pelo MDT (*raster*); seleção das células com ocorrências de feições erosivas daquelas que não há ocorrência, por meio da criação de um novo campo na Tabela de atributos do *layer* correspondente às feições erosivas, que foi preenchido com o valor “1”, conseqüentemente as áreas onde as feições registraram ausência foi atribuído o valor “0”; geração dos mapas de cada cenário por meio da correlação (feições erosivas multiplicados por cada classes de erosão e deposição de cada cenário); construção de histogramas das classes que ocorrem no interior das feições com relação à totalidade da bacia a partir do auxílio da ferramenta *Raster Calculator do Spatial Analyst* que interrelaciona os produtos finais (balanço da erosão e deposição) com as feições erosivas mapeadas, tais dados foram exportados em formato *XLS* e inseridos no Microsoft Excel, para possibilitar o cálculo do índice proposto.

Também nesta fase de validação foi implementado a ferramenta *Tabulate Intersection* do programa ArcGis 10.5 que auxiliou na quantificação e na distribuição das classes de erosão e deposição da área de estudo, além das feições erosivas em relação aos parâmetros morfométricos (intervalos de declividade e classes de curvatura), classes de solos e materiais inconsolidados.

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir da aplicação do modelo SIMWE na bacia do Alto Espraiado, o que permitiu analisar a dinâmica dos processos de erosão e deposição.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: (8.1) Simulação; 8.2 Análise dos Cenários de Erosão e Deposição; (8.3) Análise dos Produtos Intermediários e (8.4) Validação dos Cenários.

8.1 Simulação

Os cenários (**Figura 64**) estudados geraram registros numéricos distintos de erosão e deposição, porém, na representação (distribuição) espacial apresentam alguns setores semelhantes. Visto que, grande parte das áreas suscetíveis (valores positivos) que registraram processos de erosão (**Figura 65**) estão localizadas em áreas circundantes do canal principal, dos afluentes e também das drenagens intermitentes, principalmente na média e baixa encosta.

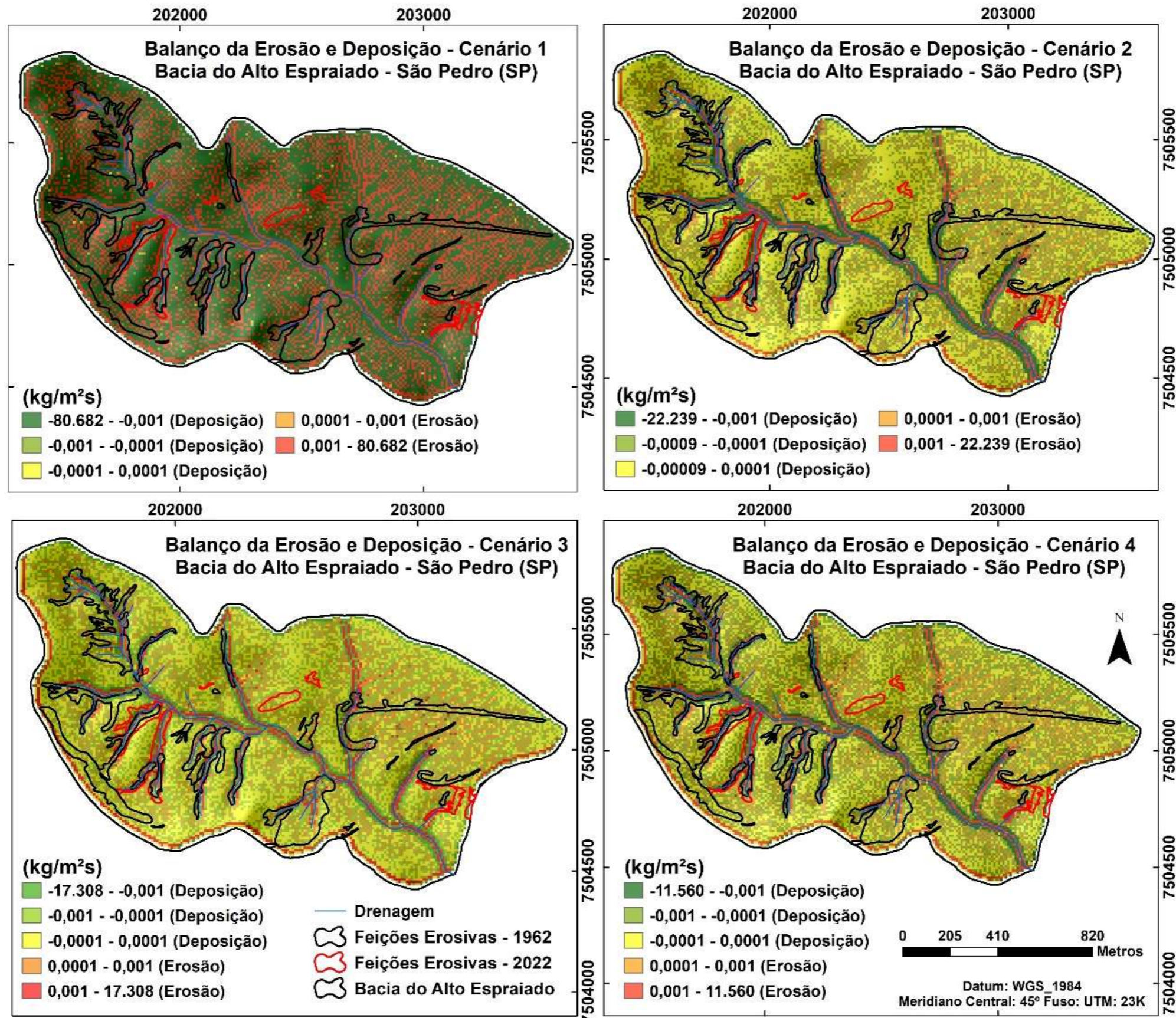


Figura 64: Espacialização do balanço de erosão e deposição com as feições erosivas (1962 e 2022) sobrepostas para os quatro cenários.



Figura 65: Feição erosiva (delimitada em vermelho) identificada pelo Modelo SIMWE e validada *in loco*. Situada em curvatura côncava, presença de canais intermitentes (em azul tracejado) no seu interior.

8.2 Análise dos Cenários de Erosão e Deposição

As primeiras observações referentes aos cenários demonstraram que os parâmetros coeficientes de capacidade de desprendimento e de transporte de sedimentos, assim como a tensão de cisalhamento e o coeficiente de Manning apresentaram influência direta nos resultados. Tais observações são frutos da realização dos inúmeros cenários que também empregaram distintos valores hidrológicos (taxa de infiltração, permeabilidade e taxa de excesso de precipitação).

De forma geral, o emprego do menor valor (nulo = 0 pa) para a força cisalhante, a entrada do valor da capacidade de desprendimento para 0.001 s/m e do transporte de sedimentos para 0.001 s, do valor intermediário 0.035n associado a solos arenosos para o coeficiente de Manning e o valor nulo ou 0.5pa para a tensão de cisalhamento, reduziram a área relacionada a erosão e aumentaram a deposição, mesmo com a alta taxa de excedente de precipitação 190mm/h em todos os cenários.

A **Figura 66** apresenta a distribuição (%) da área da bacia em relação aos processos de erosão e deposição para os quatro cenários. Nota-se que o SIMWE identificou em todos os

cenários a predominância dos processos de deposição entre 64% e 77% e a erosão entre 23% e 36% da área, portanto, tais resultados demonstram que a deposição de sedimentos é maior que a perda de solo. Esta situação é diferente da situação encontrada pelo estudo de Tamene e Vlek (2007), no norte da Etiópia, que a partir do emprego do modelo USPED (*Unit Stream Power based Erosion/Deposition*) identificaram o registro entre 25% a 40% associado a perda de solos. Os autores destacam a bacia de Adikenafiz com processos de erosão e deposição entre 62% e 27% respectivamente, portanto, a perda de solo é maior que a quantidade redistribuída no interior da bacia

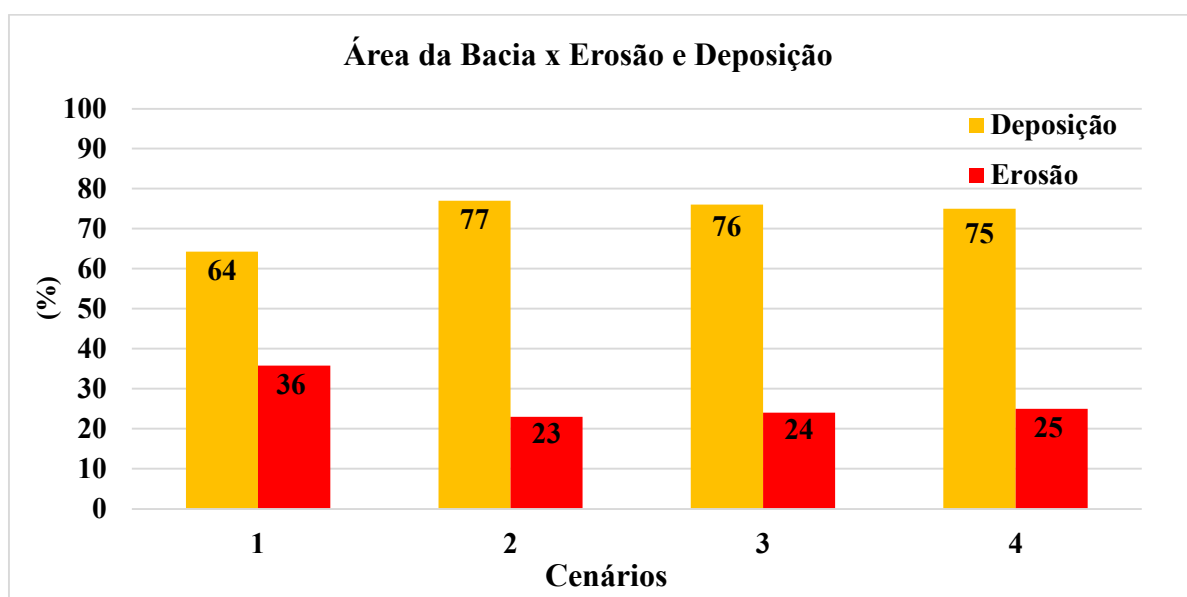


Figura 66: Área da bacia distribuída pelas classes de erosão e deposição. Nota-se que o cenário 1 registrou a maior área suscetível (erosão) com 36% e os demais com cerca de ~ 25%.

A provável influência identificada nos produtos finais dos parâmetros citados neste trabalho em tela possuem semelhança com o trabalho de Ebling *et al.* (2021), que estudaram os impactos hidrológicos associados à rugosidade, à condutividade hidráulica e ao fluxo de sedimentos a partir do emprego do modelo LISEM (*Limburg Soil Erosion*) e do índice NSE numa bacia sob pressão do plantio de eucaliptos e pastagens. Tal estudo, identificou que os variados valores de coeficiente de Manning, tais como: arbustos (min 0.15 e máx 0.59n), eucalipto (min 0.15 e máx 0.60n), estrada (min 0.15 e máx 0.59), mata ciliar (min 0.15 e máx 0.70n) e pastagem (min 0.49 e máx 0.53n) influenciaram na erosão do solo, onde os setores de pastagens apresentaram a maior variação (aumento e redução) da vazão, da umidade inicial do solo e da produção de sedimentos.

Warren (1998) também constatou a influência da rugosidade para a redução de áreas suscetíveis, assim como este trabalho em tela. Tal observação é resultado do emprego do SIMWE numa determinada bacia hidrográfica experimental da Alemanha e também a implantação de cobertura de grama em locais com maior risco de erosão como forma de adotar um uso uniforme do solo e simulação de locais com o solo exposto. O SIMWE registrou neste estudo a diminuição e até a eliminação de sedimentos, com a perda de solo apenas em canais efêmeros e o registro de erosões ao longo das margens das áreas gramadas.

Chen e Wang (2022), com o auxílio do modelo SIMWE, também observaram que a rugosidade por meio dos terraços influenciou no fluxo superficial, mais precisamente na concentração e profundidade e, conseqüentemente, na distribuição da erosão e produção de sedimentos. Os autores analisaram os efeitos das diferentes práticas de conservação do solo e da água e quantificaram a taxa de infiltração do solo e a rugosidade com apoio do MDE. Tal estudo também identificou que a implementação das faixas de vegetação apresentou limitação em relação ao controle do escoamento, embora tenha retido sedimentos por aumentar a rugosidade da superfície.

O produto final, Balanço de Erosão e Deposição (*Erodep*), teve seus intervalos definidos em cinco classes. Tal critério considerou o registro do valor mínimo e máximo dos *pixels*, sendo que os dados negativos das células foram considerados como processo de deposição (-) e os positivos como erosão (+) (**Tabela 14**). Ressalta-se que a definição das classes está associada aos resultados de inúmeras simulações, testes, calibrações, melhor desempenho, ou seja, os quais estiveram mais próximos da realidade da área de estudo.

Tabela 14: Intervalos das classes do mapa final Balanço de Erosão e Deposição.

Balanço de Erosão e Deposição (Erodep)	
Classes (kg/m²s)	Processo
>- 0,001	Deposição (-)
-0,0009 - -0,0001	Deposição (-)
-0,00009 - 0,0001	Deposição (-)
-0,00001 - 0,001	Erosão (+)
0,001 - <	Erosão (+)

O mapa de Balanço de Erosão e Deposição não teve como objetivo classificar as feições ou processos erosivos, mas identificar os setores mais suscetíveis e quantificar o processo de erosão e deposição e, conseqüentemente, a relação de ambos. Trata-se de um modelo hidrológico em que a simulação é realizada em função das relações hídricas de precipitação, escoamento e infiltração, portanto, aumenta a possibilidade que ocorram os maiores valores em áreas onde o escoamento é elevado e nas proximidades dos canais e nascentes, em que os materiais são mais facilmente desprendidos.

Os setores identificados como suscetíveis associados as áreas circundantes do canal principal, dos afluentes e também das drenagens intermitentes, principalmente na média e baixa encosta, podem estar associados à convergência de fluxos, pois embora a bacia possui 43% de sua área associada à curvatura convexa, 33% à classe côncava e 24% à retilínea, grande parte das feições erosivas situa-se em setores de curvatura côncava com ~ 53%, além de ~ 31% em classe convexa e ~ 16% em setores retilíneos. Schanz e Montgomery (2016) analisaram a ocorrência de processos erosivos em duas bacias hidrográficas nos EUA por meio do mapeamento da superfície dos vales e datação dos estratos com radiocarbono. Os autores também identificaram maior suscetibilidade em setores côncavos e sedimentar do que no leito rochoso basáltico, resistente, com vales mais estreitos e menor índice de inclinação.

A maior suscetibilidade em áreas côncavas identificadas pelo SIMWE também é encontrada em inúmeros estudos com variadas metodologias que apontam a concavidade com maior suscetibilidade à ocorrência de erosão hídrica, sobretudo linear, devido principalmente à convergência de fluxos aplicadas no Brasil tais como: Rodrigues (1982); Oliveira e Meis (1985); Cruz (2001); Castro (2005); Lohmann e Santos (2005); Vieira (2006); Stabile e Vieira (2009); Lemos *et al.*, (2011) e também no mundo Trimble e Mendel (1995); Sidorchuk (1999); Casanovas (2003); Meules *et al.* (2006); Gutierrez *et al.* (2009); Phinzi e Ngetar (2019).

Diferente da situação identificada pelo SIMWE, Tamene e Vlek (2007) identificaram maior intensidade erosiva em curvatura convexa, facilitada pela declividade superior a 15°, as quais favorecem a formação do fluxo acelerado e poder erosivo, justificada pela taxa de formação de solo 3 - 7t ha⁻¹ mas inferior que a taxa de perda de solo de ~ 19t ha⁻¹ do norte da África.

Castro (2005) também observou que a formação de processos erosivos tem relação com as zonas côncavas, declividade entre 8 e 12% e o sistema de fraturas. Tal estudo, explica

que o surgimento e a evolução das erosões são influenciados pelos fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais concentrados e convergentes.

A bacia do Alto Espriado está constituída por quatro grupos de solos: Neossolo Litólico, Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico (FURQUIM, 2002). Tais solos compõem respectivamente: ~ 55%, ~ 33%, ~ 3% e ~ 9% da área de estudo, sendo que grande parte das feições erosivas está situada em setores constituídos por Neossolo Litólico com ~ 87% e um pequeno percentual ~ 9% no Neossolo Quartzarênico. Conforme Furquim (2002), estes dois solos possuem, respectivamente, maior concentração de argila com baixa profundidade e maior espessura e arenosos. Deste modo, os setores mais suscetíveis (curvatura côncava) estão constituídos pelos grupos de solos Neossolos Litólico e Neossolos Quartzarênico que registraram maior número de feições erosivas, os quais caracterizam, respectivamente, pela baixa infiltração e maior capacidade de retenção de água e o segundo grupo baixa retenção de água e maior capacidade de infiltração.

Em relação a declividade (%), a bacia do alto Espriado constitui-se da seguinte forma: a classe < 5 possui ~ 24% da área total, as classes 5 - 10% e 10 - 20% são as mais expressivas com ~ 34% e ~ 37% respectivamente e, por fim a classe 20 - 40% com ~ 5% da área. Os registros das feições erosivas estão distribuídas da seguinte forma: na classe 0 - 5% foram registradas 12%; no intervalo 5 - 10% estão situadas cerca de 40%; na classe 10 - 20% estão localizadas aproximadamente 41% das feições erosivas; no intervalo 20 - 40% foram registradas apenas 7%. Portanto, 81% das feições erosivas foram mapeadas numa declividade entre 5 - 20%, setores suscetíveis que estão associados à contribuição de outros aspectos já citados, como a curvatura côncava, Neossolos Litólicos e Quartzarênicos que também registraram percentual significativo de feições erosivas (**Tabela 15**).

Tabela 15: Distribuição da área da bacia e das feições erosivas com a declividade.

Classe	% (área)	% (feições erosivas)
0 - 5	24,22	12,00
5 -- 10	33,83	40,00
10 -- 20	36,51	41,00
20 -- 40	5,44	7,00
40 <	-	-
Total	100	100

Embora não seja um trabalho recente, o estudo de Zoccal (2007) apresenta um panorama de parte do estado de São Paulo em relação à influência da declividade na formação dos processos erosivos. Pois cerca de 183 municípios paulistas estão em condições críticas, com ocorrência de processos erosivos, os quais 56% das áreas analisadas estão situados nos intervalos de declividade entre 0 - 15%, 32% entre 15 - 25%, 10% entre 25 - 40% e 2% para a classe maior que 40%.

Tamene *et al.*, (2007) estudaram o processo de deposição e erosão em bacias hidrográficas na Etiópia a partir da aplicação do modelo USPED (*Unit Stream Power based Erosion/Deposition*) e identificaram que os processos erosivos ocorrem com maior intensidade em declividade $> 15^\circ$ e a predominância de curvaturas convexas. Ebhuoma *et al.* (2022) constatarem a influência da declividade a partir do modelo AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e do mapeamento de áreas suscetíveis em duas bacias hidrográficas na África do Sul, com o registro de 35% da área associada à alta suscetibilidade.

O trabalho do DAEE (1990) na bacia do Peixe-Paranapanema/SP também identificou que os processos erosivos ocorrem com maior frequência em encostas com declividade maior que 12% (relevos movimentados e colinas médias), situadas, principalmente, em cabeceiras de drenagem. Tal estudo analisou o Uso e Manejo (C) e a Prática Conservacionista (P), utilizou a Equação Universal de Perdas de Solo, além do apoio de fotos aéreas, imagens de satélite e observação de campo.

Fox e Bryan (1999) analisaram a dinâmica da taxa de erosão a partir do modelo USLE e solo franco arenoso com simulação de chuva por um período de 75 min. Tal estudo também identificou que a declividade foi fator condicionante por cerca de 80% das erosões e o fluxo superficial foi responsável pela formação de apenas 20% das erosões, principalmente no início da simulação, posteriormente, reduziu para uma taxa constante devido ao desprendimento (coesão do solo superficial). Embora não seja um trabalho recente, Salomão (1994) também identificou que as maiores concentrações de ravinas e voçorocas do médio e baixo Tietê (SP) estão associadas ao intervalo de declividade 12% a 20%, em rupturas côncavas (em forma de anfiteatro).

Nestes setores diagnosticados como suscetíveis pelo SIMWE, também destaca-se a influência do uso do solo (**Figura 67**), os quais estão constituídos conforme Daniel *et al.* (2021) pela pastagem, solo exposto, atividades agrícolas (ex: cana de açúcar), silvicultura e

urbanização. Devido à intensidade e à dinâmica desta suscetibilidade erosiva ressalta-se a contribuição e a presença dos materiais inconsolidados (YAMANOUTH, 2003), que constituem a área da bacia na seguinte forma: solos aluvionares ~ 4,5%, rocha muito alterada ~ 11%, rocha sã ~ 32%, material retrabalhado ~ 27%, solo residual ~ 22% e solo saprolítico ~ 3,5%, sendo que as feições erosivas estão concentradas na rocha sã com ~ 36%, seguido do material retrabalhado com ~ 30% e o solo residual com ~ 19%.

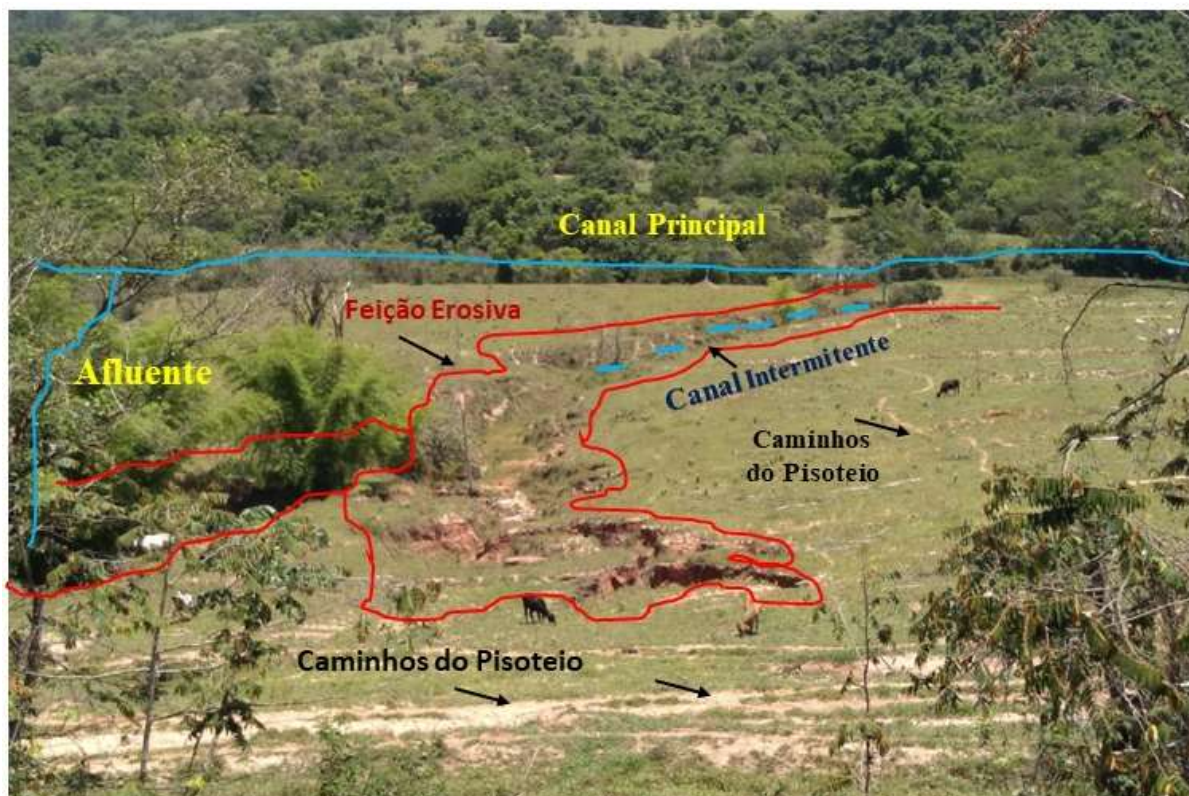


Figura 67: Registro da prática de pastagem em área circundante da feição erosiva.

A relação e influência do uso do solo com a suscetibilidade erosiva também foi identificada por GUTIÉRREZ *et al.*, (2009). Os autores estudaram uma determinada bacia na Espanha, a partir de fotografias aéreas em diferentes cenários (1945, 1956, 1989, 1998, 2002 e 2006) e constataram que o aumento das áreas prejudicadas pela erosão tem relação com o manejo do solo, exemplificado pelas áreas cultivadas e a intensidade da pastagem.

Daniel e Vieira (2015) e Daniel *et al.*, (2021) analisaram numa perspectiva histórica as implicações do uso do solo e sua influência na gênese e distribuição das feições erosivas também na bacia do córrego Espraiado por meio de fotointerpretação, SIG, método estatístico

e trabalho de campo. Os autores identificaram intensa relação entre a formação dos processos erosivos e o uso do solo, sobretudo, o registro das classes de solo exposto e pastagens como as mais suscetíveis.

Nyssen *et al.*, (2002) estudaram o impacto da construção de estradas nas montanhas da Etiópia e constataram que construções provocaram a formação de voçorocas, resultados da concentração do escoamento superficial e o desvio dos fluxos para bacias adjacentes. Meyles *et al.* (2006) também identificaram a relação do uso do solo com a formação dos processos erosivos, pois constataram numa bacia da Inglaterra que a pastagem nas encostas alteraram as propriedades hidrológicas e a descarga de fluxo, fatores que influenciaram indiretamente nos processos geomorfológicos.

Também destacam-se, dois trabalhos que utilizaram o modelo WEPP (base do SIMWE), que embora não sejam recentes, identificaram a relação do uso do solo com a formação de processos erosivos: Foltz *et al.*, (2007) analisaram os riscos de erosão em estradas florestais compactadas de *Payette/EUA* a partir de simulações de chuva (89mm em 30min), os autores identificaram que o período de estudo de quatro anos foi tempo insuficiente para as estradas retornarem às condições pré-estrada (florestada), visto que, a capacidade de infiltração ser semelhante a de uma via de tráfego intenso (8,8 mm h⁻¹), mas bem menor que a de uma floresta intacta (40 a 80 mm h⁻¹).

Pieri *et al.*, (2007) com dados de escoamento, sedimentos e informações meteorológicas investigaram os impactos hidrológicos e erosivos de três rotações de culturas (milho, alfafa e trigo) em parcelas experimentais na Itália. Tais autores avaliaram os fluxos superficiais e de sedimentos por um período de sete anos de monitoramento e identificaram que o plantio de milho produziu menor escoamento e sedimentos em relação aos demais cultivos.

A **Figura 68** apresenta os maiores valores de erosão registrados pelo modelo SIMWE, que tem as suas maiores intensidades representadas pelas “linhas preferencias, caminhos ou rotas”. Tais resultados estão associados à capacidade do SIMWE em representar espacialmente os setores mais suscetíveis à erosão e principalmente a importância da topografia para o emprego do modelo SIMWE. Conforme Mitas e Mitasova (1998) além de ser um parâmetro obrigatório para a sua operacionalização, consiste a partir do MDE os aspectos morfométricos, como também as derivadas parciais (dx e dy), do campo de elevação (m/m), utilizados para as simulações dos padrões de fluxos.

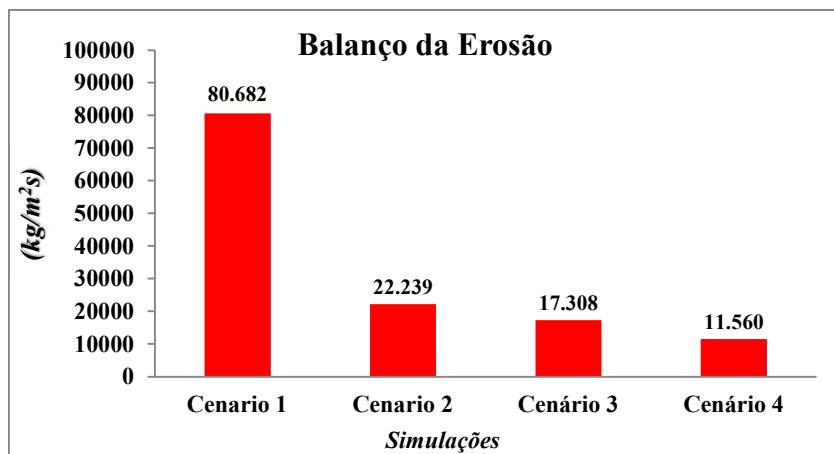


Figura 68: Maiores valores de erosão para as quatro simulações. Cenário 1, 2, 3 e 4: Taxa de Excesso de Precipitação (190mm/h), Coeficiente de *Manning* (0.035n; 0.035n; 0.079n; valor nulo); Taxa de Infiltração (12 mm/h; 12 mm/h; 4mm/h; 4 mm/h), Permeabilidade (0.0048cm/s; 0.0048cm/s; 0.00024cm/s; 0.00024cm/s), Coeficiente capacidade de desprendimento (0.7 s/m; 0.001 s/m; valor nulo e valor nulo), Coeficiente capacidade de transporte de sedimentos (0.6s; 0.001s; valor nulo e valor nulo), Tensão de Cisalhamento (valor nulo; 0.5pa; valor nulo e valor nulo).

Hofierka *et al.*, (2002), reforçam a importância da topografia, pois representa um espaço de configuração e da presença das derivadas parciais da superfície de elevação (dx e dy), as quais oferecem condições para identificar e determinar a direção e a magnitude do fluxo de água, combinado com outros parâmetros como o coeficiente de Manning, a tensão de cisalhamento, o coeficiente da capacidade de desprendimento e transporte de sedimentos.

Straffelini *et al.*, (2022) a partir do emprego do modelo SIMWE relatam a importância da espacialização, pois também identificaram linhas preferenciais do fluxo superficial associado à erosão e que possibilitaram compreender os processos e o manejo em setores suscetíveis. Tal estudo analisou o escoamento e a erosão em diferentes usos para a elaboração da gestão do solo numa área de videiras, com amostras de sedimentos, observações de campo e a simulação de quatro eventos de chuva.

De forma geral do primeiro para o último cenário nota-se uma redução dos valores de erosão, o que pode estar associada à presença da tensão de cisalhamento para o Cenário 2 e valores nulos do coeficiente de Manning e dos demais parâmetros do módulo fluxo de sedimentos (coeficiente da capacidade de transporte de sedimentos e coeficiente da capacidade de desprendimento) para os cenários 3 e 4.

Os resultados apresentados referente ao Cenário 1 em que registrou os maiores valores de erosão ($\sim 81.000 \text{ kg/m}^2\text{s}$), podem estar relacionados aos valores máximos da taxa de infiltração (12 mm/h), do excesso de precipitação (190 mm/h), ao valor de 0.35n para o coeficiente de Manning (típico de solo exposto ou solos arenosos), aos maiores valores atribuídos para o coeficiente da capacidade de desprendimento 0.7 (s/m) e o coeficiente da capacidade de transporte de sedimentos (0.6 s), além do valor nulo atribuído para a tensão de cisalhamento do solo.

Então, a maior presença da força cisalhante dos fluxos hidrológicos, permite um aumento da dimensão da erosão, pois a água com maior carga de sedimentos em suspensão tem menor potência para transportar sedimentos e força inferior para aumentar a magnitude das taxas de erosão (MITASOVA *et al.* 1997; WARREN, 1998). Fernandes *et al.*, (2017) a partir da aplicação do SIMWE também identificou que grande parte das feições erosivas mapeadas (98,5%) se concentram nas maiores classes da capacidade de transporte de sedimentos.

A **Figura 69** apresenta de uma forma detalhada o Cenário 1 (que obteve o melhor desempenho), com alguns exemplos de feições erosivas diagnosticadas pelo SIMWE por meio dos valores positivos e que foram validadas em campo. Resultados que demonstram a capacidade do modelo em diagnosticar áreas suscetíveis associadas aos processos erosivos, além da importância da espacialização da dinâmica da erosão e deposição que possibilitou analisar a localização, os setores, as direções, intensidade e de forma geral os fatores condicionantes dos processos por toda a área.

Carvalho (2019) identificou e validou ravinas numa determinada bacia hidrográfica em Portugal que sofre com alterações das práticas agrícolas. Com o apoio do SIMWE, o autor analisou a área antes e após um evento de grande magnitude através da sobreposição das feições modeladas com as identificadas *in loco*. Tal estudo obteve resultados satisfatórios que comprovam a eficácia (precisão) do SMWE, pois os setores constatados nas simulações com valores positivos estão associados às feições erosivas registradas em campo.

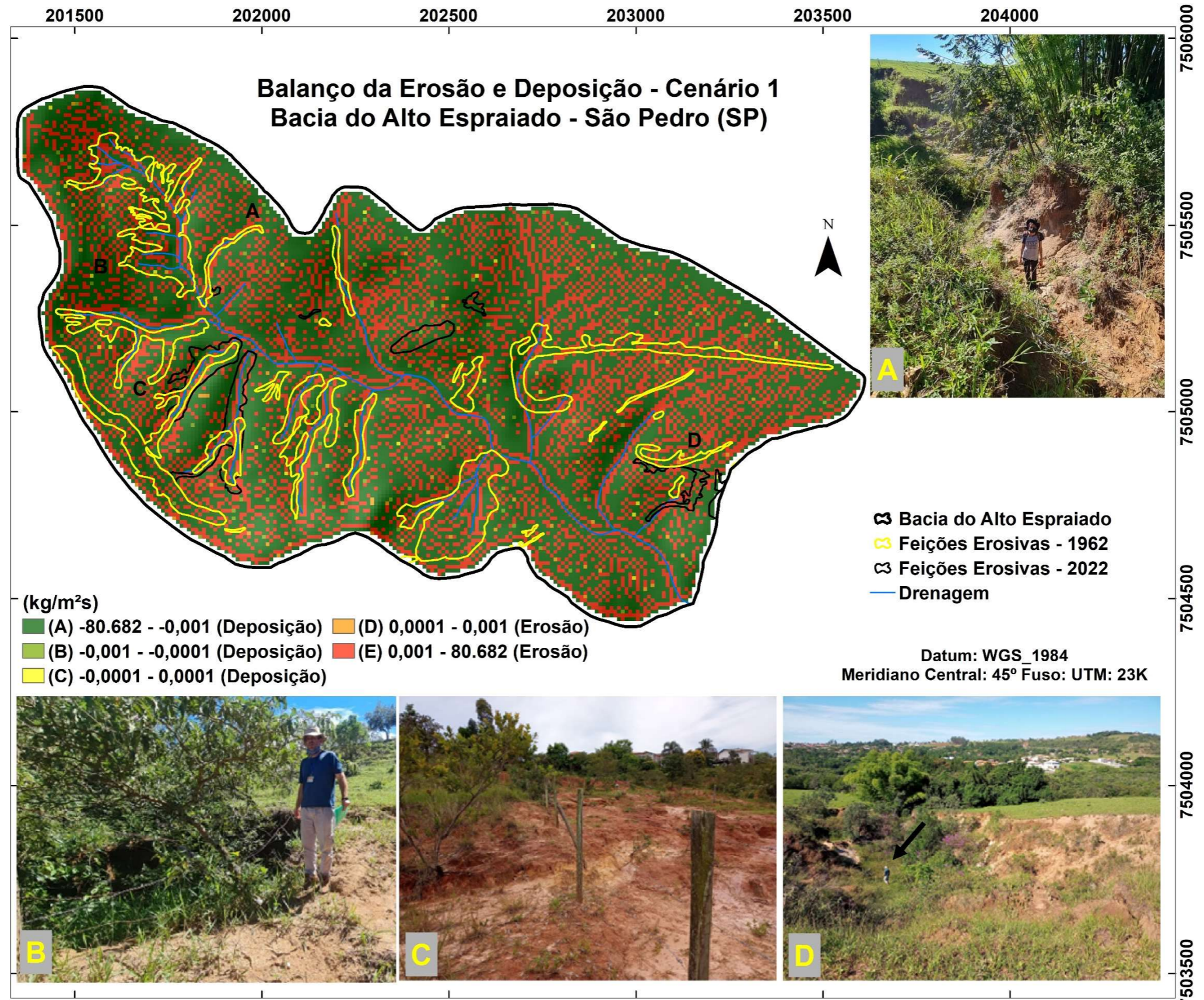


Figura 69: Em maior detalhe a espacialização do balanço de erosão e deposição do Cenário 1 com as feições erosivas (1962 e 2022) sobrepostas. Destaque para as feições ilustradas que o modelo SIMWE identificou como áreas suscetíveis (erosão).

A capacidade do modelo SIMWE em identificar áreas suscetíveis também foi constatada pelo estudo de Koco (2011), que considerou os mesmos parâmetros deste trabalho em tela e identificou as áreas com potencial formação de ravinas, a partir da quantificação do fluxo superficial, da análise da direção e do volume de água/tempo, principalmente a concentração do fluxo no fundo da bacia.

O aspecto pluviométrico exemplificado pela alta taxa de excedente de precipitação (190mm/h) considerada neste cenário e a relação com a suscetibilidade erosiva, também foi identificada no trabalho de Ferreira *et al.*, (2021), pois os autores observaram precipitações erosivas em 57,3% dos eventos monitorados a partir de experimentos (equivalente a 50% da área da bacia), aliado ao emprego do WEPP (base do SIMWE) no sul de Minas Gerais/Brasil.

A relevância dos dados hidrológicos pode ser justificada pelo trabalho de Bazão *et al.*, (2014), que avaliaram temporal e espacialmente os principais parâmetros hidrológicos e a interferência nos processos erosivos de acordo com a magnitude numa determinada bacia do estado do Rio de Janeiro. Os autores monitoraram a vazão em locais com diferentes usos e manejos do solo, dados pedológicos, índices estatísticos e o emprego do modelo SWAT. Tal estudo identificou que a água disponível no solo e a condutividade hidráulica interferem na geração do escoamento superficial, nas vazões e conseqüentemente no poder erosivo da bacia.

O Cenário 2 (**Figura 70**), que registrou $\sim 22.000 \text{ kg/m}^2\text{s}$, portanto, uma redução significativa dos valores de erosão em comparação ao cenário anterior. Provavelmente, é resultado da influência do maior valor da tensão de cisalhamento (0.5pa), da coesão (resistência) do solo (0.5pa) ser maior que a tensão do fluxo de água, além da redução dos valores do coeficiente da capacidade de desprendimento (0.001 s/m) e do coeficiente da capacidade de transporte de sedimentos (0.001s), que interferiram na redução do desprendimento do solo e na extensão espacial da erosão.

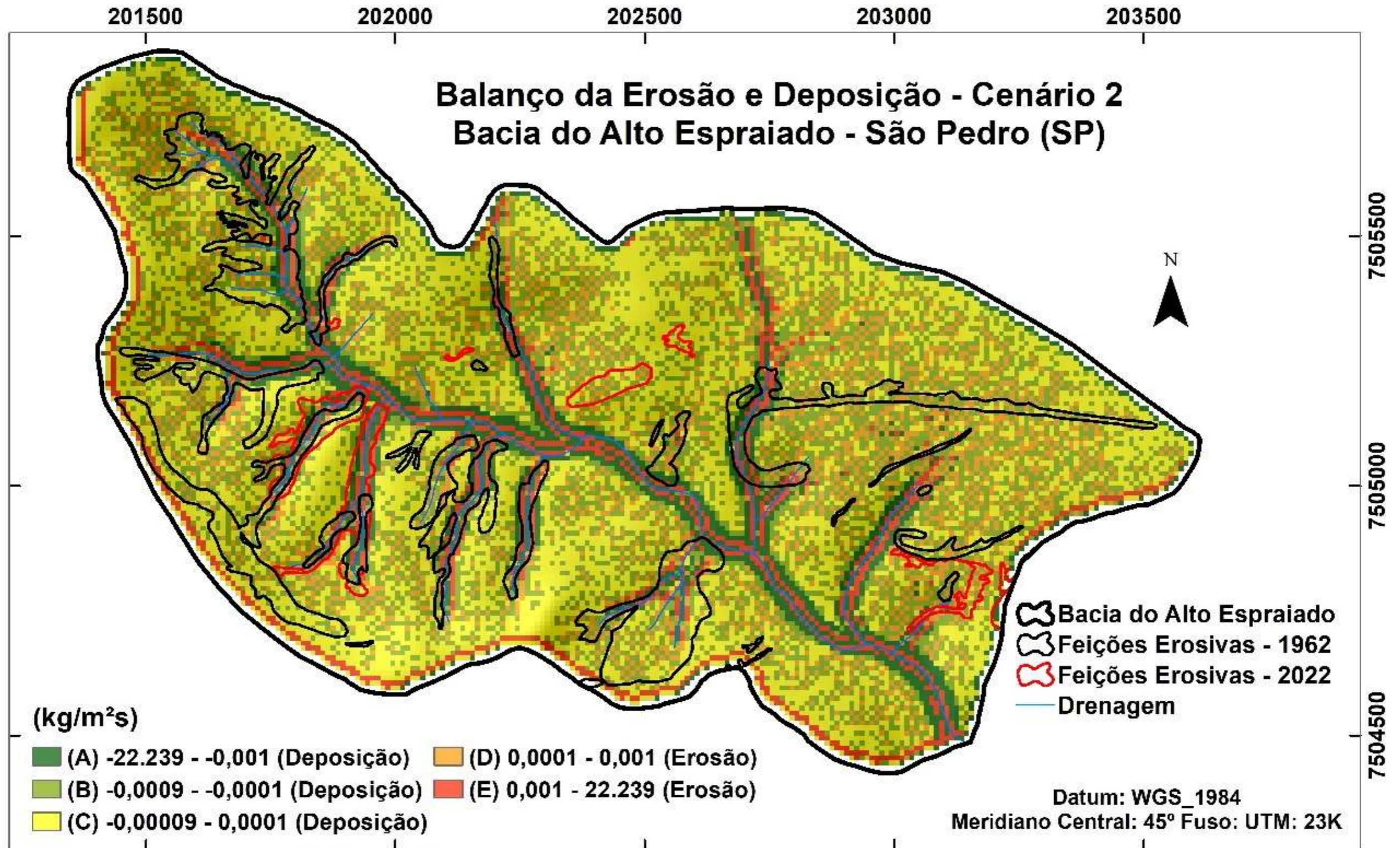


Figura 70: Representação em maior detalhe da espacialização do Balanço de Erosão e Deposição do Cenário 2 com a sobreposição das feições erosivas (1962 e 2022).

Os Cenários 3 e 4 (**Figuras 71 e 72**) apresentaram situações semelhantes em comparação à distribuição espacial das classes de erosão e deposição do Cenário 2, embora os mesmos tenham registrados valores distintos de erosão, $\sim 17.000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $\sim 11.500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ respectivamente.

O resultado do Cenário 3 provavelmente está vinculada à influência ao aumento do valor do coeficiente de Manning (0,79n) que representam as condições de pastagens, valores nulos para os parâmetros do módulo fluxo de sedimentos e a redução da taxa de infiltração (4 mm/h) e permeabilidade (0.00028 cm/s). Em relação ao resultado do Cenário 4 e o registro do menor valor de erosão, possivelmente tem relação com a redução para o valor nulo (0) do coeficiente de Manning, pois os dados de entrada dos demais parâmetros são os mesmos do Cenário 3.

Pijl *et al.* (2022) estudaram os impactos da Conservação do Solo e da Água (SWC) por diferentes sistemas de cultivo de uva em área com terraços e sem terraços a partir de dados topográficos e do modelo SIMWE. Tal estudo identificou que a rugosidade do relevo por meio da implantação dos terraços de contorno influenciou e deste modo foram eficientes na interceptação de fluxo e na distribuição homogênea do escoamento e sedimentos.

A relação da redução da taxa de infiltração com a erosão também foi observada por Obiechefu *et al.*, (2020), em cinco grupos de solos (Ferrasols Rhodic, Nitosols Eutric, Lithosols, Gleysols Eutric e Dystric ferrasols) na Nigéria, a partir de amostras de solo, testes de infiltração *in situ* e modelos de infiltração. Os autores identificaram que as taxas de infiltração variaram entre 5,64 mm/h e 820mm/h, as erosões (concentração de sedimentos) entre 150g/l e 1250g/l, esses resultados demonstraram que as menores taxas de infiltração possuem baixa suscetibilidade.

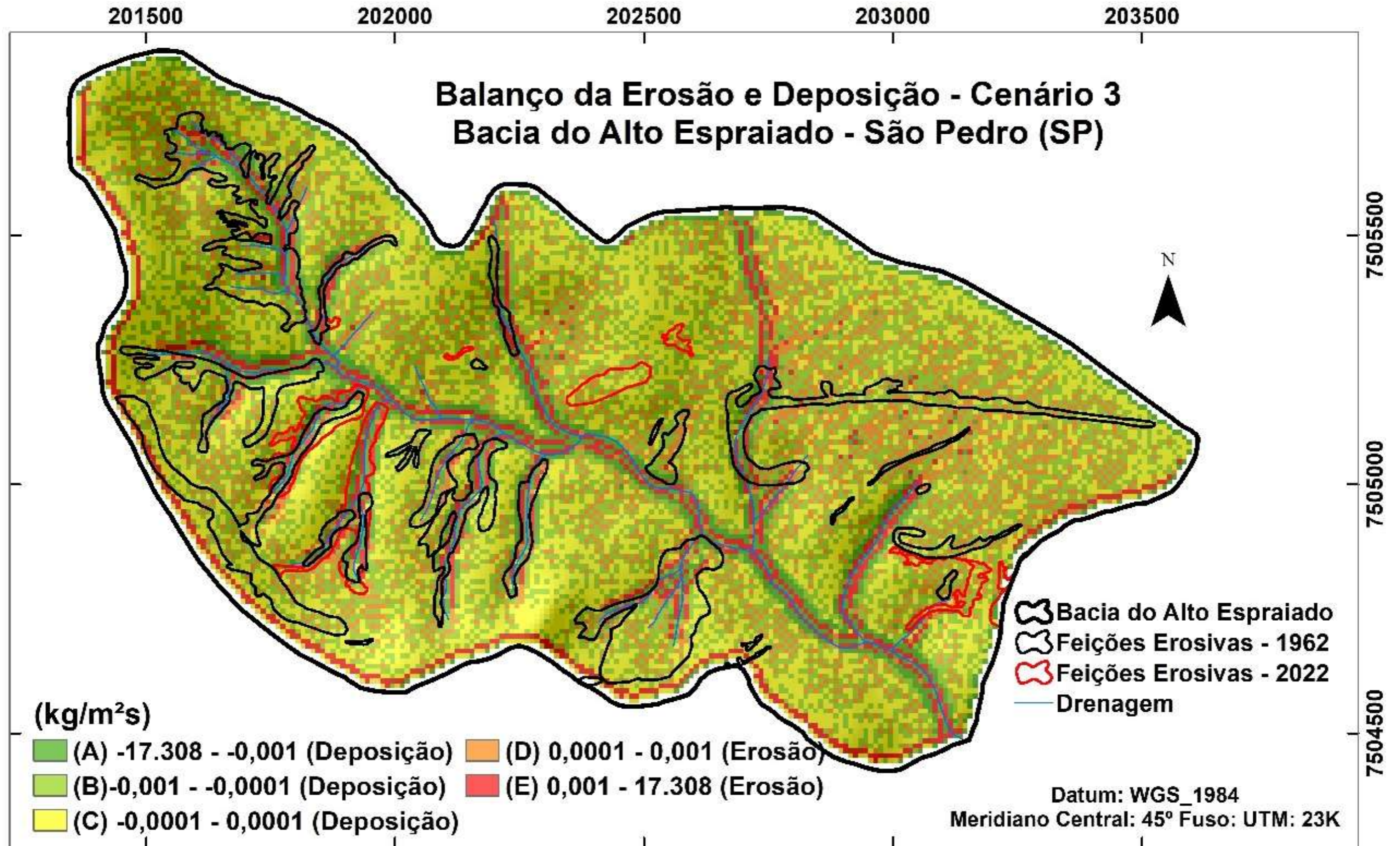


Figura 71: Representação em maior detalhe da espacialização do Balanço de Erosão e Deposição do Cenário 3 com a sobreposição das feições erosivas (1962 e 2022).

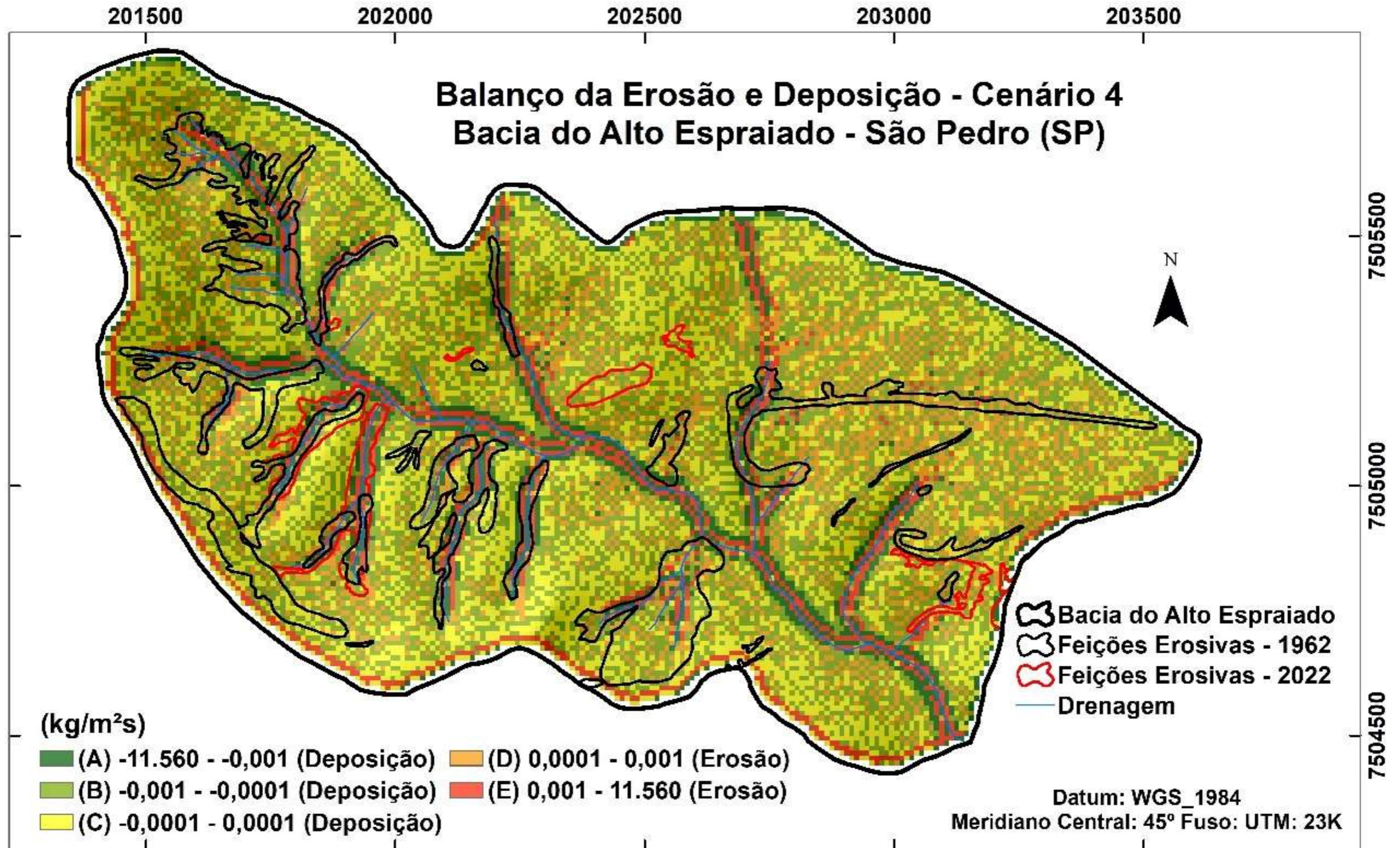


Figura 72: Representação em maior detalhe da espacialização do Balanço de Erosão e Deposição do Cenário 4 com a sobreposição das feições erosivas (1962 e 2022).

8.3 Análise dos Produtos Intermediários

Os produtos intermediários: fluxo hidrológico superficial (m^3/s), profundidade da lâmina d' água (m), concentração de sedimentos (partículas/ m^3) e fluxo de sedimentos ($kg/m.s$) gerados pelo modelo SIMWE e que foram selecionados para este trabalho em tela também estão apresentados a partir da definição de cinco classes que melhor representaram tais processos, critério obtido por meio dos resultados de testes / simulações e classificações (**Figuras 73 e 74**).

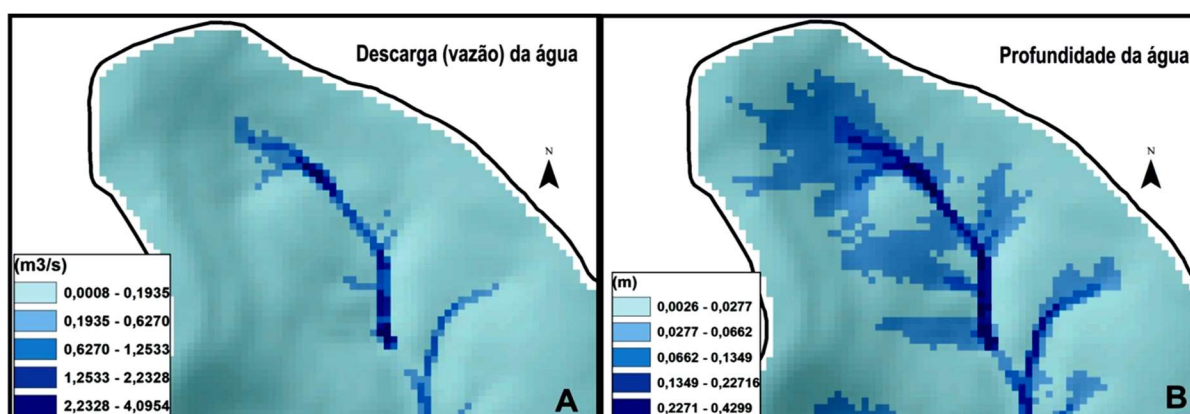


Figura 73: Exemplo de produtos de saída do módulo fluxo de água superficial. (A) Mapa da descarga (fluxo) de água (m^3/s) e (B) Mapa da Profundidade de água (m), ambos no setor a montante da bacia do alto Espreado com as cinco classes (**Figura sem escala**).

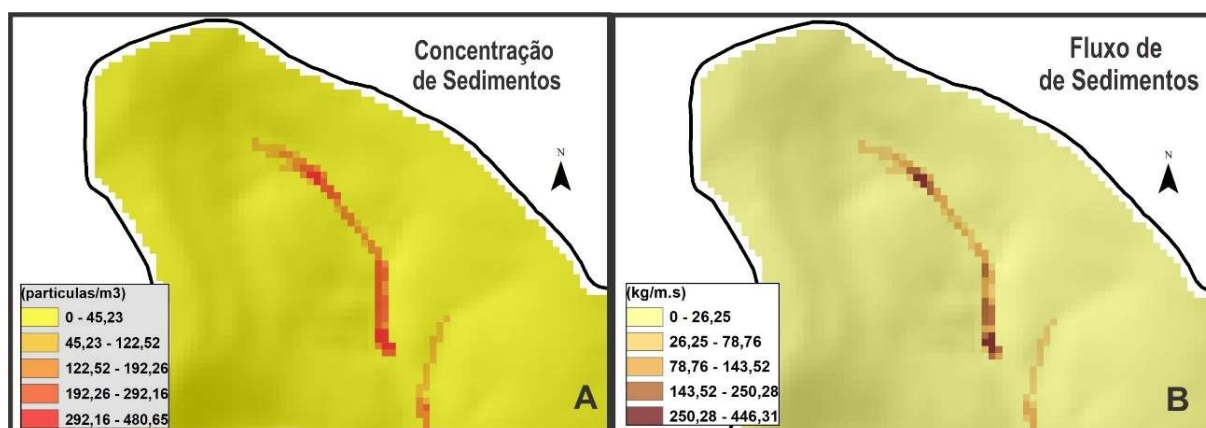


Figura 744: Exemplo de produtos de saída do módulo fluxo de sedimentos do setor a montante da bacia do alto Espreado. (A) Concentração de Sedimentos (partículas/ m^3) e (B) Fluxo de Sedimentos ($kg/m.s$) (**Figura Sem Escala**).

8.3.1. Fluxo Hidrológico Superficial (m^3/s)

O produto fluxo hidrológico superficial (**Figura 75**) apresentou cenários em que os setores com os maiores valores ou intensidades referente ao escoamento superficial (fluxos concentrados ou perenes) estão espacialmente identificados por “linhas preferenciais”, locais em que parte significativa das feições erosivas estão situadas, associadas às áreas circundantes da drenagem principal e afluentes (perenes ou intermitentes). Tal situação, também constatada pelo trabalho de Warren (1998), que observou a partir do SIMWE locais suscetíveis e de grande concentração de fluxos superficiais representado por “linhas preferenciais” e, portanto, tal estudo concluiu que são setores inadequados para a construção e instalação de bases militares.

Esses resultados obtidos pelo trabalho em tela são semelhantes com o estudo de Fernandes *et al.* (2017), que identificaram por meio do SIMWE grande número de feições erosivas em áreas a montante dos canais. Resultados associados à influência da topografia, que contribuiu para a formação do escoamento mais significativo e, portanto, setores em que as feições erosivas mapeadas pelos autores estão relacionadas com as classes média e alta do fluxo superficial.

Mathias *et al.* (2020) estudaram as rotas do fluxo superficial em área caracterizada por intensas ações antrópicas numa determinada bacia do interior do estado de São Paulo/SP com a presença de feições erosivas lineares (ravinas e voçorocas). Os autores, a partir do mapeamento (carta de fluxo concentrado) e a modelagem / algoritmo Multiple Flow, delimitaram os setores de dispersão e concentração de fluxos e calcularam as células com tendências de concentração de fluxos. Tal trabalho, constatou que as rotas do fluxo superficial (percurso preferencial) são influenciadas por terraços tecnogênicos e conseqüentemente contribuem para a aceleração dos processos erosivos da área.

Pijl *et al.*, (2020) analisaram os processos de erosão e escoamento em três áreas de cultivo de uva em declive acentuado no norte da Itália com terraços e sem terraços. Tal estudo, utilizou dois modelos de erosão hídrica a RUSLE e o SIMWE, além de dados topográficos de alta resolução, informações de uso do solo e precipitação. Os autores identificaram, a partir das simulações do SIMWE, a formação de linhas preferenciais para o escoamento superficial nas três áreas (com ou sem terraços), as quais correspondem aos registros de erosão e taxas de perda de solo observados em campo, este último também identificado pela RUSLE. Tal pesquisa

concluiu que o modelo SIMWE apresentou um bom desempenho para a identificação de setores suscetíveis durante condições de chuvas intensas em encostas íngremes.

Kotinas *et al.* (2015), mapearam as zonas de erosão e deposição numa ilha da Grécia, com uma geomorfologia montanhosa e registro de erosão associado a frequência e a magnitude da precipitação, fluxo hidrológico, declividade e uso do solo. Os resultados identificados pelos autores demonstraram que as áreas localizadas principalmente na parte central da ilha (setores com maior declividade) e “caminhos” do fluxo superficial possuem maior atuação dos processos denudativos.

Pijl *et al.*, (2021), investigaram os processos erosivos em uma região de cultivo de uva na Itália próximo de uma encosta a partir da utilização do modelo SIMWE, imagens de satélite, monitoramento dos processos hidrológicos e aplicação do método Teor de Umidade. Tal estudo, dividiu cada área de plantio em setores íngremes (80% da área) e declive (20% da área) para análise do fluxo hidrológico superficial, erosão e deposição. Os autores identificaram linhas preferenciais de fluxos superficiais e sedimentos, os quais estão associadas às danificações dos terraços, alterações na dinâmica hidrológica devido à presença de estradas e tipos de uso que potencialmente podem estar associados às áreas suscetíveis.

Embora não sejam trabalhos atuais, Rodrigues (1982) e Santoro (1991) também identificaram alta intensidade dos escoamentos superficiais e subsuperficiais em locais da região de São Pedro (SP) com registros frequentes de ravinas e voçorocas. Tais setores que estão associados aos maiores valores de fluxos superficiais dados pelo SIMWE coincidem com a presença de Neossolos Quartzarênicos que, hidrologicamente, podem gerar maior saturação em períodos chuvosos e, sobretudo, aumento da capacidade erosiva (YAMANOUTH, 2003; SANTANA, *et al.*, 2007).

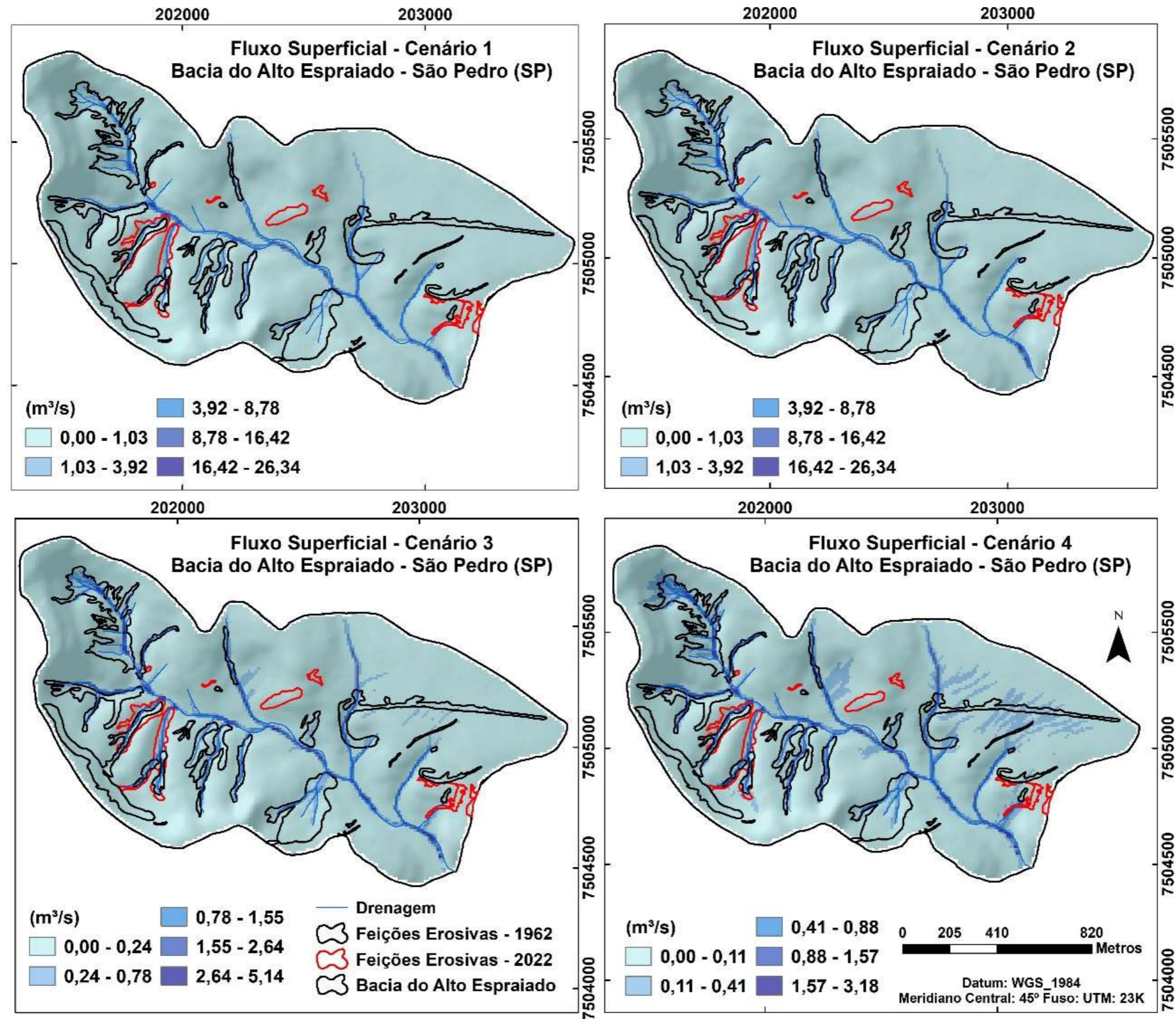


Figura 75: Espacialização do fluxo superficial (m³/s) com as feições erosivas de 1962 (polígono preto) e 2022 (polígono vermelho) sobrepostas para os quatro cenários.

Lin *et al.*, (2017) investigaram os processos de erosão e deposição a partir dos mecanismos de transporte de partículas de solo por escoamento, com experimentos em um canal de 5m de comprimento por 1m de largura constituídos de depósitos coluviais. Os autores identificaram o gradiente de inclinação entre 36 a 84%; o fluxo entre $0,72 \text{ L m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ a $2,88 \text{ L m}^{-2} \text{ min}^{-1}$; aumento da taxa de escoamento e a produção de sedimentos em relação ao tempo. Tal estudo concluiu que o escoamento e o sedimento apresentaram variação quando o canal foi tratado com alta taxa de fluxo, registro de 500 g L^{-1} para a concentração de sedimentos, sendo que a declividade e o escoamento superficial possuem fortes impactos na capacidade de transporte de sedimentos.

A **Figura 76** apresenta os valores máximos registrados nos quatro cenários do fluxo superficial, em que observa uma semelhança entre os cenários 1 e 2, os quais estão associados aos valores da alta taxa de excesso de precipitação (190 mm/h), aos maiores valores da taxa de infiltração (12 mm/h) e da permeabilidade (0.00488 cm/s). Os cenários 3 e 4 também apresentaram semelhança, porém com redução significativa dos registros dos valores máximos, devido à diminuição dos dados inseridos para a taxa de infiltração (4 mm/h), a permeabilidade (0.00024 cm/s) e do aumento da rugosidade do relevo (coeficiente de Manning) para 0.079n.

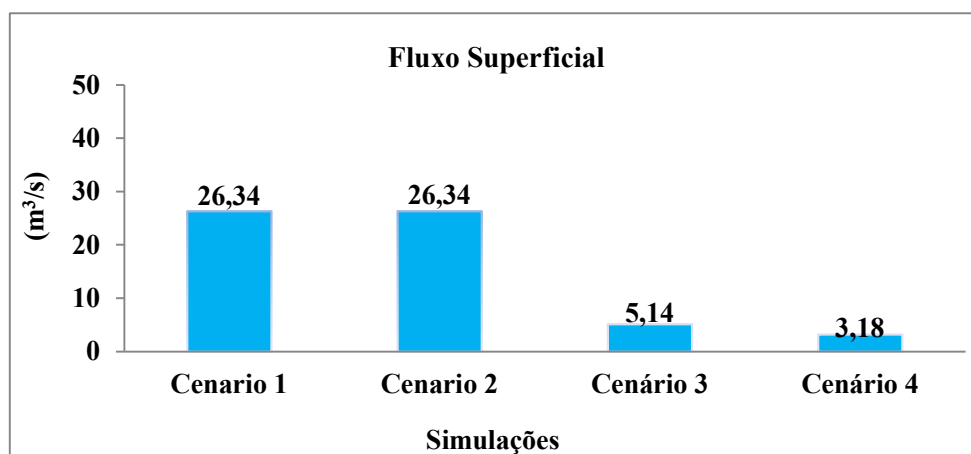


Figura 76: Valores máximos de fluxos superficiais (m^3/s) para os quatro cenários.

A influência da rugosidade e a relação com os processos erosivos tem sido estudada em diversos trabalhos, como por exemplo o estudo de Korzeniowska *et al.*, (2018), em que os autores realizaram um mapeamento de voçorocas a partir de um terreno derivado da Detecção

e Alcance de Lus de alta resolução dos dados (LIDAR), testes de detecção não supervisionada de feições erosivas em grande área com diferentes limiares e algoritmos de rugosidade. Os resultados demonstraram que a curvatura total é uma medida adequada para o reconhecimento de voçorocas e campos de lava, sendo que a representação visual da rugosidade da superfície mostra que os grãos maiores reduziram o contraste de rugosidade local de voçorocas e outras formas de relevo lineares.

ZHANG *et al.*, (2016) reforçam a importância do estudo da rugosidade e a relação com o volume e a velocidade do escoamento, pois devido à complexidade de tal análise, alguns modelos tem negligenciados a rugosidade, visto que, desconsideram a variabilidade espacial da rugosidade e a falha em distinguir fórmulas de rugosidade em diferentes regimes de fluxo superficial.

A correlação das feições erosivas com os fluxos hidrológicos superficiais (**Figura 77**) demonstrou que as classes iniciais em todos os cenários com valores de até $\sim 1 \text{ m}^3/\text{s}$ estão concentradas grande parte das feições erosivas, com registros entre $\sim 67\%$ e $\sim 88\%$. Tais resultados, demonstraram, que a localização das feições erosivas está associada aos valores das classes inferiores dos fluxos superficiais (**Figura 78**), pois no máximo $\sim 18\%$ das feições erosivas estão situadas nos intervalos intermediários ou superiores. Fernandes et al., (2016) a partir do emprego do modelo SIMWE identificaram que parte significativa das feições erosivas estão distribuídas no fluxo superficial entre 10 e 110 cm^3/s , resultado da saturação do solo e dos valores mais baixos da tensão crítica do solo.

Mitasova e Mitas (2001) realizaram um estudo focado na metodologia e aplicações de simulação de três modelos (SIMWE, RUSLED e USLED) para a previsão e solução de processos erosivos causados pelo escoamento superficial. Tal estudo descreve os processos modelados e avalia as diferentes medidas de conservação. Os autores identificaram que embora todos os modelos permitem serem usados para tempestades pontuais, a RUSLE/USPE diferem do SIMWE por modelar apenas os casos limitados de erosão e transporte de sedimentos, visto que, o SIMWE apresentou capacidade de generalizar a ocorrência da erosão nas encostas modeladas, além de incorporar simulações multiescalar e multiprocesso.

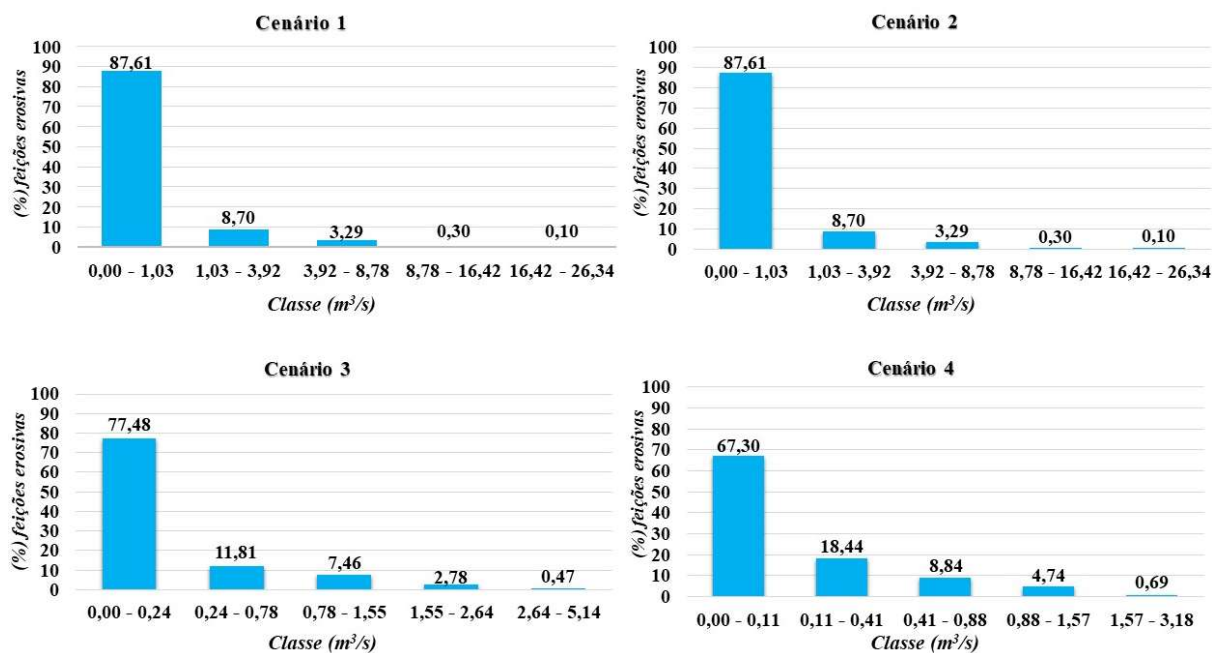


Figura 77: Distribuição e correlação das feições erosivas (1962 e 2022) com as classes de Fluxos Superficiais nos quatro cenários.



Figura 78: Vista a partir do *front* de parte da bacia do alto Espraiado. Nota-se as drenagens perenes (linha azul) e também os fluxos superficiais (linhas tracejadas) em que o modelo SIMWE classificou como áreas suscetíveis (seta em vermelho). Figura sem Escala.

Melo e Santos (2020) realizaram uma análise da produção de sedimentos em relação às características físicas a partir do modelo SWAT na bacia do Paraná/ Brasil. Os autores mensuraram os índices de escoamento superficial (entre 384 - 573 mm/ano) e produção de

sedimentos (entre 16,35 - 31,86 ton/ha), os quais estão associados com a sensibilidade do parâmetro fluxo superficial, dado a influência da declividade e dos volumes pluviométricos.

8.3.2. Profundidade do Fluxo (m)

A **Figura 79** apresenta a distribuição espacial dos valores das classes de profundidade do fluxo. Nota-se que o SIMWE também apresenta as linhas preferenciais e a localização dos maiores valores para todos os cenários, os quais estão situados nas áreas circundantes dos canais perenes (drenagem principal e afluentes) e onde estão localizados grande parte do registro das feições erosivas. Fernandes *et al.* (2015) e Fernandes *et al.* (2017) também relatam a partir do emprego do modelo SIMWE que os processos erosivos estão preferencialmente em áreas onde a profundidade do fluxo assume valores médios e elevados.

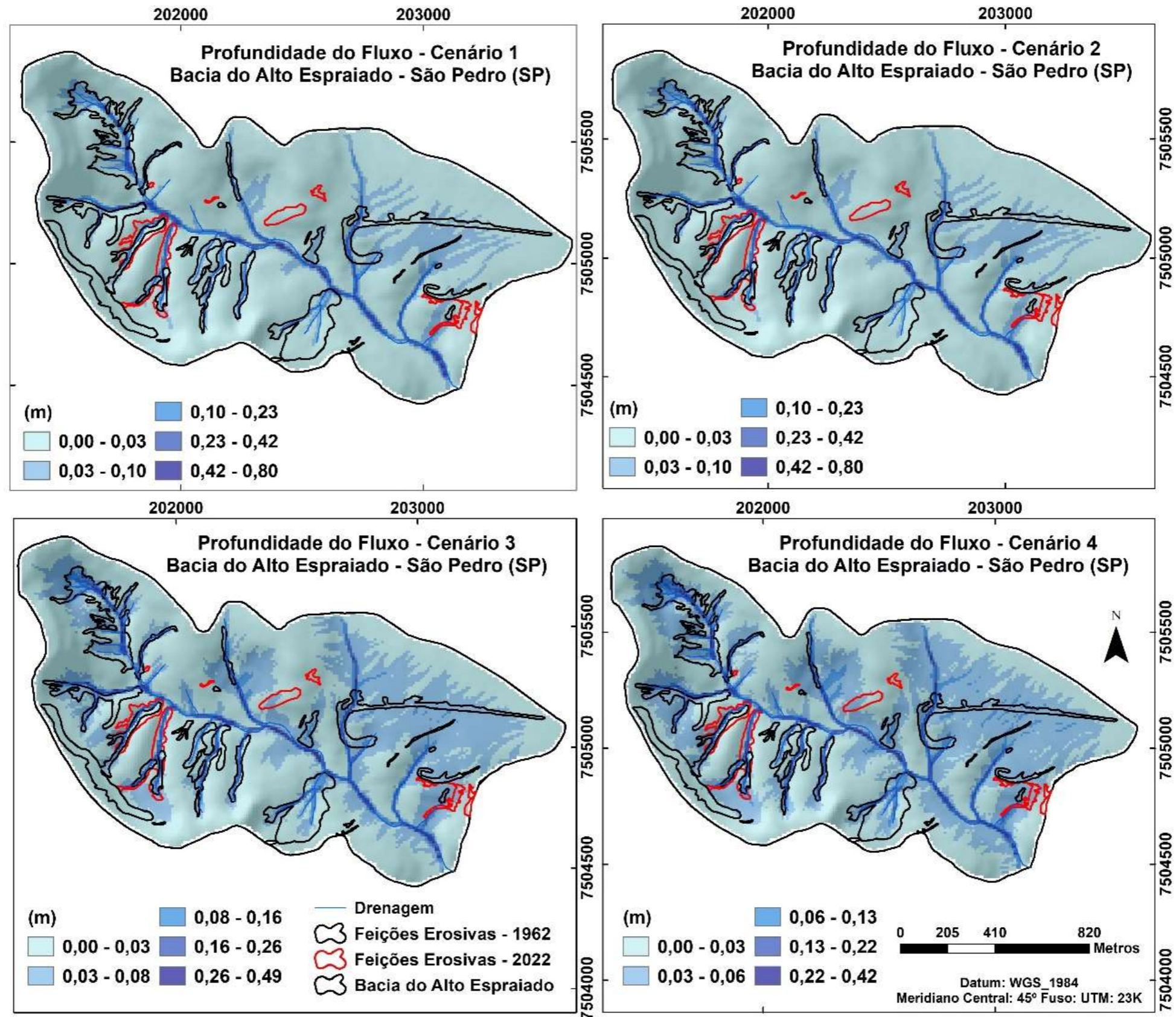


Figura 79: Espacialização da Profundidade do Fluxo (m) com a sobreposição das feições erosivas de 1962 (polígono preto) e 2022 (polígono vermelho) para os quatro cenários.

A **Figura 80** apresenta os valores máximos registrados (< 1m) nos cenários simulados em relação à profundidade do fluxo, com destaque para o último cenário que possivelmente está associado ao emprego de valores nulos (0) para os parâmetros do módulo fluxo de sedimentos, além do coeficiente de Manning e, portanto, influenciaram para o menor registro em todos os quatros cenários.

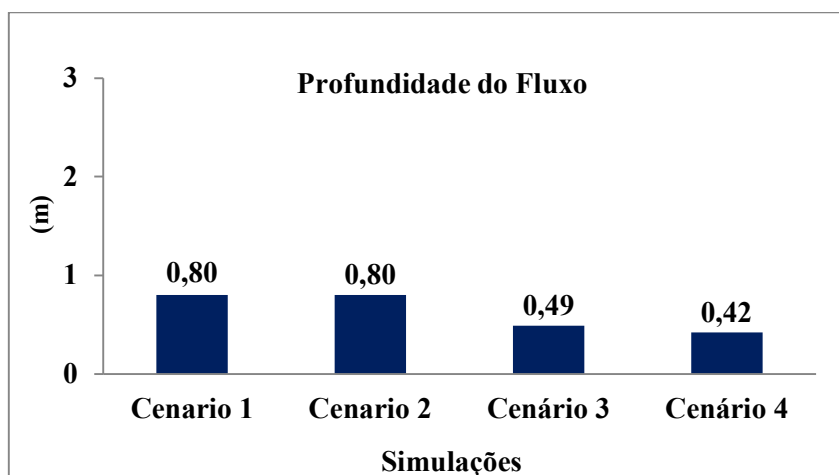


Figura 80: Registro dos valores máximos de profundidade do fluxo para os quatros cenários.

A correlação das feições erosivas com a profundidade do fluxo superficial (**Figura 81**) demonstrou que as classes iniciais em todos os cenários com valores de até 0,10m estão concentradas grande parte das feições erosivas, entre ~72% a 86%, sendo que entre 14% a 28% das feições erosivas estão localizadas nos intervalos intermediários ou superiores entre 0,10m a 0,80m. Neste sentido os setores de maiores suscetibilidades erosivas (localização de grande parte das feições erosivas) é menor a profundidade do fluxo superficial, que pode estar associado a presença do Neossolo Quartzarênico, profundo, com alta capacidade de infiltração, além da presença de materiais retrabalhados e curvatura côncava. Tais observações provavelmente indicam circulação das águas de subsuperfície, maior possibilidade de geração de *piping*, regressão das paredes de voçorocas e a dinamização dos processos erosivos.

Mathias *et al.* (2018) avaliaram a distribuição das taxas de infiltração em áreas afetadas por processos erosivos acelerados e recobertos por material tecnogênico. Os autores realizaram ensaios de infiltração ajustados à função de Horton e ao coeficiente de correlação de Pearson em 30 pontos distribuídos pela área. Tal estudo identificou nos setores tecnogênicos maior taxa

de infiltração e alta concentração de areia fina, corroborado pelo coeficiente de correlação (r) de 0,94. O trabalho conclui que há grande correlação entre a granulometria e a infiltração, como também a morfologia da área, pois as formas topográficas tecnogênicas (ex: terraços) contribuem no condicionamento da infiltração e reduzem o fluxo superficial, com duplo caráter: positivo, no sentido de quebrar a energia das águas de escoamento superficial; negativo, por estimular o *piping* por meio da infiltração em subsuperfície.

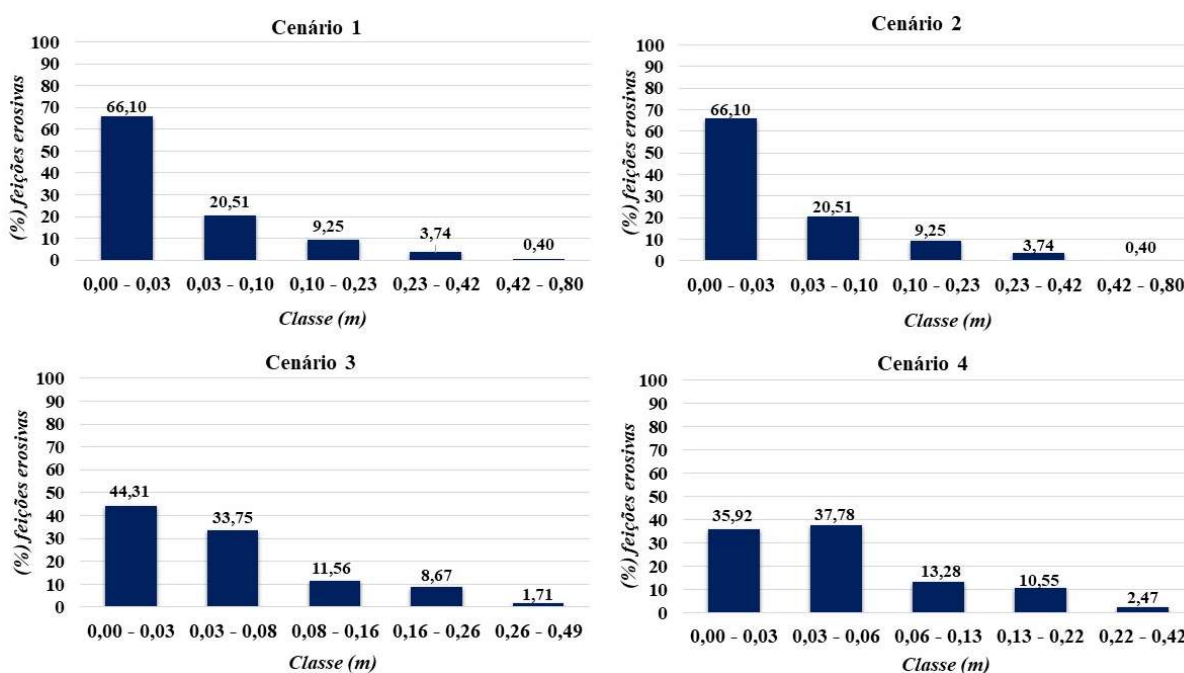


Figura 81: Distribuição e correlação das feições erosivas (1962 e 2022) com as classes de Profundidade de Fluxo (m) para os quatro cenários.

8.3.3 Concentração de sedimentos (partículas/m³)

A **Figura 82** apresenta a distribuição espacial das classes de concentração de sedimentos gerados pelo SIMWE sobreposta pelas feições erosivas, nota-se que os maiores valores de cada classe se situam em áreas próximas dos canais perenes (drenagem principal e afluentes), justamente onde se localizam a maior parte das feições erosivas. Portanto, o aumento da concentração de sedimentos está relacionado com o aumento das feições erosivas. Warren (1998) também identificou a partir de um estudo com aplicação de três modelos (USPED, CASC2D e SIMWE) a suscetibilidade erosiva em encostas convergentes e, sobretudo, a concentração de sedimentos.

Leguédois e Bissonnais (2004) analisaram as relações entre a dinâmica temporal da distribuição do tamanho dos agregados e as características da erosão com a concentração de sedimentos e a taxa de escoamento. Os autores realizaram experimentos, simulações de chuva e teste de estabilidade de agregados em solo franco-argiloso e franco-silte mais suscetível a erosão e também com maior concentração de sedimentos, com cerca de seis vezes maior que o primeiro grupo de solo.

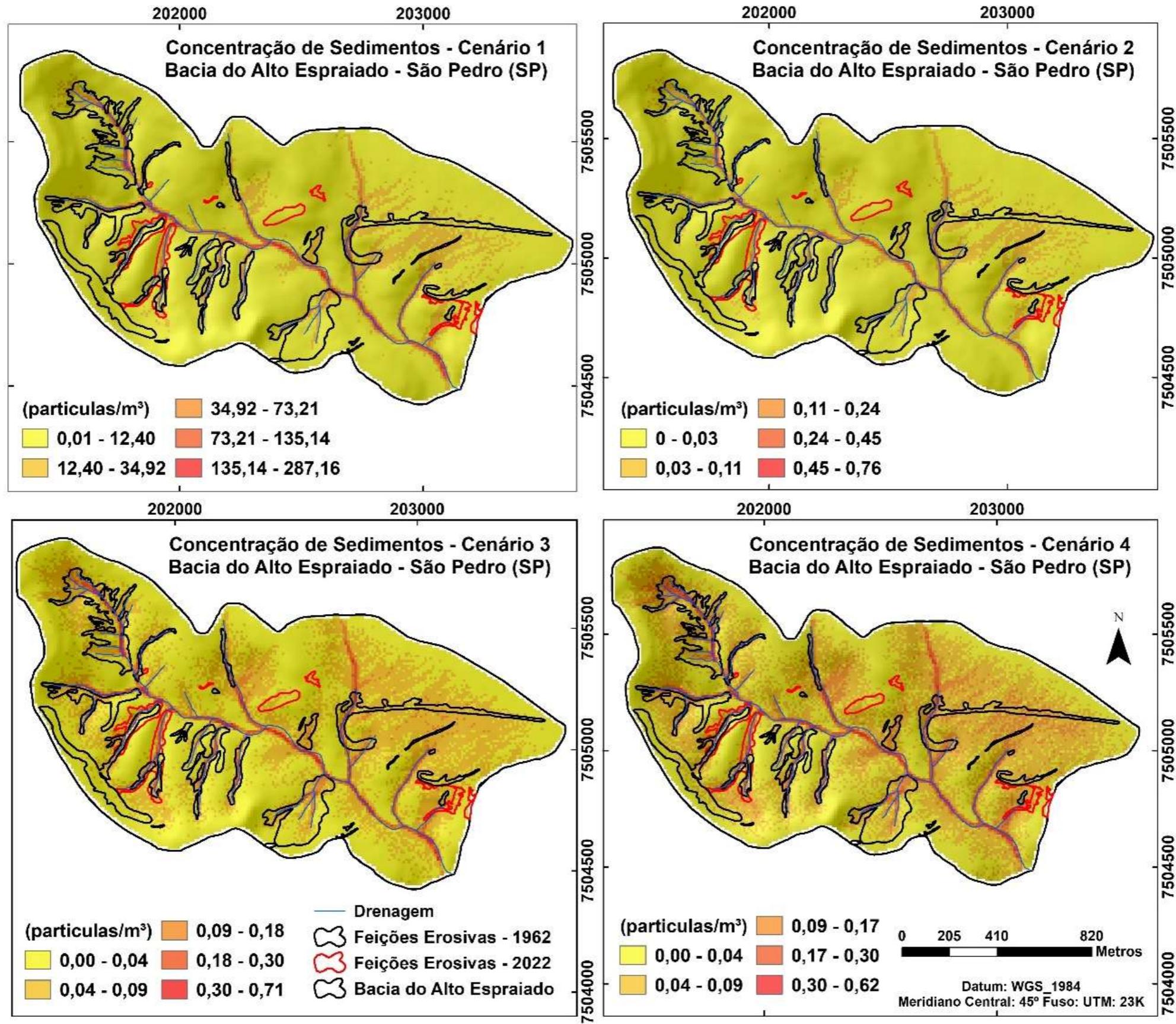


Figura 82: Espacialização da Concentração de Sedimentos (partículas/m³) com a sobreposição das feições erosivas de 1962 (polígono preto) e 2022 (polígono vermelho) para os quatro cenários.

A **Figura 83** apresenta os dados máximos registrados para os quatro cenários de concentração de sedimentos, com valores variados e destaque para o cenário 1 que apresentou o maior registro, que pode estar associado ao elevado dado de entrada para os parâmetros coeficiente da capacidade de desprendimento (0.7 s/m) e transporte de sedimentos (0.6 s).

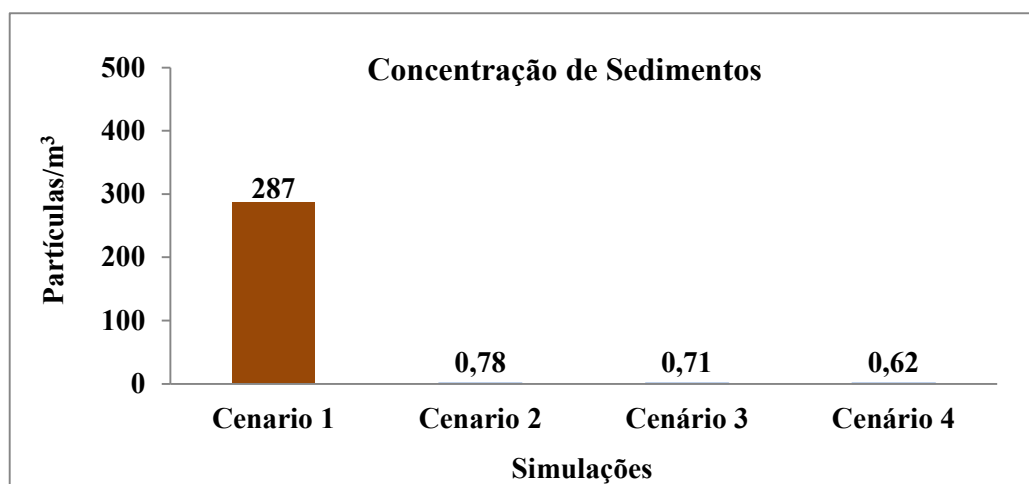


Figura 83: Valores máximos de concentração de sedimentos para os quatro cenários.

A correlação das feições erosivas com a concentração de sedimentos (**Figura 84**) demonstrou que no cenário 1 a classe (0,01 a 12 partículas/m³) registrou a localização da maior parte das feições com ~ 66%. Nos cenários 2 (0 a 0,03 partículas/m³) e 3 (0 a 0,04 partículas/m³) estão situadas respectivamente ~ 68% e ~ 41% das feições erosivas e, por fim, no cenário 4 cerca de ~ 38% das feições erosivas estão localizadas na classe 0,04 a 0,09 partículas/m³.

Guardada as devidas proporções de valores de concentração de sedimentos de cada cenário, as feições erosivas estão situadas nas classes iniciais em todos os cenários, sobretudo, setores que registraram os menores valores de concentração de sedimentos. Fernandes (2014) e Fernandes *et al.*, (2015) a partir do emprego do SIMWE identificaram que 70% das ravinas mapeadas e 46% dos sulcos erosivos registrados estão situados na classe 0,007 - 0,38 (partículas/m³), setores classificados como médio e elevada concentração de sedimentos.

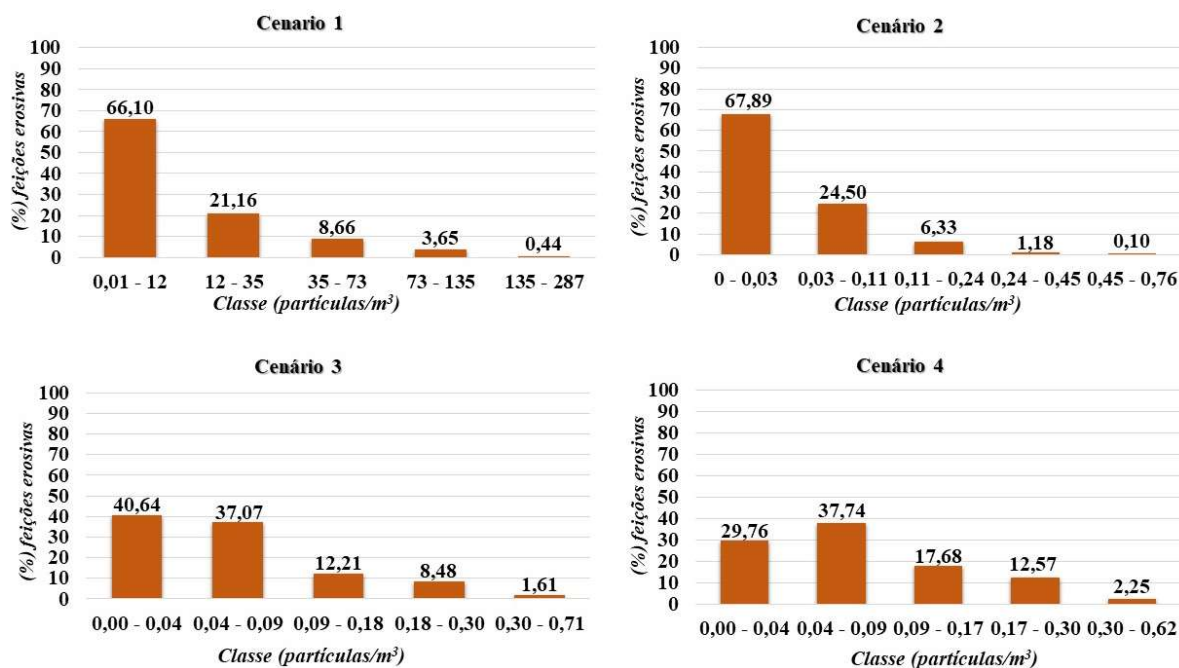


Figura 84: Distribuição e correlação das feições erosivas com as classes de concentração de sedimentos (particulas/m³) nos quatro cenários.

8.3.4. Fluxo de Sedimentos (kg/m.s)

A **Figura 85** apresenta a distribuição espacial das classes de fluxo de sedimentos, nota-se que os maiores dados fornecidos pelo SIMWE formam linhas preferenciais em todos os cenários e próximos dos canais perenes (drenagem principal e afluentes) e com volume de feições erosivas. O cenário 1 apresentou registros bem elevados para todas as classes de fluxo de sedimentos, sendo as iniciais entre ~ 33 e ~ 930 kg/m.s. Tal situação, pode estar relacionada a maior área modelada e identificada como suscetível pelo SIMWE e também aos dados de entrada de tal cenário, exemplificada pela taxa excedente de precipitação de 190mm/h, de 12 mm/h para taxa de infiltração, 0,7 s/m para o coeficiente da capacidade de desprendimento e 0,6 kg/m.s para o coeficiente da capacidade de transporte, além do valor nulo para a tensão de cisalhamento.

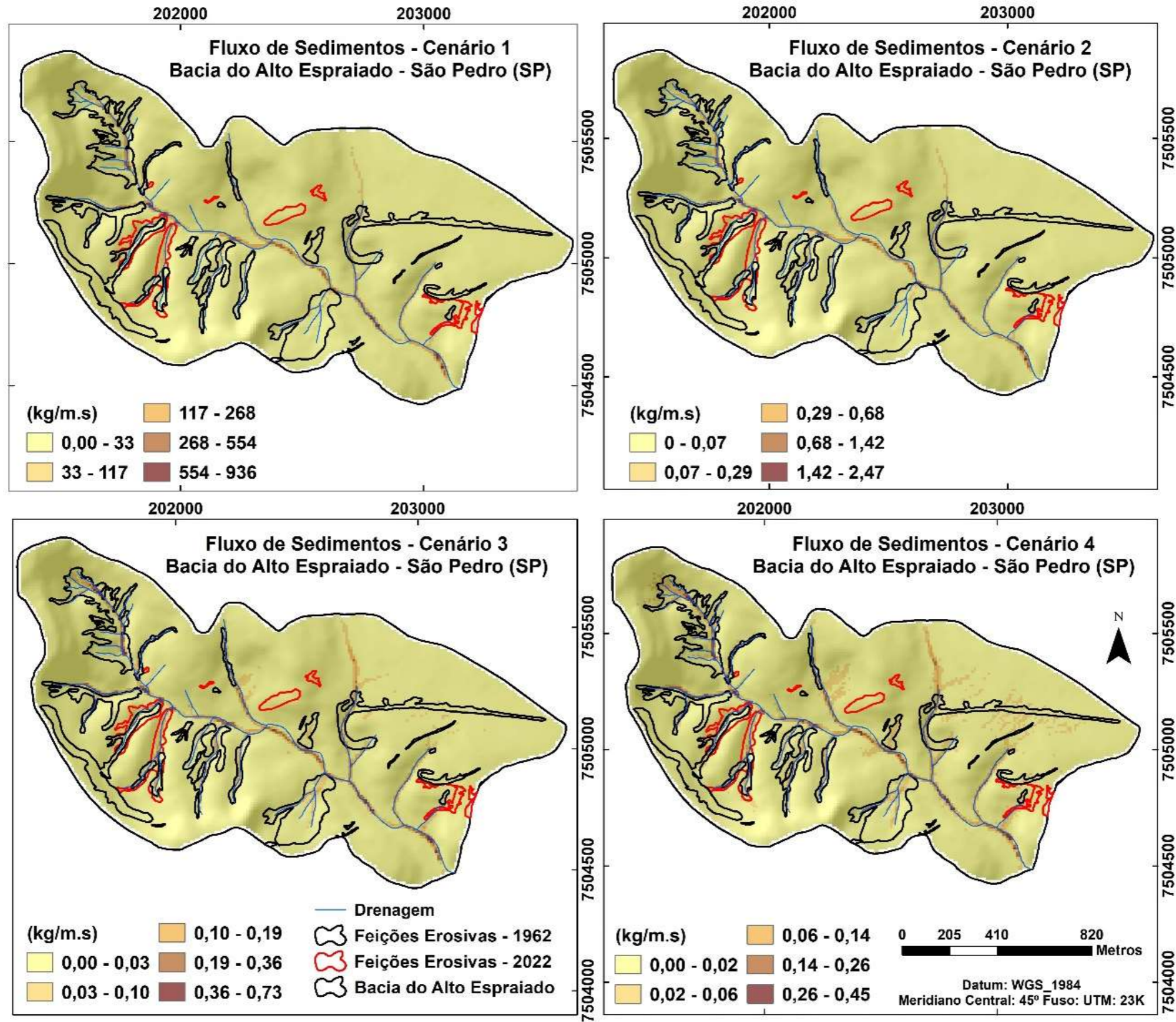


Figura 85: Espacialização do fluxo de sedimentos (kg/m.s) com a sobreposição das feições erosivas de 1962 (polígono preto) e 2022 (polígono vermelho) nos quatro cenários.

Steinmann *et al.*, (2020) relatam os primeiros resultados de uma pesquisa no Planeta Marte em que mostrou a reconstrução dos processos em locais pouco visíveis nas imagens DTM, CTX ou HIRISE a partir de dados da tensão de cisalhamento, de transporte de sedimentos, do MDE, precipitação de 15 mm/15 min, além de valores baseados no planeta Terra como o transporte limitado de erosão e deposição entre $0,0180 \text{ kg/ m}^2\text{s}$ e $-0,0166 \text{ kg/ m}^2\text{s}$. Os resultados alcançados até o momento são as identificações de sedimentos, erosão e deposição a partir de registros dos valores positivos (erosão) e negativos (deposição).

Theule *et al.* (2015) explicam que os fluxos de sedimentos são conhecidos por aumentar o volume do efeito da erosão do canal, os quais são contribuídos pela profundidade do leito e a declividade. Tal estudo analisou seções transversais no período entre 2009 e 2012 nos alpes franceses para a previsão de erosão. Os autores identificaram que o limite de transporte e deposição de sedimentos estão associados com a redução da espessura do leito a montante, da rugosidade e da declividade.

Dornellas *et al.* (2017) realizaram estudos sobre as perdas de solo e as áreas mais suscetíveis à erosão na bacia do Alto rio Paraíba/PB, por meio da utilização da USLE e da álgebra de mapas. Tal estudo, identificou que as estimativas de perda de solo predominaram entre baixa a moderada (0 - 120 t/ha.ano), compatíveis para ambiente semiárido, sendo a variável “uso e cobertura” considerado a mais importante para os cálculos realizados. Eekhout *et al.* (2018) empregaram numa determinada bacia do sudeste da Espanha o modelo de erosão de Morgan-Finney associado a um modelo hidrológico diário, com representações dos fluxos hidrológicos e de sedimentos, vegetação, deposição de sedimentos, além da execução em tempo diário. Os autores relatam a capacidade do modelo em avaliar os impactos das mudanças ambientais causadas pela erosão do solo e a produção de sedimentos em grandes escalas espaciais, principalmente com variações intra e interanuais no clima, gestão da terra e desenvolvimento da vegetação.

A **Figura 86** apresenta os valores máximos registrados de fluxos de sedimentos pelo SIMWE para os quatro cenários, destaque para o cenário 1 que registrou o maior valor, situação provavelmente justificada pelo elevado dado de entrada para os parâmetros coeficiente da capacidade de desprendimento (0.7 s/m) e coeficiente da capacidade de transporte de sedimentos (0.6 s). Lense *et al.*, (2022) estimaram a perda de solo causada pela erosão hídrica na bacia do rio Tietê/SP a partir do emprego da RUSLE e de técnicas de geoprocessamento, tal

estudo identificou que o transporte de sedimentos aproximado foi de $1,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto a sedimentação $0,8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, com o diagnóstico de altas taxas de erosão em 18% do território, zonas prioritárias para ações de conservação e redução da erosão hídrica.

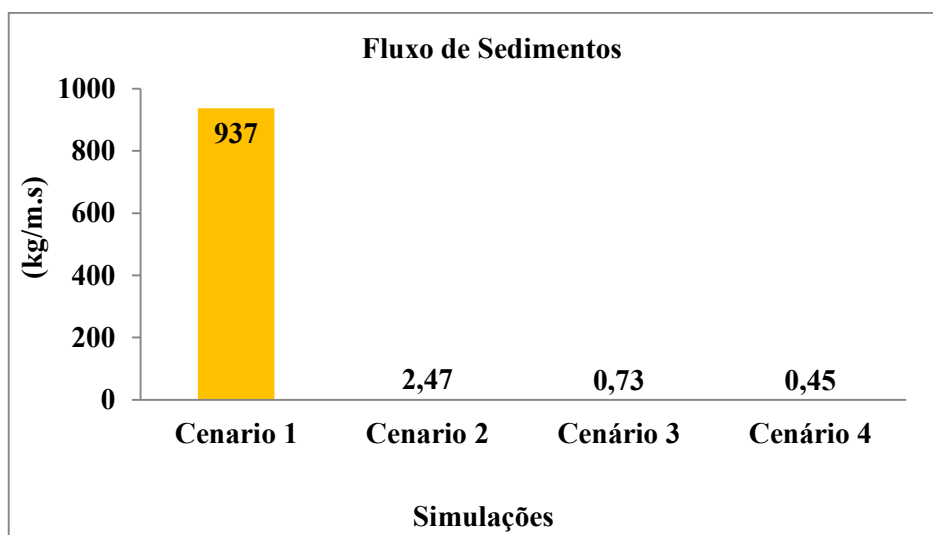


Figura 86: Valores máximos de fluxo de sedimentos obtidos para os quatro cenários.

Piga (2017) realizou um estudo no município de São Pedro (SP) com o emprego dos modelos SWAT e RUSLE e também dados de solo e pluviométricos. Tal autor identificou que o escoamento superficial foi determinante na produção de sedimentos, com as maiores perdas de solo em torno de $37,3 \text{ t/ha/ano}$ na bacia ribeirão do Meio e $38,7 \text{ t/ha/ano}$ na bacia do Samambaia, os quais estão aliados a setores de alta declividade, presença do Neossolo Litólico e uso relacionados a cana-de-açúcar e pastagem.

Almeida *et al.*, (2019) realizaram uma avaliação da produção de sedimentos a partir da infiltração e do escoamento superficial sob chuva simuladas com erosividades semelhantes, mas com distintas combinações de intensidade e duração da precipitação em Seropédica/RJ. Este estudo utilizou programas computacionais e os seguintes dados de chuva e tempo: (1) 60 mm h^{-1} e 60 min; (2) $44,5 \text{ mm h}^{-1}$ e 106 min; (3) $53,5 \text{ mm h}^{-1}$ e 78 min; (4) $66,9 \text{ mm h}^{-1}$ e 48 min e (5) $76,5 \text{ mm h}^{-1}$ e 38min com a variação da produção de sedimentos entre 2,17 e $6,11 \text{ g.m}^{-2}$, assim como as taxas de infiltração (mm h^{-1}): 21,6; 37,7; 31,4; 29,5 e 22,4. Os mesmos autores concluíram que as diferentes combinações alteraram a produção de sedimentos, mas não influenciaram significativamente o escoamento superficial e a infiltração da água no solo.

Santos *et al.*, (2018) realizaram um trabalho de prevenção e controle de processos em uma bacia experimental do Iguatu/CE com vegetação de caatinga. O estudo considerou e avaliou as seguintes variáveis: precipitação, intensidade de chuva, umidade do solo, pico de fluxo, profundidade do escoamento e produção de sedimentos entre 2009 a 2014. Os resultados da análise dos 263 eventos de chuva (> 2 mm) e outros 86 que geraram registro de escoamento, demonstraram correlação entre o rendimento de sedimento, a profundidade do escoamento e o fluxo de massa. Embora seja um trabalho antigo, o estudo de Hadley *et al.*, (1985) relatam o cálculo da carga sedimentar a partir de 256 estações situada numa ampla gama de condições climáticas, tais autores identificaram a variação do coeficiente entre 20% e 214% associada a precipitação média anual entre 200 a 1300 (mm), com variabilidade média de 70%.

A correlação dos fluxos de sedimentos com as feições erosivas (**Figura 87**) demonstrou que as mesmas (entre ~ 71% e ~ 88%) estão situadas nas classes com os menores valores de fluxos em todos os cenários. Neste sentido, os setores que apresentaram suscetibilidade erosiva registraram baixa intensidade do fluxo de sedimentos, destaca-se a semelhança de valores muito baixo (0 a 0,7 kg/m.s) nos cenários 2, 3 e 4, exceto o cenário 1 que registrou valores entre 0 e 33 kg/m.s. Fernandes *et al.*, (2016) e Fernandes *et al* (2017) em estudos a partir do emprego do modelo SIMWE, também realizaram a correlação das feições erosivas com as classes de fluxos de sedimentos, os autores identificaram que ~ 88% das feições erosivas estão associadas às classes média e alta dos fluxos de sedimentos (0.013 – 0.33 kg/m.s), setores como o leito (talvegue) da bacia, que pode estar associado aos baixos valores de infiltração e, portanto, altas classes dos fluxos superficiais e, cerca de ~ 12% das feições erosivas nas classes reduzidas ou muito altas.

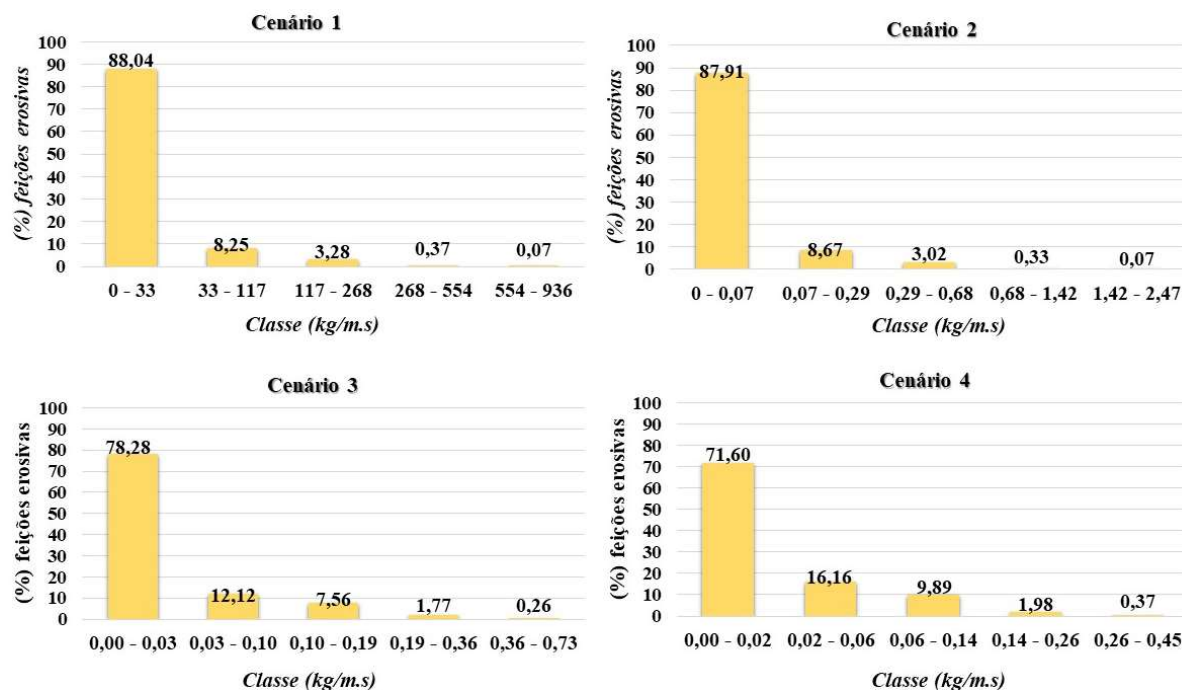


Figura 87: Distribuição e correlação das feições erosivas com as classes de Fluxo de Sedimentos para os quatro cenários.

8.4 Validação do Modelo SIMWE / Cenários

A correlação (distribuição) das feições erosivas com as classes de erosão e deposição demonstrou que o cenário 1 obteve o melhor resultado, pois cerca de ~ 40% das feições erosivas estão nas classes de valores positivos (erosão) indicadas como suscetíveis pelo modelo SIMWE e ~ 60% estão nas classes que registraram valores negativos (deposição). Os demais cenários obtiveram resultados inferiores, uma vez que as feições erosivas registraram entre ~ 31% e ~ 35% nas classes de valores positivos (erosão) e o restante, ~ 65% e ~ 69% nas classes de deposição. No entanto, Fernandes *et al.* (2015) também a partir do emprego do SIMWE e análise numa determinada bacia com atividades agrícolas (construção de patamares e terraços) e solo exposto, registraram 61,8% das feições erosivas nos setores identificados como suscetíveis à erosão e 38,2% nas áreas classificadas como deposição.

A aplicação do Potencial de Erosão (PE) (**Figura 88**) revelou que o cenário 1 obteve valores que variou entre ~8,50% e ~17%, menor resultado entre os quatro cenários analisados, situação que pode estar associado à menor suscetibilidade de ocorrência de novas feições erosivas. O cenário 2 registrou PE maior que o cenário 1, entre ~ 9,80% e ~ 28%, portanto,

maior é a suscetibilidade à ocorrência de novas feições erosivas. Os cenários 3 e 4 apresentaram situações semelhantes ao cenário 2, com valores de PE que oscilaram entre ~ 9,50% e 28,50%, embora ambos os cenários tenham registrado valores distintos de erosão.

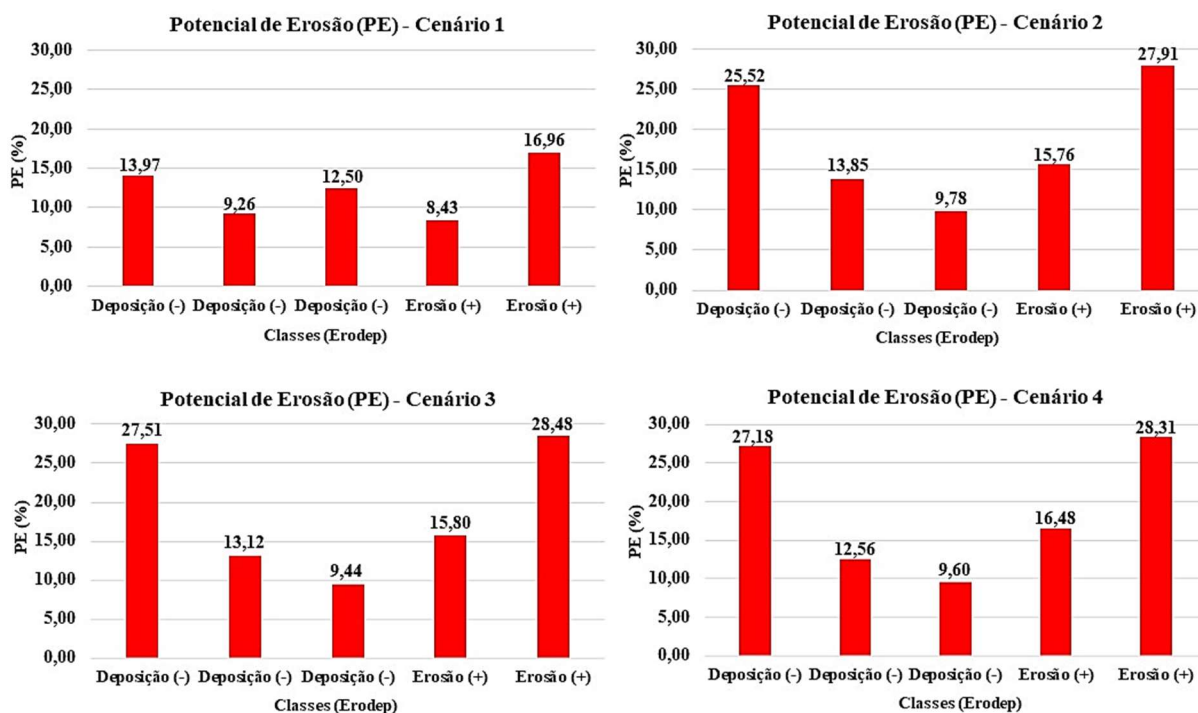


Figura 88: Potencial de Erosão de acordo com as classes do balanço da erosão e deposição nos quatro cenários.

Portanto, em todos os cenários, a maioria das feições erosivas está situada em setores identificados pelo modelo com valores negativos (deposição). Porém a partir das validações de campo verificou a ocorrência de processos erosivos, os quais estão relacionados com alguns fatores não identificados pelo SIMWE tais como: a presença de canais intermitentes, ao mapeamento de feições numa perspectiva histórica e, sobretudo, destaca-se a dinâmica do uso do solo (solo exposto, pastagem, aterramento para implementação de loteamentos, silvicultura, reflorestamento e terraços).

Neste contexto, tais resultados também podem estar relacionados ao desafio de trabalhar com paisagens complexas (**Figura 89**), à dificuldade de calibrar com precisão e elucidar a influência das propriedades naturais, tipos de solos e o uso na dinâmica erosiva e deposicional. Ressalta-se que o SIMWE, conforme Mitas e Mitasova (1998), foi projetado para

simular a erosão, o transporte e a deposição por fluxo superficial e detém a capacidade de estimar a erosão do solo distribuída em áreas com topografia variadas / paisagens complexas.

Warren (1998) reforça a importância e a capacidade do SIMWE para aplicação em paisagens complexas. O autor realizou um estudo com três modelos CASC2D, USPED e o SIMWE em áreas de instalações militares, as quais ocupam terrenos mais complexos do que as regiões agrícolas. Foram realizadas diversas simulações com auxílio do MDE (resolução 10m), dados de chuva, solo e análise das implicações do manejo numa área experimental da Alemanha. Os resultados gerados, demonstraram que o modelo SIMWE identificou os setores mais suscetíveis. Portanto, potencial para quantificar a perda de solo e sedimentos nos canais efêmeros, capacidade de simular o fluxo de água e sedimentos em paisagens complexas, além dos parâmetros mais sensíveis contribuirão para a identificação das áreas suscetíveis.



Figura 89: Vista parcial da Bacia do Alto Espreado com os apontamentos dos diferentes usos do solo e registro de processos erosivos. No lado esquerdo superior consta o mapa (sem escala) com o ponto de localização deste setor da bacia.

Em contrapartida, Fernandes *et al.* (2017), explicam que o modelo SIMWE não foi robusto o suficiente quando aplicado em terraços agrícolas, mas que pode ser melhorado com maior precisão do MDE. Tal estudo identificou que as feições erosivas foram comprometidas por este fator e também outras atividades antrópicas como construções, presença ou não de

vegetação, os quais influenciaram no comprimento e inclinação dos fluxos e áreas de contribuição. Os autores aplicaram a Curva ROC (*Receiver Operating Characteristics*) e obtiveram 0,62, valor que caracteriza como ajuste moderado a alto para a validação de tal modelo e o inventário das feições.

Jetten *et al.*, (2003) explicam a dificuldade associada à calibração dos modelos de erosão do solo, devido a grande variabilidade espacial e temporal de tal fenômeno, assim como as incertezas geradas pelos valores dos parâmetros de entrada utilizados nos modelos. Os autores enfatizam que a solução está na utilização de mais informações para calibração e validação do modelo e não utilizar outros modelos mais completos e complexos. Pois, Dymond e Vale (2018), relatam que tais avanços na identificação de informações têm exigido modelos mais dinâmicos que refletem as alterações geomorfológicas, uma vez que as alterações das formas devem ser consideradas durante a simulação.

Embora não seja um trabalho com o SIMWE, Pinto (2014) em um estudo sobre o escoamento superficial, responsável direto pela produção de sedimentos por erosão dos solos, relata a dificuldade e a limitação do SWAT para pequenas bacias. Tal autor explica a dificuldade de calibrar os parâmetros associados a infiltração e a vazão, mas que após a calibração obteve resultados satisfatórios.

Existem inúmeros trabalhos que valorizam a resolução espacial de alto detalhe para identificar feições do relevo, principalmente em paisagens complexas, fator que provavelmente é essencial para a aplicação de qualquer modelo matemático. Neste sentido, algumas feições já exemplificadas e não identificadas pelo modelo SIMWE na área de estudo podem ser justificadas pela resolução espacial de 10m adotada neste presente estudo. Embora seja uma área selecionada com diversos trabalhos já realizados, ainda existe uma carência específica nesta questão, como também a dificuldade do acesso a materiais gratuitos de alta resolução que é um problema em grande parte do território brasileiro.

Tarolli *et al.*, (2019) estudaram a eficácia da topografia de alta resolução a fim de melhor compreender os processos associados aos sistemas de cultivo numa determinada bacia da Itália. Tal estudo utilizou MDE de alta resolução (2 cm), técnica fotogramétrica *Structure from Motion* (SfM) em solo franco-argiloso e cálculo de parâmetros morfométricos. Os autores explicam que a topografia em grande detalhe possibilitou a identificação de declives, curvaturas

e sedimentos, caminhos de fluxo irregulares e maior potencial de armazenamento de água associado às concavidades da superfície.

Grohmann *et al.*, (2011) reforçam a importância do MDE de alta resolução aliado às técnicas como desvio padrão, inclinação e curvatura para análise e identificação da rugosidade do relevo, as quais estão associadas a ruptura topográfica e áreas planas. Koco (2011) explica que a capacidade do SIMWE em identificar setores com potencial formação de ravinas consiste nos dados de entrada topográficos, mais precisamente nos valores das mudanças de elevação, os quais contribuem para identificar a acumulação e a deposição de materiais. Derose *et al.*, (1998) a partir das diferenças de elevação de área e superfície do solo obtidas por MDE numa perspectiva histórica (1939 - 1958), conseguiram observar a dinâmica das feições erosivas (profundidade e área) e também o fluxo de sedimentos desprendidos.

A **Tabela 16** apresenta trabalhos que empregaram o modelo SIMWE e as respectivas resoluções espaciais utilizadas para o desenvolvimento dos estudos, que de forma geral ressaltam a importância do alto detalhe para a simulação e a identificação dos processos na distribuição espacial de paisagens complexas, os quais conseguiram registrar feições de pequena dimensão.

Tabela 16: Exemplos de trabalhos e as respectivas resoluções espaciais realizadas com o emprego do modelo SIMWE, os quais estão organizados em ordem cronológica.

FONTE	Resolução	FONTE	Resolução
Mitasova <i>et al.</i> , (1996)	2m	Fernandes <i>et al.</i> , (2017)	1m
Mitas e Mitasova (1998)	2m	Lozbenev <i>et al.</i> , (2019)	2,5 m
Warren (1998)	10m	Pijl <i>et al.</i> , (2020)	0,20 m / 20 cm
Mitasova <i>et al.</i> , (2001)	2 m	Steinmann <i>et al.</i> , (2020)	-----
Mitasova <i>et al.</i> , (2004)	1 m	Lozbenev <i>et al.</i> , (2021)	2,5m
Koco (2011)	1 m	Pijl <i>et al.</i> , (2021)	0,20m / 20 cm
Mitasova <i>et al.</i> , (2013)	10 m	Pijl <i>et al.</i> , (2022)	1 m
Fernandes (2014)	1 m	Straffeline <i>et al.</i> , (2022)	0,05m
Fernandes (2015)	1 m	Hofierka e Knutova (2015)	10 m
Daniel (2023)	10 m		

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego da modelagem matemática em terrenos complexos para o estudo dos processos erosivos e deposicionais, exige uma série de fatores para que os resultados sejam satisfatórios. Desde a oferta de dados para os parâmetros de entrada, superar a dificuldade para calibrar com precisão, elucidar a influência das propriedades naturais até a capacidade da ferramenta para tal proposta, portanto, os resultados apresentados estão relacionados ao desafio de trabalhar em tal contexto.

Embora a área selecionada seja rica em estudos já realizados, ressalta-se a dificuldade do levantamento de dados para alimentar os parâmetros de entrada do SIMWE, pois os trabalhos a partir da modelagem matemática e dos aspectos solicitados são bastantes escassos, assim como o pequeno número de publicações disponíveis na literatura independente de qualquer área que tenham aplicado o SIMWE para análise dos processos erosivos e deposicionais.

O mapa de Balanço de Erosão e Deposição não teve como objetivo a classificação das feições ou processos erosivos, mas a identificação dos setores mais suscetíveis à ocorrência de tais processos, como também a quantificação da erosão e deposição e, conseqüentemente, a relação de ambos. Deste modo, devido à natureza hidrológica do modelo, a simulação foi realizada em função das relações hídricas de precipitação, escoamento e infiltração, o que resulta o registro dos maiores valores em áreas onde o escoamento é elevado, situados nas proximidades dos canais e nascentes, uma vez que os materiais são desprendidos com maior facilidade.

As simulações estudadas apresentaram registros numéricos distintos de erosão e deposição, mas com semelhança na distribuição espacial. O Cenário 1 apresentou o maior valor de erosão $\sim 81.000 \text{ kg/m}^2\text{s}$, provavelmente relacionado aos valores máximos da taxa de infiltração (12 mm/h), do excesso de precipitação (190 mm/h), ao valor de $0.35n$ para o coeficiente de Manning (típico de solo exposto ou solos arenosos), aos maiores valores atribuídos para o coeficiente da capacidade de desprendimento 0.7 (s/m) e o coeficiente da capacidade de transporte de sedimentos (0.6 s), além do valor nulo atribuído para a tensão de cisalhamento do solo. Neste sentido, a maior presença da força cisalhante dos fluxos hidrológicos, permitiu um aumento da dimensão da erosão, pois a água com maior carga de

sedimentos em suspensão tem menor potência para transportar sedimentos e força inferior para aumentar a magnitude das taxas de erosão.

O Cenário 2, que registrou $\sim 22.000 \text{ kg/m}^2\text{s}$, uma redução significativa dos valores de erosão em comparação ao cenário anterior. Provavelmente, resultado da influência do maior valor da tensão de cisalhamento (0.5pa), da coesão (resistência) do solo (0.5pa) ser maior que a tensão do fluxo de água, além da redução dos valores do coeficiente da capacidade de desprendimento (0.001 s/m) e do coeficiente da capacidade de transporte de sedimentos (0.001s), que interferiram na redução do desprendimento do solo e na extensão espacial da erosão.

Os cenários 3 e 4 apresentaram situações semelhantes em comparação à distribuição espacial das classes de erosão e deposição do Cenário 2, embora os mesmos tenham registrados valores distintos de erosão, $\sim 17.000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $\sim 11.500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ respectivamente. Talvez o resultado do Cenário 3 esteja vinculado à influência com o aumento do valor do coeficiente de Manning ($0,79n$) que representam as condições de pastagens, valores nulos para os parâmetros do módulo fluxo de sedimentos e a redução da taxa de infiltração (4 mm/h) e permeabilidade (0.00028 cm/s). Em relação ao resultado do Cenário 4 e o registro do menor valor de erosão, possivelmente tem relação com a redução para o valor nulo (0) do coeficiente de Manning, pois os dados de entrada dos demais parâmetros são os mesmos do Cenário 3.

De forma geral, a sensibilidade identificada dos parâmetros estão relacionadas ao emprego do menor valor (nulo = 0 pa) para a força cisalhante, a entrada do valor da capacidade de desprendimento para 0.001 s/m e do transporte de sedimentos para 0.001 s , do valor intermediário $0.035n$ associado a solos arenosos para o coeficiente de Manning e o valor nulo ou 0.5pa para a tensão de cisalhamento, os quais reduziram a área e os valores relacionado à erosão e aumentaram a deposição, mesmo com a alta taxa de excedente de precipitação 190mm/h constante em todos os cenários.

Parte significativa das áreas suscetíveis (valores positivos) que registraram processos de erosão estão localizadas em áreas circundantes do canal principal, dos afluentes e também das drenagens intermitentes, principalmente na média e baixa encosta, em setores côncavos, declividade entre 10% e 40% , constituídos por Neossolos Litólicos e Quartzarênicos, os quais estão representados espacialmente pelo SIMWE a partir de “linhas preferenciais, rotas ou caminhos” dos fluxos superficiais e de sedimentos. Resultados que justificaram a capacidade

do SIMWE em representar espacialmente os setores mais suscetíveis à erosão e principalmente a importância da topografia para o emprego do modelo SIMWE, pois além de ser um parâmetro obrigatório para a sua operacionalização, consiste a partir do MDE os aspectos morfométricos, como também as derivadas parciais (dx e dy) e do campo de elevação (m/m) utilizados para as simulações dos padrões de fluxos.

O trabalho de campo demonstrou que alguns fatores (ex: canais intermitentes, dinâmica do uso do solo) não foram identificados pelo SIMWE e, que, possivelmente interferiram na identificação das áreas suscetíveis associadas às ocorrências dos processos erosivos. Tais observações são frutos de a validação das feições erosivas serem realizadas a partir de um mapeamento numa perspectiva histórica (1962 e 2022), que podem estar relacionados à resolução espacial adotada de 10m e, portanto, insuficiente para identificar tais feições geomorfológicas, como também o desafio e a dificuldade em calibrar o modelo ou a própria natureza do SIMWE.

A correlação (distribuição) das feições erosivas com as classes de erosão e deposição demonstrou que os quatro cenários simulados registraram a predominância dos processos de deposição, com variação entre 64% e 77% e a erosão entre 23% e 36%, portanto, a distribuição (deposição) de sedimentos é maior que a perda de solo. Destaca-se o Cenário 1 que obteve o melhor resultado, pois cerca de ~ 40% das feições erosivas estão nas classes de valores positivos (erosão) indicadas como suscetíveis pelo modelo SIMWE e ~ 60% estão nas classes que registraram valores negativos (deposição). Os demais cenários obtiveram resultados inferiores, uma vez que as feições erosivas registraram entre ~ 31% e ~ 35% nas classes de valores positivos (erosão) e o restante ~ 65% e ~ 69% nas classes de deposição.

A validação dos cenários a partir da aplicação do PE demonstrou índices semelhantes (entre ~ 9,50% e 28,50%) para os Cenários 2, 3 e 4 e maiores que o PE do Cenário 1 que obteve entre ~ 8,50% e 17,00% e, portanto, menor resultado entre os quatro cenários analisados. Neste sentido, este último cenário, que registrou os maiores valores das classes erosivas, possui menor suscetibilidade à ocorrência de novas feições erosivas e os demais cenários que registraram menores valores das classes erosivas é maior a suscetibilidade à ocorrência de novas feições erosivas.

Os produtos intermediários: fluxo hidrológico superficial (m^3/s), profundidade da lâmina d'água (m), concentração de sedimentos (partículas/ m^3) e fluxo de sedimentos (kg/m.s)

apresentaram cenários em que os setores com os maiores valores ou intensidades também estão espacialmente identificados por “linhas preferenciais”, locais em que parte significativa das feições erosivas estão situadas, também associadas às áreas circundantes da drenagem principal e afluentes (perenes ou intermitentes).

A verificação da hipótese deste trabalho foi feita a partir da validação dos mapas Balanço da Erosão e Deposição gerados pelo SIMWE, com o mapeamento das feições erosivas numa perspectiva histórica, com o apoio do trabalho de campo, da aplicação do índice PE e da ferramenta *Tabulate Intersection* do programa ArcGis 10.5. Neste sentido, os resultados apresentaram satisfatórios, pois parte da suscetibilidade erosiva identificada pelos produtos finais foi verificada com uma significativa concordância com as feições erosivas mapeadas, resultado da capacidade e potencialidade do modelo SIMWE em identificar setores erosivos e deposicionais.

A pergunta elaborada neste trabalho em tela, foi respondida e atendida, uma vez que o SIMWE demonstrou viabilidade para ambiente tropical. Visto que, parte das feições erosivas mapeadas estão situadas justamente nos setores que o modelo registrou valores positivos (ocorrência de processos erosivos), os quais também caracterizam pelo registro dos maiores valores de fluxo de sedimentos e hidrológicos superficiais além da constatação da sensibilidade dos parâmetros Coeficiente de Manning, Tensão de Cisalhamento, Coeficiente da Capacidade de Desprendimentos e Transporte de Sedimentos, subsídios importantes para a compreensão e avaliação da distribuição espacial dos processos de erosão e deposição.

O objetivo principal foi alcançado, assim como os específicos que consistiram em: caracterizar a dinâmica dos fluxos superficiais e subsuperficiais por meio da modelagem do terreno; Indicar os principais parâmetros a partir de simulações que podem influenciar nas taxas de erosão e deposição da bacia, como também avaliar o efeito da erosão e da deposição na paisagem.

Por fim, o modelo SIMWE, possui capacidade para identificar setores erosivos e pode ser uma importante ferramenta para avaliação, diagnóstico e prognóstico de locais suscetíveis em paisagens complexas de clima tropical úmido. Pois pode auxiliar órgãos e administrações públicas, instituições, setores privados, na elaboração e implementação do planejamento urbano e ambiental.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. (1949). Regiões de Circundesnudação pós-cretácea, no planalto brasileiro. *Boletim de Geografia*, n.1, p.03-21.
- AB'SÁBER, A. (1969). Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário. *Geomorfologia*, v.18, p.1-18.
- AB'SÁBER, A. N. (2006). Erosividade versus erodibilidade. *Scientific American Brasil*, São Paulo, n.46; p.98, 2006.
- ABDO, H.; SALLOUM, J. (2017). Mapping the soil loss in Marqya basin: Syria using RUSLE model in GIS and RS techniques. *Environmental Earth Sciences*, v.76, n.3, p.1-10, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6424-0>
- ABDULKAREEM, J. H., GIREI A. H., YAMUSA, A. M.; AND ABDULLAHI, J. (2021). An Overview of soil Erosion Modelling. *Journal of Research in Forestry, Wildlife & Environment*, v.13 p. 206-215.
- AFUNGANG, R.; BATEIRA, C. (2016). Statistical modelling of extreme rainfall, return periods and associated hazards in the Bamenda Mountain, NW Cameroon. *GOT - Geography and Spatial Planning Journal*, v.1(9), p.5-19. <https://doi.org/10.17127/got/2016.9.001>
- AKGUN, A.; TURK, N. (2011). Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: A case study from the Ayvalık region, NW Turkey. *Computers & Geosciences*, v.37(9), p.1515-1524. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.09.006>
- AKSOY, H.; KAVVAS, M.L. (2005). A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*, v.64, n.2-3, p.247-271, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.008>
- ALMEIDA, C. O. S. (2009). Erosividade das chuvas no estado de Mato Grosso. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias), Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 83p, 2009.
- ALMEIDA, C.O.S; AMORIM, R.S.S.; ELTS, F.L.V.; COUTOR, E.G.; JORDANI, S. A. (2012). Erosividade da chuva em municípios do Mato Grosso: Distribuição sazonal e correlações com dados pluviométricos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.2, p.142 - 152.
- ALMEIDA, W. S; CARVALHO, D. F; PEREIRA, F. A. C; ROUWS, J. R. C. (2019). Sediment production and soil water infiltration under different simulated rainfall characteristics. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.23(8), p.572-578. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n8p572-578>
- ALMEIDA, F. F. M. (1964). Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. *Boletim Instituto Geológico e Geográfico*, n.41; p.166-263.
- ALMEIDA, F. F. M. (1974). Fundamentos geológicos do relevo paulista. (Instituto). Instituto Geográfico e Geológico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALMEIDA FILHO, G.S; COSTA, S.B; HELLMMEISTER JUNIOR, Z; CORSI, A. C. (2016). Situação da erosão hídrica linear no Estado de São Paulo , BR. Congresso Da Sociedade de Análise de Risco Latino Americana, 3, 5508.

ALMEIDA FILHO, G.S.; SANTOR, J.; GOMES, L. (2004). Estudo da Dinâmica evolutiva da boçoroca São Dimas no município de São Pedro (SP). Simposio Brasileiro de Desastres Naturais, 1, P.73-86.

ALMEIDA, M. C. J. (2002). Abordagem do uso do solo nas alterações de processos do meio físico. Dissertação. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosófica, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 164p, 2002.

AMORIM, R. S. (2004). Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras. Tese. Programa de Pos Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 143p, 2004.

ARAÚJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. (2007). Gestão Ambiental de Áreas Degradadas. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 320p, 2007.

ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M. (1996). Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology*, v. 176, n.1-4, p. 57-77, 1996. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02782-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02782-3)

ARROIO JUNIOR, P. P. (2013). Avaliação de produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri, municípios de Itirapina e Brotas (SP). Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 134p, 2013.

AUGUSTIN, C. H.; ARANHA, H. R. A. (2006). Piping em área de voçorocamento, Noroeste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.7(1), p.9-18, 2006. <https://doi.org/10.20502/rbg.v7i1.56>

AUZET, A.V.; POESEN, J.; VALENTIN, A. C. (2004). Editorial: Soil surface characteristics: Dynamics and Impactos on soil erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.29, p.1063-1064, 2004.

AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N; CURI, N.; MELLO, C.R.; FONSECA, S. (2008). Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.6, p. 563-569, 2008.

BAPTISTA. G. M. M. (2003). Diagnóstico ambiental de Erosão Laminar: modelo geotecnológico e aplicação. Universa: Brasília, 2003, 104 p.

BARRETO, M. M. R. (1970). Geomorfologia da Área de São Pedro (SP). *Notícia Geomorfológica*, v.10 (19), p.47-61.

BARROS, E.N.S.; MARCELO RIBEIRO VIOLA, M.R.; RODRIGUES, J. A. M; CARLOS ROGÉRIO DE MELLO, C.R.; JUNIOR CESAR AVANZI, J.C.; MARCOS GIONGO, M. (2018). Modelagem da erosão hídrica nas bacias hidrográficas dos rios Lontra e Manoel Alves Pequeno, Tocantins. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 1-9. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i1a5509>

BATEIRA, C. V. M. (2020). Suscetibilidade a processos hidro-geomorfológicos no Norte de Portugal: modelação matemática de base física e de base estatística. Modris: Modelação de Riscos Naturais / Compete: Programa Operacional Fatores de Competitividade.

BAZÃO, C; FERNANDES, N; BHERING, S. (2014). Modelagem da resposta hidrológica aos diferentes tipos de uso e cobertura da terra na bacia do Barro Branco - São José de Ubá (RJ). Revista Geonorte (Edição Especial), v.10, n.1, p.577–582.

BEASLEY, D. B; HUGGINS, L. F; MONKE, E. J. (1980). ANSWERS: a model for watershed planning. Transactions, American Society of Agricultural Engineers, v.23(4), p.938–944. <https://doi.org/10.13031/2013.34692>

BERNATEK - JAKIEL, ANITA.; WRÓŃSKA-WAŁACH, D. (2018). Impact of piping on gully development in mid-altitude mountains under a temperate climate: A dendrogeomorphological approach. CATENA, v.165, p.320–332. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.012>

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F.(2008). Conservação do Solo. Ícone, São Paulo, 355 p, 2008

BEVEN, K., P. QUINN, R. ROMANOWICZ, J. FREER, J. FISHER, A. R. L. (1995). TOPMODEL and GRIDATB: A Users Guide to the Distributed Versions (95.02). Lancaster United Kingdom.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, v.24(1), p.43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>

BHASKAR, N.R.; BRUMMETT, L. K.; FRENCH, M. N. (2005). Runoff modeling of a mountainous catchment using topmodel: A case study. Journal of the American Water Resources Association, 41(1), 107–121. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03721.x>

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. (2001). Elementos de engenharia de sedimentos. In C. E. M. TUCCI (Ed.), Hidrologia: (pp. 915–943).

BORGES, C. Z. (2004). Erosão Marginal no Rio Paraná após a conclusão do Reservatório da UHE Sergio Motta (Porto Primavera) Jusante a Barragem. Dissertação. Universidade Estadual do Maringá.

BÓRIO, N. J. (1973). Geologia da Área de São Pedro (SP). Tese de Doutorado. Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 125 p, 1973.

BOX J. R. J. E; BRUCE, R. R. (1996). The effect of surface cover on infiltration and soil erosion. In M. (org). Agassi (Ed.), Soil erosion, conservation e rehabilitation (Ministry o, p. cap. 6, 107 – 123.).

BRADY, N.C. (1989). Natureza e propriedades dos solos. Freitas Bastos, Rio de Janeiro, 898 p.

BRADY, N.C; WEIL, R. R. (2013). Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 790p, 2013

BRAIMOH, A.K.; VLEK, P.L.G. (2007). Impact of land use on soil resources. In: BRAIMOH, A. K.; VLEK, P. L. G. (orgs.). Land use and soil resources. Springer: Sweden, p. 1-8, 2007.

BRITO, A. P. (2014). Elaboração de Modelo Numérico de Fluxo de Água Subterrânea para uma microbacia de água clara na reserva floresta Adolpho Ducke, Manaus - AM. Instituto de Ciências Exatas - Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas.

BROUWER, C.; GOFFEAU, A.; HEIBLOEM, M. (1985). FAO - Food and agriculture organization of the United Nations.

BRYAN, R. (1987). Processes and significance of rill erosion. *Catena*, p.1–16, 1987.

BRYAN, R. B. (2000). Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. August 1999.

BRYAN, R. B., GOVERS, G; POESEN, J. (1989). The concept of soil erodibility and some problems of assessment and application. *CATENA*, v.16(4–5), p.393-412. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(89\)90023-4](https://doi.org/10.1016/0341-8162(89)90023-4)

CANIL, K. (2000). Processos erosivos e planejamento urbano: carta de risco de erosão das áreas urbanas e periurbana do município de Franca (SP). Dissertação. Departamento de Geografia. Faculdade de Filosofia Letras, Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 96 p.

CARIEELO, B.L.; BLANCO, C.J.C.; GOMIDE, I. S. (2012). Aplicação da Musle para estimativa da perda de solo da bacia do Igarapé da Prata em Capitão Poço / Pará. X ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos.

CARMO, E. J.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R. (2015). Avaliação dos interpoladores krigagem e topo to raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um “as built.” *Boletim de Ciências Geodesicas*, 21(4), 674–690. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702015000400039>

CARPI JUNIOR, S. (1996). Técnicas Cartográficas aplicadas à dinâmica da bacia do ribeirão Araquá (SP). Dissertação (Mestrado em Organização do Espaço). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 188 p.

CARVALHO, F.H. (2014). Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade de Brasília, 154p, 2014.

CARVALHO, J.P.D.S. (2019) Modelação de ravinas pelo SIMWE e validação com recurso a MDE de elevação resolução: Região Demarcada do Douro, Quinta do Bonfim. Dissertação. Faculdade de Letras, Universidade do Porto, Portugal, 50p, 2019.

CARVALHO, N. O. (2008). Hidrossedimentologia prática. Interciência, Rio de Janeiro, 2ªed, 600p, 2008.

CASADO, A.P.B.; HOLANDA, F.S.R; ARAÚJO FILHO, F.A.G; YAGUIU, P. (2002). Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco (Perímetro Irrigado

Contiguiba/ Pindoba - SE). *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, p.231–239.

CASASNOVAS, J. A. M. (2003). A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, v.50(2–4), p.293–308. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00134-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00134-0)

CASSOL, E.A.; MARTINS, D; ELTZ, F.L.F; LIMA, V.S.; BUENO, A. C. (2007). Erosividade e padrões hidrológicos das chuvas de Ijuí (RS) no período de 1963 a 1993. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.15, n.3, p. 220 - 231.

CASTILHO, V.D. (2016). Aplicação da Dendrogeomorfologia na caracterização e datação dos processos erosivos em voçorocas na região de Piracicaba (SP). Dissertação. Área de Concentração em Nutrição de Solos e Plantas, Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), 2016.

CASTRO, A.G. (1992). Técnicas de sensoriamento remoto e Sistemas Geográficos de Informações no estudo integrado de bacias hidrográficas. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

CASTRO, S.S. (2005). Erosão Hídrica na alta bacia do rio Araguaia: distribuição, condicionantes, origem e dinâmica atual. *Revista do Departamento de Geografia, São Paulo*, v.17, p.38–60.

CECATTO, C. A. (2014). Modelagem das perdas de solo e água por erosão hídrica pluvial. Tese. Programa de Pos Graduação em Manejo do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Lages, 130p, 2014.

CHEN, Z.M; WANG, B. (2022). Paths of soil erosion controlled by typical soil and water conservation practices based on the SIMWE model: A case study of the Tongshuang watershed. *The Journal of Applied Ecology*, v.33, n.3, p.703-710. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202203.016>

CHESWORTH W (ed) (2008). *Encyclopedia of Soil Science*. University of Guelph Canada. Canada: Springer; 2008. DOI: 10.1007/978-1-4020-3995-9.

CHORLEY, R.J.; HAGGETT, P. (1967). *Modelos em Geografia*. Methuen, Londres, 816p, 1967

CHORLEY, R.J; HAGGETT, P. (1974). *Modelos Integrados em Geografia*. Universidade de São Paulo, 1º ed, Edusp, São Paulo, 1974.

CHORLEY, R. J. (1971). A Geomorfologia e a Teoria dos Sistemas. *Noticia Geomorfológica*, v.11, n.21, p. 3-22.

CHRISTOFOLETTI, A. (1999). *Modelagem de Sistemas Ambientais*. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 186p, 1999.

CIIAGRO. Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas. Balanço Hídrico Semanal do Município de São Pedro (SP). Período de 08/07/2002 a 31/10/2019. Disponível em: <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Listagens/BH/LBalancoHidricoLocal.asp>. Acesso em: 14 Jan. 2023.

COLLISCHONN, W; TASSI, R. (2008). Introduzindo a Hidrologia. Apostila, versão 5, IPH/UFGRS, 2008.

CONOSCENTI, C; ANGILERI, S; CAPPADONIA, C; ROTIGLIANO, E; AGNESI, V; MARKER, M. (2014). Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, v.204, p.399-411. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.021>

CONTI, J. B. (1971). Condições Climáticas da Região de Águas de São Pedro (SP). *Caderno de Ciências Da Terra, Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo*, n.11, 15p.

COOPER, M.; MOMOLI, R.S. (2016). Erosão hídrica em solos cultivados e sob mata ciliar. *Pesquisa agropecuária brasileira*. v.51 n.9 Brasília, 2016

CORREIA, G.T; SOUZA FILHO, E.E. (2009). Avaliação dos processos de erosão marginal no arquipélago floresta japonesa (Alto Rio Paraná). *Geografia (Londrina)*, v.18, n.2, 2009.

COSTA, C. S. M. (2016). Contributo para a modelação da suscetibilidade à erosão por sulcos e ravinas na Quinta de São Luiz (Tabuaço). *Faculdade de Letras, Universidade do Porto*.

COSTA, J. T. (2015). Modelagem da capacidade de transporte de sedimentos em Latossolo Férrico. *Universidade Estadual Paulista*.

COUTARD, J.P.; DIAS FERREIRA, R.P., PELLERIN, J., QUEIROZ NETO, J. P. (1978). Carta Geomorfológica de São Pedro (SP). (1:50.000): Memorial Explicativo, Sedimentologia e Pedologia. *Universidade de São Paulo*.

CRUZ, C. (2001). Análise comparativa da evolução das boçorocas nos anos de 1962 e 1999 nos municípios de Pompéia e Oriente (SP). *Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista - Campus de Rio Claro (SP)*.

CRUZ, O. A. (1985). Escala temporal-espacial nos estudos dos processos geomorfológicos erosivos atuais. *Geomorfologia, Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo* n.33, p.01 – 06.

DAEE, D. (1989). Controle de Erosão: bases conceituais e técnicas: diretrizes para o planejamento urbano e regional – orientações para o controle de boçorocas urbanas. *DAEE/IPT, São Paulo*, 1989, 92 p.

DAEE, D. (1990). Controle de Erosão: bases conceituais e técnicas: diretrizes para o planejamento urbano e regional – orientações para o controle de boçorocas urbanas *DAEE/IPT, São Paulo*, 1990, 92 p.

DAI, Q.; PENG, X.; YANG, Z.; ZHAO, L. (2017). Runoff and erosion processes on bare slopes in the karst rocky desertification area. *CATENA*, 152, 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.013>

DANIEL, E.; VIEIRA, B.C. (2015). A evolução das feições erosivas na bacia do córrego Espreado, São Pedro (SP). *Boletim Goiano de Geografia (online)*, v.35, n.2. p.339-359, 2015. <https://doi.org/10.5216/bgg.v35i2.37435>

DANIEL, E.; VIEIRA, B.C.; MARTIN, T.D. (2021). Implicações do uso do solo na ocorrência de feições erosivas em São Pedro (SP). *Derbyana*, n.42, e751, 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.14295/derb.v42.751>

DANIEL, E; VIEIRA, B.C.; MARTINS, T. D. (2021). Análise dos processos erosivos e deposicionais utilizando o modelo SIMWE (Simulated of Water Erosion). *Revista do Departamento de Geografia*, v.41, e185794, p.1-15, 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.185794>

DANIEL, E. (2012). Análise do papel da morfologia e do uso do solo na gênese e na distribuição das feições erosivas na bacia do córrego Espirado, São Pedro (SP). Dissertação (Mestrado em Geografia Física), Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, 197p, 2012.

DANTAS, J.C.; SILVA, M.A.; SILVA, R.M.; VIANNA, C. G. (2015). Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. *Geociências*, v.34; n.4; p.816-827.

DEMARCHI, J. C; PIROLI, E. L. (2020). Modelagem de erosão e aporte de sedimentos em bacia hidrográfica com o modelo WaTEM/SEDEM. *Caminhos de Geografia*, v.21(78), p.117–137. <https://doi.org/10.14393/RCG217853059>

DEROSE, R. C.; GOMEZ, B.; MARDEN, M.; TRUSTRUM, N. A. (1998). Gully erosion in Mangatu forest, New Zealand, estimated from digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(11), p.1045–1053. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(1998110\)23:11<1045::AID-ESP920>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(1998110)23:11<1045::AID-ESP920>3.0.CO;2-T)

DIAS FERREIRA, R. P. (1997). Solos e Morfogênese em São Pedro (SP). Tese. Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 157p, 1997.

DORNELLAS, P. C.; SEABRA, V. S.; XAVIER, R.A.; SILVA, R. M. (2017). Estimativa de perdas de solo na bacia do alto rio Paraíba, região semi árida do estado da Paraíba. *OKARA: Geografia Em Debate*, 11(2), 338. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1982-3878.2017v11n2.37658>

DRUMOND, F. N.; BACELLAR, L. A. P. (2006). Caracterização hidrossedimentológica e dos processos evolutivos de voçorocas em área de rochas gnáissica do alto Rio das Velhas (MG). *Revista Brasileira de Geomorfologia*., n.02, 87 – 96.

DUARTE, U. (1980). Geologia Ambiental da área de São Pedro (SP): vetor águas subterrâneas. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 73 p, 1980.

DURÃES, M. F. (2010). Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba por meio da simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído. Universidade Federal de Minas Gerais, 168p, 2010.

DYMOND, J. R; VALE; S. S. (2018). An event-based model of soil erosion and sediment transport at the catchment scale. *Geomorphology*, v.318, p.240-249. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.06.019>

EBHUOMA, O; GEBRESLASIE, M; NGETAR, N.S; PHINZI, K; BHATTACHARJEE, S. (2002). Soil Erosion Vulnerability Mapping in Selected Rural Communities of uThukela

Catchment, South Africa, Using the Analytic Hierarchy Process. *Earth Systems and Environment*, n.6, p.851-864, 2002. <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00308-y>

EBLING, E.D.; REICHERT, J.M.; PELAEZ, J.J.Z.; RODRIGUES, M.F.; VALENTE, M.L.; CAVALCANTE, R.B.L.; REGGIANI, P.; SRINIVASAN, R. (2021). Event-based hydrology and sedimentation in paired watersheds under commercial eucalyptus and grasslands in the Brazilian Pampa biome. *International Soil and Water Conservation Research*, v.9, n. 2, p.180 - 194, 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.10.008>

EKKHOUT, J.P.C.; TERINK, W.; VENTE, J. (2018). Assessing the large-scale impacts of environmental change using a coupled hydrology and soil erosion model. *Earth Surf. Dynam.*, 6(3), 687–703.

ELLIOT, W. J., LIEBENOW, A. M., LAFLEN, J. M., KOHL, K. D. (1989). A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 1988. (O. State & U. and U. A. R. Service. (eds.); West Lafay). Available from USDAARS, National Soil Erosion Research Laboratory.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2 ed. Rio de Janeiro, 412p,1999.

FACINCANI, E. M. (1995). Influência da estrutura e tectônica no desenvolvimento das boçorocas da região de São Pedro/SP: proposta de reabilitação e aspectos jurídico-institucionais correlatos. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 124 p.

FARIA, S. H.; RODRIGUES, D. D.; MEDEIROS, N. G.; ARANHA, P. R. A. (2017). Evaluation of the GPR in the bathymetry estimate of a decanting water treatment plant using the free software “GPR bathymetry” in the radargrams analysis. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 23(1), 39–54. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702017000100003>

FERNANDES, J. (2014). Modelação de Processos Erosivos no Alto Douro Vinhateiro: o caso de estudo da Quinta de S. Luiz. Dissertação. Faculdade de Letras, Universidade do Porto, Portugal, 135f, 2014.

FERNANDES, J; BATEIRA, C; LAURA, S; OLIVEIRA, A; FARIA, A; HERMENEGILDO, C.; TEIXEIRA, M.; MOURA, R.; GONÇALVES, J. (2015). Aplicação do modelo SIMWE na definição de áreas suscetíveis à erosão linear: estudo de caso na região demarcada do Douro (RDD). VII Congresso Nacional de Geomorfologia, p. 247 - 254.

FERNANDES, J; BATERIA, C; SOARES, L; FARIA, A; MOURA, R; GONÇALVES, J. (2016). SIMWE model application on susceptibility analysis to linear erosion: a case study in Alto Douro wine region. *Geophysical Research Abstracts*, v.18, EGU2016-12969, 2016.

FERNANDES, J; BATEIRA, C; SOARES, L; FARIA, A; OLIVEIRA, A; HERMENEGILDO, C.; MOURA, R.; GONÇALVES, J. (2017). Catena SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion in Alto Douro Wine Region agricultural terraces. *Catena*, v.153, p. 39 - 49. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.034>

FERNANDES, N. F. (2016). Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios. *Espaço Aberto*, 6(1), 209–247. <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2016.5243>

FERRAZ JARDIM, A.M.R.F.S.; SILVA, J.R.I.; SILVA, M.J.; ARAUJO JUNIOR, J.N.; SOUZA, R.; SOUZA, E. S. (2020). Modelagem da perda de solo por erosão hídrica em Planossolo Háptico. *Brazilian Journal of Development*, 6(2), 6826–6834. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n2-107>

FERREIRA, M.D. (2004). Análise da evolução dos processos erosivos acelerados em áreas urbanas e das técnicas de controle e recuperação, córrego do Tucum, São Pedro (SP). Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 191p, 2004.

FERREIRA, M.D. (2008). Proposta de índice para processos erosivos acelerados a partir de levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas. 2008. 454f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Área de Concentração de Geotecnia, Universidade de São Paulo, 2008.

FERREIRA, A.M.; SILVA, A.M.; PASSOS, P.C.; VALENTINO, C.R.; GONÇALVES, F.A.; MENEZES, P. H. B. J. (2021). Estimativa da erosão hídrica do solo pelo modelo Water Erosion Prediction Project na Sub-Bacia do Córrego do Gigante, sul de Minas Gerais. *Eng Sanit Ambient*, v.26 n.3; p. 471-483. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1413-415220190216>

FIORESE, C. H. U. (2021). Vulnerabilidade natural à erosão nas áreas de café e pastagem no município de Cachoeiro de Itapimirim (ES). *Revista de Geografia (Recife)*, 38, 219–236. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2021.249455>

FLANAGAN, D. C., FRANKENBERGER, J.R; ENGEL, B. A. (2004). Web-based GIS application of the WEPP model. ASAE Paper No. 042024. St. Joseph, Mich.: ASAE.

FLANAGAN, D. C.; GILLEY, J. E.; FRANTI, T. G. (2007). Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. *Transactions of the ASABE*, 50(5), 1603–1612.

FLANAGAN, D.C.; GILLEY, J.E.; FRANTI, T. G. (2007). Water erosion prediction project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. v.50, n.5, p.1603-1612, 2007.

FLANAGAN, D. C; NEARING, M. A. (1995). Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report N° 10, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, USA, 1995.

FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH II., J.C; NEARING, M.A; LAFLEN, J. M. (2001). The water erosion prediction project (WEPP) model. In W. W. Harmon, R.S., Doe III. (Ed.), *Landscape Erosion and Evolution Modelling*. Kluwer Academic Publishers. (p. 145–199).

FLANAGAN, D.C., RENSCHLER, C.S.; COCHRANE, T. A. (2000). Application of the WEPP model with digital geographic information GIS. Presentation for 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs.

FOLTZ, R.B; RHEE, H; YANOSEK, K. A. (2007). Infiltration, Erosion, and Vegetation Recovery Following Road Obliteration. *Transactions of the ASABE*, 50(6), 1937–1943.

<https://doi.org/10.13031/2013.24089>

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D. (1972). Transport of Soil Particles By Shallow Flow. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 15(1), 99–102. <https://doi.org/10.13031/2013.37840>

FOSTER, G. R. (1982). Modelling the erosion process. In D. L. (eds.). HAAN, C. T., JOHNSON, H. P., BRAKENSIEK (Ed.), *Hydrologic modelling of small watersheds* (pp. 296-380.). ASAE Monograph, 5.

FOX, D.M.; BRYAN, R. B. (1999). The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena*, 211–222.

FRANCISCO, A. B. (2020). Estimativa de erosão hídrica na bacia do rio Jamanxim, Pará. *Revista GeoAmazônia*, 236–244.

FUJIHARA, A. K. (2002). Predição de erosão e capacidade do solo numa microbacia do oeste paulista com geoprocessamento.: Vol. Único. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

FURQUIM, S.A.C. (2002). Interações entre modelo e solo no transecto do Espriado - São Pedro/SP. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 183p, 2002. <https://doi.org/10.11606/D.8.2002.tde-01082005-105035>

GAO, J. (1993) Identification of topographic settings conducive to landsliding from dem in Nelson county, Virginia, U.S.A. *Earth Surface Process Landforms*: v.18, p. 579 – 591.

GOMES, D.M. (2002) Mapeamento Geotécnico para análise das feições erosivas concentradas na bacia do ribeirão do Meio, São Pedro (SP), na escala 1:20.000. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 268p, 2002.

GONÇALVES, F. A. (2008). Validação do modelo WEPP na predição de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de Viçosa/MG. Tese. (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 116p, 2008.

GOUDIE, A. (1990). *Geomorphological Techniques*. Routledge, London, 592 p.

GOUDIE, A.S. (2004). *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge, London e New York: 1156 p.

GRASS. (2017). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.2*. Open Source Geospatial Foundation, 2017.

GREENE, R. S. B; HAIRSINE, P. B. (2004). Elementary processes of soil-water interaction and thresholds in soil surface dynamics: A review. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.29(9), p.1077–1091. <https://doi.org/10.1002/esp.1103>

GROHMANN, C.H.; SMITH, M.J.; RICCOMINI, C. (2011). Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland. *IEEE Transactions on*

Geoscience and Remote Sensing, v.49, n.4, p.1200-1213, 2011.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2053546>

GROHMANN, F. (1972). Estrutura. In: MONIZ, A.C. (org). Elementos de Pedologia. Universidade de São Paulo: São Paulo, cap. 9, p. 101-110, 1972.

GUIMARÃES, D.V; SILVA, M.L.N; MARTINS, R.P; CONTINS, J.G.P; SANTOS, W. P. (2015). Modelagem das perdas de solo por erosão hídrica em sistemas florestais pós-plantio, em sub-bacia no Extremo Sul da Bahia(1. XXXV Congresso Brasileiro de Ciencia Do Solo.

GUIMARÃES, C. N. (2008). Mapeamento geotécnico da bacia da Barra, aplicação do penetrômetro em estudos de processos erosivos - São Pedro (SP) - Escala 1:10.000. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 104p, 2008.

GUTIÉRREZ, Á. G; SCHNABEL, S; CONTADOR, F. L. (2009). Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain. *Land Degradation & Development*, v.20(5), p. 535–550. <https://doi.org/10.1002/ldr.931>

HAAN, C; BARFIELD, B; HAYES, J. (1994). Design hydrology and sedimentology for small catchments. In R. J. (Eds. . Garcia, C. e Batalla (Ed.), *Catchment Dynamics and Rivers Processes: Mediterranean and Other Climate Regions*. (Academic P, p. Elsevier, pp. 53-67.).

HADLEY, R.F; LAL, R; ONSTAND, C.A; WALLING, D.E. YAIR, A. (1985). Technical Documents in Hydrology. In *Erosion and Sediment Yield Studies* (p. 124).

HAO, H.; WANG, J.; GUO, Z. ; HUA, L. (2019). Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow. *Catena*, 173, 494–504. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.029>

HARMON, B.A.A.; MITASOVA, H.; PETRASOVA, A.; PETRAS, V. (2019). r.sim.terrain 1.0: a landscape evolution model with dynamic hydrology. *Geosci. Model Dev*, 12(7), 2837–2854. <https://doi.org/doi.org/10.5194/gmd-12-2837-2019>

HENGL, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers and Geosciences*, v.32(9), p.1283–1298. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>

HOFIERKA, J.; KNUTOVA, M. (2015). Simulating spatial aspects of a flash flood using the Monte Carlo method and GRASS GIS : a case study of the Malá Svinka Basin (Slovakia). *Open Geosci*, v.7, p.118–125. <https://doi.org/10.1515/geo-2015-0013>

HOFIERKA, J.; MITASOVA, H.; MITAS, L. (2002). GRASS and modeling landscape processes using duality between particles and fields. September, p.11–13.

HOFIERKA, J.; MITASOVA, H.; NETELER, M. (2009). Geomorphometry in GRASS GIS. *Developementes in Soil Sciencie*, 33. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00017-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00017-2).

HOLLANDA, M. P.; CECILIO, R.A.; CAMPANHARO, W.A.; ZANETTI, S.S.; ANDRADE, L.N.; GARCIA, G. O. (2015). Avaliação do TOPMODEL na estimativa do escoamento superficial em microbacia hidrográfica em diferentes usos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(5), 489–496. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p489-496>

- HOOKE, J. M. (1979). An analysis of the processes of river bank erosion. *Journal of Hydrology*, v.42(1–2), p.39–62. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90005-2)
- HOOKE, J. M. (1980). Magnitude and distribution of rates of river bank erosion. *Earth Surface Processes*, 5(2), 143–157. <https://doi.org/10.1002/esp.3760050205>
- HUANG WU, Y.; YEVEVICH, V.; WOOLHISER, D. A. (1978). Effects of surface roughness and its spatial distribution of runoff hydrographs (Agriculture). University of State Colorado.
- HUTCHINSON, M. F. (1988). Calculation of hydrologically sound digital elevation models. Paper Presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney, April, p.117–133.
- JAKIEL, A.B.; WALACH, D.W. (2018). Impact of piping on gully development in mid altitude mountains under a temperate climate: a dendrogeomorphological approach. *Catena*, v.165, p.320-332, 2018.
- JETTEN, V; GOVERS, G; HESSEL, R. (2003). Erosion models: quality of spatial predictions. *Hydrological Processes*, 17(5), 887–900. <https://doi.org/10.1002/hyp.1168>
- JULIEN, P.Y; SAGHAFIAN, B; OGDEN, F. L. (1995). Raster based hydrologic modeling of spatially varied surface runoff. *Water Resources Bulletin*, 31, N.3, 523–536.
- KAWAKUBO, F.S.; OLIVEIRA, D.; MORATO, R. G. (2006). Contribuição da análise de superfície de tendência para caracterização morfológica de uma topossequência situada na região de São Pedro (SP). *Geografia, Rio Claro*, v.31, n.3, p.571-585. <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/1388>
- KERTZMAN, F.F.; OLIVEIRA, A.M.; SALOMÃO, F.X.; GOUVEIRA, M. I. F. (1995). Mapa de erosão do estado de São Paulo. *Revista do Instituto Geológico*, n.16(special). <https://doi.org/10.5935/0100-929X.19950008>
- KIEHL, E. J. (1979). *Manual de Edafologia: Relações e Plantas*. Agronômica Ceres: São Paulo, 262 p, 1979.
- KIRKBY, M. J.; CHORLEY, R. J. (1967). Throughflow, Overland Flow and Erosion. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, v.12, p.5–21, 1967.
- KIRKBY, M.J.; MORGAN, R.P.C. (1980). *Soil Erosion*. Publisher, Chichester. New York, 312 p, 1980.
- KOCO, S. (2011). Simulation of gully erosion using the SIMWE model and GIS. *Landform Analysis*, v.17, p. 81-86.
- KORZENIOWSKA, K.; PFEIFER, N.; LANDTWING, S. (2018). Mapping gullies, dunes, lava fields, and landslides via surface roughness. *Geomorphology*, 53–67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.10.011>
- KOTINAS, V.; GOURNELOS, T. EVELPIDOU, N.; VLACHOGIORGOU, M. (2015). Spatial Distribution of erosion and deposition zones as a result of surface runoff based on a probability model. A case study in the island of Samos. Conference: SGEM 2015At: Albena,

Bulgaria Volume: Vol.II, SGE2015. 2015;2(2):1087-1092.

LABADESSA, A. S. (2014). “Terras caídas”, as causas e implicações socioeconômicas: uma análise preliminar na comunidade de Calama – baixo rio Madeira/RO. *Boletim Paranaense de Geociências*, v.71; 12-20.

LAFLEN, J. M.; FLANAGAN, D. C; ASCOUGH, J. C; WELTZ, M. A; STONE, J. J. (1994). The WEPP model and its applicability for predicting erosion on rangelands. *Soil Science Society of America, Special Publication*, 38: 11-22.

LANÇA, R. M. M. (2000). Contribuição para o estudo de cheias recorrendo a um modelo distribuído. Universidade de Évora.

LANE, L. J., RENARD, K. G., FOSTER, G. R., LAFLEN, J. M. (1992). Development and application of modern soil erosion prediction technology. *Australian Journal of Soil Research*, v. 30, n. 6, p. 893 – 912.

LANE, L.J; NEARING, M. A. (1989). Water erosion prediction project: hillslope profile model documentation. In USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.

LEGUÉDOIS, S.; LE BISSONNAIS, Y. (2004). Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.29(9), p.1117–1129. <https://doi.org/10.1002/esp.1106>

LEITE, A.P.P. (2009) Aplicação de Metodologias para o cálculo de erosão (USLE E WEPP) em uma sub-bacia hidrográfica do rio Cobres. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica). Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 170p, 2009.

LEMONS, C.F; FIORI, A.P; OKA-FIORI, C; TOMAZONI, J. C. (2011). Erosões Concentradas Existentes na bacia Hidrográfica do Alto Curso do Rio Pitangui (PR). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 12(1), 59–67. <https://doi.org/10.20502/rbg.v12i1.219>

LENSE, G.H.E.; SERVIDONI, L.E.; PARREIRAS, T.C.; SANTANA, D.B.; BOLLELLI, T.M.; AYER, J.E.B.; SPALEVIC, V.; MINCATO, R. L. (2022). Modelagem da perda de solo por erosão hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Tietê, São Paulo, Brasil. *Ciências Agrárias*, 43, n.4, 1403-1422,. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n4p1403>

LEOPOLD, L.B; WOLMAN, M.G; MILLER, J.(1995). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Dover Publications, INC..

LIN, J; HUANG, Y; ZHAO, G; JIANG, F; WANG, M; GE, H. (2017). Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes using colluvial deposits in a permanent gully. *Catena*, 47–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.015>

LIN, K; ZHANG, Q; CHEN, X. (2010). An evaluation of impacts of DEM resolution and parameter correlation on TOPMODEL modeling uncertainty. *Journal of Hydrology*, 394(3–4), 370–383. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.012>

LOHMANN, M; SANTOS, L. J. C. (2005). A morfopedologia aplicada à compreensão dos processos erosivos na bacia hidrográfica do Arroio Guassupi, São Pedro do Sul (RS). *Revista*

Brasileira de Geomorfologia, 6(2), 91–102. <https://doi.org/10.20502/rbg.v6i2.55>

LOMBARDI NETO, F; JUNIOR, R.B; GALETI, P.A.; LEPSCH, I.F.; OLIVEIRA, J. B. (1989). Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços. In Fundação Cargill (Ed.), Simpósio sobre Terraceamento agrícola (pp. 99–124).

MACÊDO, R. J. A; SANTOS, J. C; SURYA, L. (2021). Modelagem da erosão hídrica potencial no Parque Nacional Serra da Capivara, Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geomorfologia, 22(4). <https://doi.org/10.20502/rbg.v22i4.1942>

MACHADO, C.C; GARCIA, A.R; SILVA, E; MACHADO, A. (2003). Comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) modificado em relação a medições experimentais. Revista Árvore, v.27, n.3, 295-300.

MACHADO, R. E. (2002). Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Universidade de São Paulo.

MARCHIORO, E.; FERNANDES, N.F.; MACEDO, J.R.; BHERING, S.B.; GONÇALVES, A.O.; CAIADO, M.A.C. (2011). Modelagem da produção de sedimentos no noroeste fluminense como subsídio ao planejamento ambiental: um estudo de caso da bacia do córrego Santa Maria. Revista Brasileira de Geomorfologia. v. 12, n.1, p. 29-38, 2011.

MARCHIORO, E.; FERNANDES, N.F; MACEDO, J.R.; BHERING, S.B.; GONÇALVES, A.O.; PRADO, R.B. (2014). Modelagem da produção de sedimentos usando cenário ambiental alternativo no noroeste do Rio de Janeiro - Brasil. Geografias. v.10, n.1, p.54-70, Belo Horizonte, 2014.

MARK, D.M. (1988). Network Models in Geomorphology. In: ANDERSON, M.G. (ed.). Modelling Geomorphological Systems. New York: John Wiley. 1988, p.73-97.

MATHIAS, D.T; LUPINACCI, C.M; RODRIGUES NUNES, J. O. (2020). Identificação dos fluxos de escoamento superficial em área de relevo tecnogênico a partir do uso de modelos hidrológicos em SIG. Sociedade e Natureza, n.32; p.820-831. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-49431>

MATHIAS D. T; LUPINACCI, C. M; MORUZZI, R. B.(2018). Distribuição das taxas de infiltração em áreas afetadas por processos erosivos acelerados e recobertas por materiais antropogênicos. Eng Sanit Ambient, v.23 n.5, 923–931. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018167570>

MATHIAS, D.T; NUNES, J. O. R. (2019). A dinâmica geotecnogênica em áreas periurbanas: município de São Pedro (SP). Geosul, v.34, n.70, p.484-498, 2019. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2019v34n70p484>

MATHIAS, D. T. (2011). Propostas de Recuperação de áreas peri-urbanas erodidas com base em parâmetros hidrológicos e geomorfológicos: córrego Tucunzinho – São Pedro (SP). Dissertação. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 128 p, 2011.

MELO, O. A. G. (2017). Modelagens Hidrológicas aplicadas a análise do escoamento superficial da bacia do rio Ivaí/PR. Tese. (Doutorado em Geografia). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 119p, 2017.

MELO, O.A.G.; SANTOS, M. L. (2020). O modelo hidrológico SWAT aplicado a análise da produção de sedimentos da bacia do rio Ivaí/PR. *Estudos Geográficos*, v.18, p.1-19, 2020.

MERRITT, W. S; LETCHER, R. A; JAKEMAN, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling and Software*, 18(8–9), 761–799. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1)

MEYER, L. D; FOSTER, G. R; NIKOLOV, S. (1975). Effect of flow rate and canopy on rill erosion. *Transactions of the ASAE*, 18(5): 905-911.

MEYER, L. D.; WISCHMEIER, W. H. (1969). Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Trans. ASAE* 12:, 754–758, 762.

MEYLES, E. W., WILLIAMS, A. G., TERNAN, J. L; ANDERSON, J. M; DOWD, J. F. (2006). The influence of grazing on vegetation, soil properties and stream discharge in a small Dartmoor catchment, southwest England, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(5), 622–631. <https://doi.org/10.1002/esp.1352>

MICHETE, J.F. (2015). Modelos de previsão de erosão pluvial utilizando SIG: estudo na bacia hidrográfica da Represa do Lobo (BROA) - SP. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2015.

MINGOTI, R. (2012) Efeitos da espacialização da cobertura florestal e da profundidade dos solos na produção de água de uma bacia hidrográfica. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 171p, 2012.

MINSHULL, R. (1975). *An introduction to models in Geography*. Editora Longman, Londres, 162p, 1975.

MITAS, L.; MITASOVA, H. (1998a) Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water resources research*, v.34, n.3, p.505-516, 1998. <https://doi.org/10.1029/97WR03347>

MITAS, L; MITASOVA, H. (1998b). Multi-scale Green's function Monte Carlo approach to erosion modeling and its application to land-use optimization. p. 81-90. In: W Summer, E. Klaghofer and W. Zhang (eds), *Modeling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes*. IAHS Publication n. 249, 1998.

MITASOVA, H; MITAS, L; BROWN, W. M. (2001). Multiscale simulation of land use impact on soil erosion and deposition patterns. In: D.E. Stott, R.H. Mohtar and G.C. Steinhardt (Eds). 2001. *Sustaining the Global Farm. Selected Papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting Held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Re*, 1163–1169.

MITASOVA, H.; MITAS, L.; BROWN, W.M.; JOHNSTON, D. (1997) GIS tools for erosion/deposition modeling and multidimensional visualization - Part V: Impact of transport capacity and terrain structures on erosion simulations. Illinois: Geographic Modeling and Systems Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign. 1997.

MITASOVA, H.; HOFIERKA, J; ZLOCHA, M.; IVERSON, L. R. (1996). Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, v.10(5), p.629-641. <https://doi.org/10.1080/02693799608902101>

MITASOVA, H.; MITAS, L. (2001). Cap. 11. Multiscale soil erosion simulations for land use management. In D. W. W. (eds) Harmon R.S. (Ed.), *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. Springer, Boston, MA. (p.321-347). https://doi.org/doi.org/10.1007/978-1-4615-0575-4_11

MITASOVA, H.; THAXTON, C.; HOFIERKA, J.; MCLAUGHLIN, R.; MITAS, L. (2005). Path sampling method for modeling overland water flow, sediment transport, and short term terrain evolution in Open Source GIS. *International Conference on Computational Methods in Water Resources*. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(04\)80159-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-5648(04)80159-X)

MITASOVA, H., BARTON, M., ULLAH, I., HOFIERKA, J; HARMON, R. S. (2013). 3.9 GIS-Based Soil Erosion Modeling. In *Treatise on Geomorphology* (pp. 228–258). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00052-X>

MOMOLI, R.S.; COOPER, M. (2016). Erosão Hídrica em Solos Cultivados e sob mata ciliar. *Solos e Planjamento*, v.51; n.9, 2016.

MORAES, M. V. A. (2016). Monitoramento e avaliação de processos erosivos marginais em reservatórios de usinas hidrelétricas por meio de varredura a laser. *Dissertação*. Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 96p, 2016.

MORE, R. (1975). Os Modelos Hidrológicos e a Geografia. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. *Modelos físicos e de informação geográfica*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 1975. p. 104-138.

MORGAN, R. P.C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W.A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D., & STYCZEN, M. E. (1998). The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(6), 527–544. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5)

MORGAN, R. P. C. (1986). *Soil erosion e conservation*. Editora Longman Scientificac e Technical, Inglaterra, 1ºed, 1986,

MORGAN, R.P.C. (2005) *Soil Erosion and conservation*. Malden, Blackwell Publishing On Line, 2005. 304p. <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>

NACHTIGALL, S. D., NUNES, M. C. M., MOURA-BUENO, J. M., LIMA, C. L. R. DE, MIGUEL, P., BESKOW, S; SILVA, T. P. (2020). Modelagem espacial da erosão hídrica do solo associada à sazonalidade agroclimática na região sul do Rio Grande do Sul, Brasil.

Engenharia Sanitaria e Ambiental, 25(6), 933–946. <https://doi.org/10.1590/s1413-4152202020190136>

NASCIMENTO, U. (1952). Estudo da regularização e proteção das barrocas de Luanda. Laboratório de Engenharia Civil. Publicação, n.30. 39 p, 1952.

NEARING, M.A., DEER-ASCOUGH, L., LAFLEN, J. M. (1990). Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. American Society of Agricultural Engineers, v.3, n.33, pages839–849.

NEARING, M.A.; FOSTER, G.R.; LANE, L.J.; FINKNER, S. (1989). A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. Transactions of the ASAE, 32 (5): 1587-1593.

NETELER, M.; MITASOVA, H. (2008) Open Source Gis a Grass Gis Approach. Third Edition. The International Series in Engineering and Computer Science. New York: Springer. v. 773, 406p., 2008. <https://doi.org/10.1080/13658816.2010.512275>

NYSSSEN, J., POESEN, J., MOEYERSONS, J., LUYTEN, E., VEYRET-PICOT, M., DECKERS, J., HAILE, M; GOVERS, G. (2002). Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the Northern Ethiopian Highlands. Earth Surface Processes and Landforms, 27(12), 1267–1283. <https://doi.org/10.1002/esp.404>

OBIECHEFU, G.C.; EGBUIKWEM, P.N.; EMERSON, K. U. (2020). Prediction of Soil Erosion of Imo State Soils by Their Infiltration Rates. International Journal of Research in Engineering, Science and Management, 6, 597–600. <https://doi.org/10.13031/aim.201900428>

OKA FIORI, C. (1980) Contribuição ao estudo das formações superficiais das quadrículas de Piracicaba e São Pedro. Dissertação (Mestrado em Geografia e Planejamento). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 121 p.

OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M. N. (1992). Classes Gerais de Solos do Brasil. Guia Auxiliar para seu Reconhecimento. Unesp/Funep, 2ªed, Jaboticabal, 523p, 1992.

OLIVEIRA, M. A. T.; MEIS, M. R. M. (1985). Relações entre geometria do relevo e formas de erosão linear acelerada, Bananal (SP). Geociências, v.4, p.87–89, 1985.

PAIVA, F.M.L; SANTOS, L.L; SRINIVASAN, V.S.; ARAGÃO, R.; SANTOS, C.A.G.; TAVEIRA, I. M. (2009). Aplicação do modelo WEPP em parcelas e microbacias no semi árido nordestino. p. 1-19.

PAN, F.; KING, A. W. (2012). Downscaling 1-km Topographic Index Distributions to a Finer Resolution for the TOPMODEL-Based GCM Hydrological Modeling. Journal of Hydrologic Engineering, 17, 243-251.

PANDEY, A., HIMANSHU, S. K., MISHRA, S. K., & SINGH, V. P. (2016). Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. Catena, 147, 595–620. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002>

PANDEY ASHISH; CHOWDARY V. M.; MAL B. C. (2009). Sediment Yield Modelling of an Agricultural Watershed Using MUSLE, Remote Sensing and GIS (Springer-Verlag (ed.)).

PEREIRA, J.S. (2014) Avaliação das perdas de solos por erosão laminar na área de influência da UHE Amador Aguiar I. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geografia, Universidade de Uberlândia, 167p, 2014.

PEREIRA, M. A. F. (2010). Processos Hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaço temporais no bioma Mata Atlântica. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Geografia, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 118p, 2010.

PEREZ FILHO, A; CARPI JUNIOR, S.Q.C. (2011). Gestão pública e riscos ambientais relacionados a processos erosivos: caso de São Pedro, São Paulo, Brasil. *Revista Territorium*, v.18, p.219–226.

PHINZI, K., & NGETAR, N. S. (2019). Land use/land cover dynamics and soil erosion in the Umzintlava catchment (T32E), Eastern Cape, South Africa. *Transactions of the Royal Society of South Africa*, 74(3), 223–237. <https://doi.org/10.1080/0035919X.2019.1634652>

PIERCE, F.J.; LAL, R. (1994). Cap. 10. Monitoring soil erosion's impact on crop productivity. In R. Lal (Ed.), *Soil Erosion Research Methods* (2º Edição, pp. 235–264).

PIERI, L.; BITTELI, M.; WU, Q. J.; DUN, S.; FLANAGAN, D.C.; PISA, P.R.; VENTURA, F.; SALVATORELLI, F. (2007). Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. *Journal of Hydrology*, 336, 84–97. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.014>

PIGA, F. G. (2017). Modelagem ambiental de áreas degradadas por processos erosivos, com vista ao planejamento ambiental, São Pedro e Santa Maria da Serra (SP). Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 125p, 2017.

PIJL, A.; QUARELLA, E.; VOGEL, T.A.; D'AGOSTINO, V.; TAROLLI, P. (2021) Remote sensing vs. field-based monitoring of agricultural terrace degradation. *International Soil and Water Conservation Research*, v.9, n.1, p.1-10, 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.09.001>

PIJL, A.; REUTER, L.E.H.; QUARELLA, E.; VOGEL, T.A.; TAROLLI, P. (2020) GIS-based soil erosion modelling under various steep-slope vineyard practices. *Catena*, v.193, 104604, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104604>

PIJL, A.; WANG, W.; STRAFFELINI, E.; TAROLLI, P. (2022) Soil and water conservation in terraced and non-terraced cultivations: an extensive comparison of 50 vineyards. *Land Degrad Dev*, v.33, p.596 - 610, 2022. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1002/ldr.4170>

PINHEIRO, L. S. (2008) Análise da dinâmica plúvio erosiva na bacia do córrego da Água Branca (SP). Dissertação. (Mestrado em Organização do Espaço). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 110 p, 2008.

PINHEIRO, M. R. (2009) Técnicas cartográficas e aerofotogramétricas no estudo da erosão: alta bacia do ribeirão Araquá – São Pedro e Charqueada (SP). Dissertação. (Mestrado em Ciências). Departamento de Geografia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 186 p.

- PINTO, C. S. B. (2014). Modelagem das respostas hidrológicas as mudanças de uso e cobertura da terra na bacia do Barro Branco /São José de Ubá (RJ). Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza - Instituto de Geociências - Departamento de Geografia - Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PRADO, H. (1995). Solos Tropicais - Potencialidades, limitações, manejo e capacidade de uso. Piracicaba, 166p.
- PRUSKI, F. (2006). Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. Viçosa, 2ªed, UFV, 240p, 2006.
- RANIERI, S. B. L. (2000). Estimativa da erosão do solo em uma bacia hidrográfica no município de Piracicaba (SP) utilizando os modelos USLE e WEPP. Universidade de São Paulo.
- RENARD, K. G., FOSTER, G. R., WEESIES, G. A., McCOOL, D. K., YODER, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; GLENN A.; WEESIES, G. A.; PORTER, J. . (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. Journal of Soil and Water Conservation January, v.46 (1), p.30-33, 1991.
- RENSCHLER, C. S. (2003). Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach. Hydrological Processes, v.17(5), p.1005-1017. <https://doi.org/10.1002/hyp.1177>
- RISER, J. (1995). Erosão e paisagens Naturais. Flammarion: Lisboa, 127p.
- RISSE, L.M.; NEARING, M. A. (1991). WEPP hillslope erosion model predictions for natural runoff plots. The University of Georgia;
- RODRIGUES, J.E. (1982). Estudos dos fenômenos erosivos acelerados, boçorocas. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 162p, 1982.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. (1997) Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Departamento de Geografia (FFLCH - USP). Laboratório de Cartografia Geotécnica – Geologia Aplicada - IPT/FAPESP, 1997. Escala 1:500.000.
- RUHE, R. V. (1975) Geomorphology. Houghton Mifflin Company, U.S, 1975, 246 p.
- SALEKIN, S.; BURGESS, J. H. ., & MORGENROTH, J.; MASON, E. G.; MEASON, D. F. (2018). A comparative study of three non-geostatistical methods for optimising digital elevation model interpolation. ISPRS International Journal of Geo-Information, 7(8), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ijgi7080300>
- SALOMÃO, F. X. T. (1994) Processos Erosivos em Bauru (SP): Regionalização Cartográfica Aplicada ao Controle Preventivo Urbano e Rural. Tese (Doutorado em Geografia Física). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994, 200p.

SAMPAIO, L. F.; OLIVEIRA, M.P.P.; CASSARO, R. RODRIGUES, V.G.S.; PEJON, O.J.; SIGOLO, J.B.; FERREIRA, V. M. (2016). Gully erosion, land uses, water and soil dynamics: a case study of Nazareno (Minas Gerais, Brazil). *DYNA*, 83(199), 198. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n199.54843>

SANCHEZ, M. C. (1969). Os municípios de São Pedro e Charqueada: aspectos de sua geografia agrária. Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Rio Claro (SP).

SANCHEZ, M. C. (1971). Contribuição ao conhecimento das bases naturais dos municípios de São Pedro e Charqueada (SP). *Notícia Geomorfológica*, v.11, p.21-22.

SANTANA, N.M.P.; CASTRO, S.S.; STONE, L.F.; SILVA, S.C. (2007). Chuvas, erosividade, erodibilidade, uso do solo e suas relações com focos erosivos lineares na alta bacia do rio Araguaia. *Sociedade & Natureza*, v.19, n.2, p. 103-121, 2007. <https://doi.org/10.1590/s1982-45132007000200007>

SANTORO, J.; FULFARO, V.J. (1996). Estudos Geotécnicos em Boçoroca na Cidade de São Pedro, São Paulo (SP). *Revista Instituto Geológico*, v.17, n.1/2, p.55-62, 1996. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19960003>

SANTORO, J. (1991) Fenômenos erosivos acelerados na região de São Pedro (SP): estudo da fenomenologia, com ênfase geotécnica. 1991. 140f. Dissertação. (Mestrado em Geociências e Análise Ambiental), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1991.

SANTOS, G.G.; NORI, P.G.; OLIVEIRA, L. F. C. (2010). Chuvas intensas relacionadas a erosão hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícolas e Ambiental*, v.14, n.2, p. 115-123.

SANTOS, J. C. N.; AANDRADE, E. M.; PALÁCIO, Q. H. A.; ARAÚJO NETO, J. R.; RIBEIRO FILHO, J. C. (2018). Erosive process control in the Brazilian semiarid region. *Revista Caatinga*, v.31(3), p.695-703. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n319rc>

SANTOS, I. (2001). Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia hidrográfica do rio Pequeno, São José dos Pinhais (PR). Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Paraná, 92f, 2001.

SCHAETZL, R.; ANDERSON, S. (2005). *Soil Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, New York., 2005.

SCHANZ, S. A.; MONTGOMERY, D. R. (2016). Lithologic controls on valley width and strath terrace formation. *Geomorphology*, v.258, p.58-68. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.01.015>

SELBY, M. J. (1993) *Hillslope materials and processes*. Oxford, New York, 1993, 451 p.

SIDORCHUK, A. (1999). Dynamic and static models of gully erosion. *Catena*, v.37(3-4), p.401-414. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00029-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00029-6)

SIGRH. (2011). Levantamento Pluviométrico do município de São Pedro (SP). Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos Do Estado de São Paulo.

<https://sigrh.sp.gov.br/relatoriosituacaodosrecursoshidricos>

SILVA, B.P.C.; SILVA, M.L.N.; BATISTA, P.V.G.; PONTES, L.M.; BISPO, D.A.F.; CURI, N. (2015). Aplicação do modelo de predição geoespacial da erosão GeoWEPP na sub-bacia do horto florestal Terra Dura. XXXV Congresso Brasileiro de Ciencia Do Solo.

SILVA, F.G.B.; CRESTANA, S. (2004). Reunião de modelos e formulações para análise de erosão de solos em bacias hidrográficas voltados ao planejamento ambiental. In V. ESPÍNDOLA, E.L.G.; SCHALCH (Ed.), *Bacia hidrográfica: diversas abordagens em pesquisa* (Rima).

SILVA, J.M.A.; FERNANDO F. PRUSKI, F.F; SILVA, D.D.; CECÍLIO, R. A. (2006). Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em encostas e canais. Parte I: Desenvolvimento e avaliação. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.26; n.3; pages 696–703.

SILVA, R.K.; RIBEIRO, G.N.; FRANCISCO, P.R.N.; MEDEIRO, P.C.; SILVA, A.M.; ROCHA, L. C. A. (2022). Mapeamento e análise da erosividade da chuva na sub-bacia do Alto Paraíba (Paraíba). *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.10, n.2. p.13-025.

SILVA, A.F. (2003). Mapeamento geotécnico e análise dos processos erosivos na bacia do córrego Tucum, São Pedro (SP), Escala 1:10.000. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Dissertação de Mestrado, 131 p. <https://doi.org/10.11606/D.18.2003.tde-10042007-110730>.

SILVA, A.M. (1999). Aplicações de técnicas de geoprocessamento no estudo das relações entre os processos erosivos e sedimentológicos de bacia hidrográfica. 1999. 269f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

SILVA, L.C.F. (1977). Fotointerpretação de redes de drenagem de dois solos do município de São Pedro (SP). Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 114p, 1977.

SILVA, M.A. (2015). Modelagem hidrológica e das perdas de solo: suas relações com as formas de relevo e uso do solo na bacia do rio Taperoá/PB. 2015. 103f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

SIMÕES, A.L.A.; BRITO, R.J.R.; SCHULZ, H.E.; PORTO, R.M.; LABOSCO, R. J. (2011). Aspectos numéricos e físicos de soluções das equações de Sant Venant. Conference: 6o Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia/3o Congresso de Engenharia de Moçambique, 1. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.13140/2.1.3672.1440>

SOBRINHO, V.R.A.S.; HOLANDA, F.S.R.; FONTES, C.S.; NASCIMENTO, I.M.A.; BISPO, J.L.; MARAMGUBA, A. I. A. (2016). Uso de Estacas para monitoramento da erosão na região de Baixo São Francisco na margem direita do Rio São Francisco. III Reunião Nordestina de Ciencia Do Solo.

SODRÉ, U. (2007). *Modelos Matemáticos*. Universidade Estadual de Londrina - UEL, Londria, 2007.

STABILE, R. A., VIEIRA, B. C. (2009). O Papel do ângulo da encosta e da forma das vertentes na distribuição das feições erosivas da bacia Água da Faca, Piratininga (SP). XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Unico(July).

STEINMANN, V.; MARI, L.; KERESZTURI, Á. (2020). Testing the SIMWE (Simulated Water Erosion) model on a Martian valley system. EGU - General Assembly, May. <https://doi.org/doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-204>.

STRAFFELINI, E; PIJL, A; OTTO, S; MARCHESINI, E; PITACCO, A; TAROLLI, P. (2022). A high-resolution physical modelling approach to assess runoff and soil erosion in vineyards under different soil managements. *Soil and Tillage Research*, v.222, 105418. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105418>

TAMENE, L.; VLEK, P. L. G. (2007). Soil erosion studies in Northern Ethiopia. In *Land use and soil resources*. (p.73-100).

TARBOTON, D.G., BRAS, R.L; RODRIGUEZ-ITURBE, I. (1991). On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*, v. 5: p. 81–100. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1002/hyp.3360050107>

TAROLLI, P; CAVALLI, M; MASIN, R. (2019). High-resolution morphologic characterization of conservation agriculture. *Catena*, 846–856. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.026>

TAVARES, A. A; MENDES JUNIOR, H; SPALEVIC, V; MINCATO, R. L. (2017). Modelos de Erosão Hídrica e Tolerância das Perdas de Solo em Latossolos Distróficos no Sul de Minas Gerais. *Geography Department University of Sao Paulo*, spe, 268. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132694>

TEDESCO, A; ANTUNES, A. F. B.; OLIANI, L. O. (2014). Detecção de formação erosiva (voçoroca) por meio de classificação hierárquica e por árvore de decisão. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.20(4), p.1005–1026. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000400055>

TERRA FOTO, S.A. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Economia e Planejamento, Plano Cartográfico do Estado de São Paulo. Carta Topográfica, Escala 1:10.000, São Pedro I (SF-23-Y-A-IV-1-NO-B), 1979.

THEULE, J. I.; LIEBAULT, F; LAIGLE, D; LOYE, A; JABOYEDOFF, M. (2015). Channel scour and fill by debris flows and bedload transport. *Geomorphology*, 243, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.003>

THORNE, C.R.; TOVEY, N. (1981). Stability of composite river banks. *Earth Surface Processes and Landforms*, V.6; P.469-484.

TONIOLO, B. P; MARTINS, P, B; COLLINS, C, S; ARAÚJO, M, G; PECHE FILHO, A; ÍRIO RIBEIRO, A. (2021). Análise espacial de perda de solo por erosão na Bacia Hidrográfica do Rio Jundiá-Mirim – SP. *Guaju*, 7(2), 209. <https://doi.org/10.5380/guaju.v7i2.76849>

TORRI, D. (1996). Slope, aspect and surface storage. In: AGASSI, M. (org.), *Soil erosion, conservation e rehabilitation*, Israel: Ministry of Agriculture Emek-Hefer. cap.5, p.77-106, 1996.

TRIMBLE, S. W. T.; MENDEL, A. C. (1995). The cow as a geomorphic agent. *Geomorphology*, 13, 233–253.

VARELLA, R.F; CAMPANA, N. (2000). Simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão: estudo do modelo TopModel. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.5.; n.4; p. 121–139.

VIEIRA, B.C. MARTINS, T. (2016). Modelos em geografia física: conceitos e aplicações na visão de escorregamentos. *GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)*, 20(1), 194. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2016.102616>

VIEIRA, W. C. (2006). Evolução de feições erosivas na microbacia do córrego Boa Vista, Prata (MG). Universidade Federal de Uberlândia.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. (1975). *Hidrologia Aplicada*. Editora Mc Graw Hill, São Paulo, 245p, 1975.

WANG, Y.; FAN, J.; CAO, L.; ZHEING, X.; REN, P.; ZHAO, S. (2018). The influence of tillage practices on soil detachment in the red soil region of China. *Catena*, 165(71), 272–278. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.011>

WARREN, S. D. (1998). Digital Terrain Modeling and Distributed Soil Erosion Simulation/Measurement for Minimizing Environmental Impacts of Military Training. US Army Corps of Engineers - Construction Engineering Research Laboratories, 48.

WILLIAMS, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*, p. 244–252, 1975.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA (Agriculture handbook, 537), 1978.

YAMANOUTH, G.R.B. (2003) Avaliação dos processos erosivos e das técnicas de controle e reabilitação - bacia do córrego do Espriado - São Pedro (SP). Dissertação. (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 177p, 2003. <https://doi.org/10.11606/D.18.2016.tde-11042016-161906>

YUKSEL, A.; AKAY, A.E.; GUNDOGAN, R.; REIS, M.; CETINER, M. (2008). Application of GeoWEPP for Determining Sediment Yield and Runoff in the Orcan Creek Watershed in Kahramanmaraş, Turkey. *Sensors*, n. 8, 1222-1236.

ZHANG, S; LIU, Y; LI, M; LIANG, B. (2016). Distributed hydrological models for addressing effects of spatial variability of roughness on overland flow. *Water Science and Engineering*, 9(3), 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2016.07.001>

ZIRAKBASH, T.; RYAN ADMIRAAL.; BORNINA, A.; ANDA, M.; BAHRI, P. A. (2020). Assessing Interpolation Methods for Accuracy of Design Groundwater Levels for Civil Projects. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(9), 04020042. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001982](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001982)

ZOCCAL, J. C. (2007). *Soluções: cadernos de estudos em conservação do solo e água*.

Companhia de Desenvolvimento Agrícola de São Paulo, Codasp, v.1, n.1, Presidente Prudente, 62p, 2007.

ZUQUETTE, L.V.; CARVALHO, J.A.R.; YAMANOUTH, G. R. B. (2007). Feições erosivas na bacia do córrego do Espriado, São Pedro (SP), seus tipos e evolução entre 1972-2002. *Revista Brasileira de Geociências*, v.37, n.2(2), p.414–425, 2007.

ZUQUETTE, L. V. (1987). Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras. Tese. Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 219p, 1987.

ZUQUETTE, L.V.P; PALMA, J. B. (2006). Avaliação da taxa de infiltração e escoamento superficial dos arenitos da Formação Botucatu. *Revista Brasileira de Geociências*, v.36(1), p.49–60, 2006.