

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

SUSCETIBILIDADE A PROCESSOS EROSIVOS LINEARES
APOIADA EM ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

MONIQUE DE PAULA NEVES

São Carlos

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

SUSCETIBILIDADE A PROCESSOS EROSIVOS LINEARES
APOIADA EM ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

MONIQUE DE PAULA NEVES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. José Augusto Di Lollo

São Carlos
2022

Neves, Monique de Paula

Suscetibilidade a processos erosivos lineares apoiada em análise estatística multivariada / Monique de Paula
Neves -- 2022.
211f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): José Augusto Di Lollo
Banca Examinadora: José Augusto Di Lollo, César Falcão
Barella, Osni José Pejon, Denise Balestrero Menezes,
Vandoir Bourscheidt
Bibliografia

1. Mapeamento geotécnico. 2. Erosão linear. 3.
Regressão logística . I. Neves, Monique de Paula. II.
Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Monique de Paula Neves, realizada em 30/03/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Augusto de Lollo (UNESP)



Documento assinado digitalmente
JOSE AUGUSTO DI LOLLO
Data: 05/04/2022 14:15:03-0300
Verifique em <https://verificador.it.br>

Prof. Dr. César Falcão Barella (UFOP)

Prof. Dr. Osni Jose Pejon (USP)

Profa. Dra. Denise Balestrero Menezes (UFSCar)

Prof. Dr. Vandoir Bourscheidt (UFSCar)

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à todas as pessoas e instituições que contribuíram para a conclusão deste trabalho, em especial:

À minha mãe Helenice, a quem dedico este trabalho, pelo imenso amor e incentivo constante para que eu pudesse realizar meus sonhos; obrigada por ser o *anjo que me acompanha!* À minha irmã Rebeca, por seu sorriso e cumplicidade; obrigada por ser *abrigo em laço!* Ao Gabriel, meu amor, por acreditar e sonhar comigo; obrigada pelas *pequenas alegrias!* Ao meu pai Cristian e meus avós, pelas orações e carinho. À minha família, todos, por torcerem por mim.

Ao professor Dr. José Augusto Di Lollo, pela orientação, confiança, e sobretudo, motivação nos momentos de incerteza. Aos professores da Universidade Federal de São Carlos, principalmente, Dr. Reinaldo Lorandi e Dr. Luiz Eduardo Moschini, pelo conhecimento transmitido. Ao pesquisador MSc. Gerson Salviano de Almeida Filho, pelas valiosas contribuições e acolhimento no IPT. À professora Dra. Cira Souza Pitombo, pela oportunidade de participar do curso de análise de dados multivariados. Por fim, aos membros da comissão avaliadora, Prof. Dr. César Barella, Prof. Dr. Osni Pejon, Profa. Dra. Denise Menezes e Prof. Dr. Vandoir Bourscheidt, que contribuíram com novas reflexões.

Ao Alex Silva, técnico-administrativo, por estar sempre disposto a ajudar.

À Yara, Heider, Cahio, Ana Flavia e Fernando, pela amizade e parceria. Aos colegas do PPGEU, em especial à Ana Flavia Padilha, Franciane Mendonça, Ileana Osório, Natália Arruda, Luciana Bernal e Natália Costa, pelos momentos de descontração e amizade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro. Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e à sua fundação (FIPT), pelo apoio financeiro e institucional, por meio do Programa Novos Talentos. Ao Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC), pela cessão das fotografias aéreas.

Finalmente, a Deus que sempre esteve presente.

“Durante toda a minha vida, as novas descobertas da natureza me alegraram como uma criança.”

Marie Curie

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise da suscetibilidade a erosão por meio da aplicação de análise estatística multivariada. A área de estudo compreende a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Meio, localizada no município de São Pedro (SP), caracterizada por processos erosivos lineares, com dinâmica evolutiva complexa. Com a finalidade de compreender a evolução das erosões ao longo de 50 anos, considerou-se quatro cenários temporais: 1960, 1972, 1988 e 2010. Os procedimentos metodológicos contemplaram quatro etapas principais: inventário de processos erosivos; obtenção dos atributos topográficos e hidrológicos em ambiente SIG; análise das condições topográficas mínimas de desencadeamento dos processos erosivos; e aplicação da técnica de regressão logística para avaliar a suscetibilidade à erosão. Os modelos de regressão logística apresentaram um bom desempenho, acurácia aceitável e auxiliaram a elaboração das cartas de suscetibilidade. Por meio da técnica de regressão logística foi possível compreender os principais fatores condicionantes, relacionados tanto com a deflagração quanto com a evolução das erosões. Os resultados indicaram que os materiais inconsolidados arenosos, declividade, fluxo acumulado, erosividade e uso do solo são as variáveis mais influentes na suscetibilidade à erosão. As cartas, baseadas em análise multivariada, retrataram de maneira satisfatória os locais potenciais à erosão e podem subsidiar os instrumentos de planejamento em escala regional. Por fim, os procedimentos realizados, em termos de desenvolvimento do modelo de regressão logística, se mostraram eficientes e podem contribuir com o diagnóstico de processos erosivos lineares.

Palavras-chave: erosão linear; regressão logística; carta de suscetibilidade; São Pedro.

ABSTRACT

The present study aims to evaluate erosion susceptibility using multivariate analysis. The study area is Ribeirão do Meio watershed situated in São Pedro (SP). Gully erosion is an active and complex process in this watershed. In this study, gully erosion was investigated over 50 years, using aerial photographs for the years: 1960, 1972, 1988 and 2010. The procedures of the current study were developed in four main steps: preparation of the erosion inventory; spatial analysis through GIS to obtain topographical and hydrological parameters; determination of topographic threshold (SxA) to obtain the gully initiation conditions; logistic regression (LR) analysis to evaluate the erosion susceptibility. The results showed that the logistic regression had overall fit and accuracy acceptable. Thus, these models were used to prepare erosion susceptibility maps. According to the results, the conditioning factors mainly were soil and sediments, slope, flow accumulation, rainfall erosivity and land use. The results also revealed that the map obtained is acceptable and indicated satisfactorily the erosion-prone areas. The susceptibility maps can represent an important tool for regional managers or planners. Finally, the procedures that were used, in terms of developing the logistic regression model, were efficient and can be used for other assessments of gully erosion.

Keywords: gully erosion; logistic regression; erosion susceptibility map; São Pedro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Precipitação diária x surgimento da erosão.....	27
Figura 2. Classificação das encostas quanto ao tipo de perfil.....	29
Figura 3. Processos erosivos localizados em área urbana: a) Botucatu; b) Campinas; c) São Pedro e d) São José do Rio Preto.	31
Figura 4. Colapso nas paredes laterais ao longo dos anos.	32
Figura 5. Formação e desenvolvimento de uma erosão na África.	33
Figura 6. Processos erosivos na paisagem.	34
Figura 7. Avanço das cabeceiras em uma bacia hidrográfica na Espanha (a) e efeito do uso do solo. (b).....	34
Figura 8. Procedimentos adotados na elaboração da carta de suscetibilidade.	36
Figura 9. <i>Upscaling</i> e <i>downscaling</i> baseado no <i>pixel</i>	40
Figura 10. Efeito do tamanho do <i>pixel</i> na representação da topografia.	41
Figura 11. Mapa da erosividade do estado de São Paulo para diferentes períodos.....	48
Figura 12. Mapas da erosividade anual do estado de São Paulo para os períodos de 1957-1977, 1977-1997 e 1997-2017.	48
Figura 13. Limiares críticos para predição da erosão.....	50
Figura 14. Variabilidade espacial da relação SxA	51
Figura 15. Limiar topográfico para erosões efêmeras na região do Mediterrâneo.	56
Figura 16. Comparação para os limiares topográficos obtidos em 1989 e 2006.	57
Figura 17. Limiares topográficos obtidos no estado de São Paulo.	58
Figura 18. Limiar topográfico considerando três classes de uso do solo.....	60
Figura 19. Limiar topográfico para erosões localizadas em três bacias hidrográficas.....	61
Figura 20. Áreas potenciais com diferentes relações $SxAxW$: (A) Vandaele et al. (1996); (B) Desmet e Govers (1997) e (C) Vandaele et al. (1997).	62
Figura 21. Áreas propensas a erosão conforme o uso do solo: (A) pastagem natural e (B) agrícola.....	62
Figura 22. Áreas propensas a erosão: limiar topográfico x mapa de suscetibilidade.....	63
Figura 23. Síntese das técnicas de análise multivariada.....	66
Figura 24. Curva logística.	68
Figura 25. Curva ROC e capacidade de discriminação do modelo.....	71
Figura 26. Carta de suscetibilidade elaborado com apoio do modelo de regressão logística. .	75

Figura 27. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Meio, em São Pedro (SP).	78
Figura 28. Pluviosidade média mensal no município de São Pedro (SP) para o período de 1962 a 2000.	79
Figura 29. Mapa de unidades do terreno.	80
Figura 30. Mapa de substrato rochoso.	82
Figura 31. Percentual de ocorrência das unidades de materiais inconsolidados.	83
Figura 32. Mapa de materiais inconsolidados.	84
Figura 33. Mapas de uso e ocupação do solo: cenários 1988, 1998, 2010 e 2020.	85
Figura 34. Percentual das classes de uso do solo: cenários 1988, 1998, 2010 e 2020.	85
Figura 35. Voçoroca na zona de chacreamento Alpes das Águas na BHRM em 2001 (a) e 2010 (b).	87
Figura 36. Processo erosivo na Bacia do Córrego Tucum: fotografias aéreas de 1962 (a) e 1972 (b).	88
Figura 37. Terraceamento no entorno do processo erosivo em 1991 (a) e rompimento da rodovia em 1995 (b).	88
Figura 38. Assoreamento de um reservatório da BHRM (a) e no Córrego do Tuncum (b).	89
Figura 39. Fotografia aérea do Córrego do Tuncum em 2013 (a) e detalhe dos taludes na feição erosiva (b).	90
Figura 40. Fluxograma com a estrutura geral dos métodos aplicados.	93
Figura 41. Procedimentos realizados em ambiente SIG para obtenção dos MDE, atributos topográficos e hidrológicos.	95
Figura 42. Mapa de localização dos postos pluviométricos.	97
Figura 43. Representação esquemática da mensuração de S e A.	99
Figura 44. Procedimentos realizados para obtenção do modelo de regressão logística.	103
Figura 45. Delimitação do <i>buffer</i> , área de contribuição e pontos aleatórios.	104
Figura 46. Inventário de feições erosivas da BHRM.	112
Figura 47. Fotografias aéreas destacando as regiões com processos erosivos mapeados em 1960, 1972, 1988 e 2010.	113
Figura 48. Feição erosiva em três cenários temporais: 1960, 1988 e 2010.	114
Figura 49. Feições erosivas localizadas em cabeceira de drenagem, em quatro cenário temporais distintos.	115
Figura 50. Encosta com presença de erosões no ano de 2010.	115
Figura 51. Locais selecionados para análise do avanço da cabeceira.	116

Figura 52. Perfis mostrando o avanço da cabeceira em diferentes regiões e períodos.	118
Figura 53. Ortomosaico (a); mapas de declividade (b) e fluxo acumulado (c).....	119
Figura 54. Ortomosaico e perfis topográficos.....	121
Figura 55. Características das voçorocas identificadas com fotos oblíquas de 2019.....	122
Figura 56. Gráficos SxA para os quatro cenários analisados: (a) 1960, (b) 1972, (c) 1988 e (d) 2010.....	126
Figura 57. Índice de erosividade (EI_{30}) e limiar de resistência do solo.	127
Figura 58. Relação entre o limiar de resistência (k) e valores da curva número ($S_{0,05}$).	130
Figura 59. Mapa de áreas críticas indicando os possíveis locais de desenvolvimento de erosões elaborado com a equação do limiar topográfico e b estimado.	132
Figura 60. Mapa de áreas críticas indicando os possíveis locais de desenvolvimento de erosões elaborado com a equação do limiar topográfico e expoente b fixo.....	133
Figura 61. Percentual de registros de erosão identificados na imagem de satélite de 2020 sobrepostos as áreas críticas.....	134
Figura 62. Curva ROC para os modelos de regressão logística B2.	165
Figura 63. Valores de probabilidade estimados pelo modelo de regressão logística B2 (1960) em função da declividade \times vegetação (a) e local (b).	166
Figura 64. Processos erosivos próximo de canais de drenagem no ano de 1960.....	167
Figura 65. Valores de probabilidade estimados pelo modelo de regressão logística B2 (1972) em função do fluxo acumulado \times material transportado associado à Formação Pirambóia (a) e local (b).	168
Figura 66. Processos erosivos na região dos materiais transportados associados à Formação Pirambóia no ano de 1972.....	169
Figura 67. Valores de probabilidade estimados pelo modelo de regressão logística B2 (1988) em função da declividade (a e b) e fluxo acumulado (c e d).....	170
Figura 68. Processos erosivos próximo dos canais de drenagem no ano de 1988.	171
Figura 69. Valores de probabilidade estimados pelo modelo de regressão logística B2 (2010) em função do SPI \times pastagem (a), material inconsolidado residual associado à Formação Pirambóia (b) e área urbana (c).	172
Figura 70. Processos erosivos identificados nas fotografias aéreas de 2010.	172
Figura 71. Valores de probabilidade estimados pelo modelo de regressão logística B2 (1988) em função da declividade (a e b) e fluxo acumulado (c e d).....	173
Figura 72. Cartas de suscetibilidade à erosão elaboradas com base nos modelos de regressão logística B2.....	176

Figura 73. Percentual de ocorrência das classes de suscetibilidade à erosão para as cartas de 1960 (a), 1972 (b), 1988 (c) e 2010 (d).	177
Figura 74. Percentual de pontos identificados nas fotografias aéreas de 1960 (a), 1972 (b), 1988 (c) e 2010 (d) sobrepostos as classes de suscetibilidade.	178
Figura 75. Registros de erosão identificados na imagem de satélite de 2020 (a) e carta de suscetibilidade à erosão elaborada com base nos modelos de regressão logística B2 (geral) para o cenário de 2020 (b).	180
Figura 76. Percentual de ocorrência das classes de suscetibilidade à erosão para o mapa de 2020 (a) e percentual de registros identificados na imagem de satélite de 2020 sobrepostos as classes de suscetibilidade (b).	180

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Relação entre erodibilidade e fatores condicionantes.	25
Quadro 2. Processos erosivos relacionados com ações antrópicas no estado de São Paulo. ...	31
Quadro 3. Métodos de interpolação disponíveis no <i>software</i> ArcGIS.	39
Quadro 4. Equações para auxiliar a definição da resolução espacial do MDE.	42
Quadro 5. Índices topográficos primários.	43
Quadro 6. Relação de autores que utilizaram índices secundários para avaliar a erosão.	45
Quadro 7. Equação de erosividade para o estado de São Paulo.	47
Quadro 8. Síntese dos métodos utilizados para obter declividade e área de contribuição.	54
Quadro 9. Modelos de regressão logística aplicados à erosão: local; objetivo e variáveis consideradas.	73
Quadro 10. Modelos de regressão logística aplicados à erosão: local; objetivo e variáveis consideradas.	74
Quadro 11. Pesquisas desenvolvidas no município de São Pedro com enfoque nos processos erosivos.	86
Quadro 12. Materiais e <i>softwares</i> utilizados na pesquisa.	92
Quadro 13. Características descritivas das variáveis dependente e independentes.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Limiar de resistência (k) e expoente (b) obtidos na literatura.	55
Tabela 2. Valores de AUC e capacidade de discriminação do modelo de regressão logística.	71
Tabela 3. Descrição das unidades do terreno.	81
Tabela 4. Classes de declividade.	96
Tabela 5. Valores da curva número (CN) para a área de estudo.	101
Tabela 6. Características do conjunto de dados em relação a variável dependente.	105
Tabela 7. Síntese do inventário de processos erosivos: percentual de ocorrência nas classes de material inconsolidado, uso do solo e local na encosta.	113
Tabela 8. Valores médios, mínimos e máximos dos parâmetros A e S em função do uso do solo para cada série temporal.	124
Tabela 9. Coeficientes k obtidos para cada série temporal com diferentes valores de b	128
Tabela 10. Matriz de correlação para o conjunto de dados P1 de 1960.	136
Tabela 11. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística P1 de 1960.	137
Tabela 12. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística P1 de 1960. ..	138
Tabela 13. Matriz de correlação para o conjunto de dados P1 de 1972.	138
Tabela 14. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística P1 de 1972.	139
Tabela 15. Teste de multicolinearidade para modelo de regressão logística P1 de 1972.	139
Tabela 16. Matriz de correlação para o conjunto de dados P1 de 1988.	140
Tabela 17. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística P1 de 1988.	141
Tabela 18. Teste de multicolinearidade para modelo de regressão logística P1 de 1988.	141
Tabela 19. Matriz de correlação para o conjunto de dados P1 de 2010.	141
Tabela 20. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística P1 de 2010.	142
Tabela 21. Teste de multicolinearidade para modelo de regressão logística P1 de 2010.	142
Tabela 22. Matriz de correlação para o conjunto de dados P1 geral.	143
Tabela 23. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística P1 geral.	143
Tabela 24. Teste de multicolinearidade para modelo de regressão logística P1 geral.	144
Tabela 25. Síntese dos modelos de regressão logística P1.	145

Tabela 26. Matriz de correlação para o conjunto de dados B2 de 1960.	146
Tabela 27. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística B2 de 1960.	146
Tabela 28. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística B2 de 1960...	147
Tabela 29. Matriz de correlação para o conjunto de dados B2 de 1972.	147
Tabela 30. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística B2 para o cenário de 1972.	148
Tabela 31. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística B2 de 1972...	148
Tabela 32. Matriz de correlação para o conjunto de dados B2 de 1988.	149
Tabela 33. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística B2 para o cenário de 1988.	150
Tabela 34. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística B2 de 1988...	150
Tabela 35. Matriz de correlação para o conjunto de dados B2 de 2010.	151
Tabela 36. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística B2 para o cenário de 2010.	151
Tabela 37. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística B2 de 2010...	152
Tabela 38. Matriz de correlação para o conjunto de dados B2 geral.	153
Tabela 39. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística B2 geral.	153
Tabela 40. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística B2 geral.....	154
Tabela 41. Síntese dos modelos de regressão logística B2.	155
Tabela 42. Matriz de correlação para o conjunto de dados A2 de 1960.	157
Tabela 43. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística A2 de 1960.....	157
Tabela 44. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística A2 de 1960...	157
Tabela 45. Matriz de correlação para o conjunto de dados A2 de 1972.	158
Tabela 46. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística A2 de 1972.....	158
Tabela 47. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística A2 de 1972...	159
Tabela 48. Matriz de correlação para o conjunto de dados A2 de 1988.	159
Tabela 49. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística A2 de 1988.....	160
Tabela 50. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística A2 de 1988...	160
Tabela 51. Matriz de correlação para o conjunto de dados A2 de 2010.	160

Tabela 52. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística A2 de 2010.....	161
Tabela 53. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística A2 de 2010...	161
Tabela 54. Matriz de correlação para o conjunto de dados A2 geral.	162
Tabela 55. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística A2 geral.....	163
Tabela 56. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística A2 geral	163
Tabela 57. Síntese dos modelos de regressão logística A2.....	164

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos.....	19
1.2 Hipótese	20
1.3 Estrutura da tese	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Processos erosivos	21
2.2 Mapeamento geotécnico e suscetibilidade à erosão.....	35
2.3 Modelo digital de elevação	37
2.4 Índices de erosão	42
2.5 Limiar topográfico	49
2.6 Análise multivariada de dados	63
3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	78
3.1 Aspectos do meio físico	79
3.2 Aspectos do meio antrópico.....	84
3.3 Processos erosivos em São Pedro (SP).....	86
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	91
4.1 Inventário de feições erosivas	93
4.2 MDE e atributos derivados.....	94
4.3 Índice de erosividade	97
4.4 Limiar topográfico: procedimentos iniciais, efeitos do uso do solo e representação espacial das áreas críticas	98
4.5 Modelo de regressão logística: desenvolvimento e carta de suscetibilidade	101
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	111
5.1 Inventário dos processos erosivos	111
5.2 Limiar Topográfico	124
5.3 Modelos de regressão logística	135
6. CONCLUSÕES	183
6.1 Quanto aos aspectos metodológicos.....	183
6.2 Quanto a dinâmica de processos erosivos.....	184
6.3 Considerações finais.....	185
REFERÊNCIAS	187

1. INTRODUÇÃO

A erosão no solo é um dos processos geodinâmicos responsáveis pela degradação ambiental e pode ocasionar alteração do relevo, alteração dos canais de drenagem, assoreamento de cursos d'água, lagos e reservatórios, entre outras modificações que podem levar a uma completa descaracterização do meio físico. Além do mais, as ações antrópicas, como uso inadequado do terreno, remoção da cobertura vegetal e ausência/ou deficiência dos sistemas de drenagem, podem condicionar processos erosivos acelerados, assim como perdas ambientais, econômicas e sociais (GUERRA, 1998; PEJON, 1992; ROTTA; ZUQUETTE, 2015).

No Brasil, a diversidade de formas de relevo, condições climáticas, substrato rochoso e manejo do solo influenciam tanto no surgimento quanto na evolução das erosões. Logo, a erosão no solo é comum em quase todo o território nacional e o nível de degradação decorrente desses processos varia conforme a erosividade da chuva, erodibilidade do solo e tentativas de recuperação. Na porção central do estado de São Paulo, as características litológicas de certas unidades litoestratigráficas do substrato rochoso (arenoso), condições de relevo e o uso inadequado do terreno propiciaram a formação de sulcos, ravinas e voçorocas (IPT, 2012).

Assim, pesquisas acerca dos processos erosivos são necessárias para compreender melhor os condicionantes associados com a origem e evolução desses processos. Devido à sua natureza geodinâmica, é importante levar em conta as características naturais e antrópicas, bem como as possíveis inter-relações entre os fatores condicionantes. São esses estudos que poderão fornecer novas perspectivas sobre as aptidões e limitações do terreno, bem como soluções para restabelecer o equilíbrio dos processos nos meios físico, biológico e antrópico.

Nesse contexto, a literatura mostra que diferentes estudos foram desenvolvidos considerando modelos de erosão para a estimativa da perda de solo, bem como para a deposição e produção de sedimentos (WISCHMEIER; SMITH, 1965; NEARING et al. 1989; MORGAN et al. 1998). Ademais, também foram desenvolvidos modelos para identificar as condições críticas para o desencadeamento da erosão, a partir da relação entre área de contribuição e declividade (PATTON; SCHUMM, 1975; MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; TORRI; POSEN, 2014), assim como procedimentos metodológicos para a elaboração do mapeamento geotécnico (IAEG, 1976; ZUQUETTE, 1993; CERRI et al. 1996).

Além dessas pesquisas, nos últimos anos, a avaliação de áreas suscetíveis à erosão tem sido realizada com apoio de técnicas de análise multivariada de dados (DEWITTE et al. 2015;

DEBANSHI & PAL, 2018; ROY et al. 2020; GOSH; MAITI, 2021). Entre as técnicas multivariadas, a regressão logística binária demonstra ser eficiente, pois consegue descrever a relação entre presença ou ausência de erosão (variável dependente) e um conjunto de fatores predisponentes (LUCÀ et al. 2011).

Sendo assim, os modelos de regressão logística podem ser aplicados para explicar o impacto de um conjunto de variáveis, como relevo, substrato rochoso, vegetação, chuva e uso do solo, na ocorrência da erosão. Além disso, esses modelos representam importantes ferramentas para avaliar a suscetibilidade à erosão (GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al. 2015). Dessa forma, os modelos de regressão logística apresentam grande potencial para a elaboração de documentos cartográficos, como as cartas de suscetibilidade, que representam os locais propensos à erosão (ARABAMERI et al. 2019; RAZAVI-TERMEH et al. 2020).

Para a aplicação dessa técnica, é fundamental selecionar áreas de estudo das quais se disponha de um conhecimento prévio e um número considerável de registros de erosão, pois, na regressão logística, o tamanho da amostra é importante (HAIR et al. 2014). Nesse sentido, a área de estudo desta pesquisa compreende a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Meio (BHRM), localizada no município de São Pedro (SP), cujos processos erosivos foram estudados por Gomes (2002), Dantas-Ferreira (2008), Araújo (2011) e Neves (2017), com ênfase na suscetibilidade, diagnóstico geotécnico e parâmetros morfométricos.

Considerando a importância de aprimorar o entendimento acerca dos condicionantes naturais e antrópicos dos processos erosivos na BHRM, por meio desta pesquisa analisou-se a aplicação da regressão logística na avaliação da suscetibilidade à erosão. Em suma, a relevância desta pesquisa está relacionada com a aplicação da técnica em quatro situações temporais diferentes, (1960, 1972, 1988 e 2010), possibilitando, assim, uma compreensão sobre a dinâmica da deflagração dos processos erosivos.

1.1 Objetivos

A pesquisa desenvolvida fundamentou-se em outras investigações geotécnicas e ambientais desenvolvidas na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Meio, buscando complementar o conhecimento sobre a dinâmica dos processos erosivos em quatro cenários temporais (1960, 1972, 1988 e 2010). Assim, a presente pesquisa teve como objetivo principal estudar a aplicação da técnica de regressão logística, quanto aos procedimentos e às adaptações necessárias, a fim de delinear a suscetibilidade à erosão.

Para alcançar a finalidade principal, foram propostos os seguintes objetivos específicos: (i) analisar a variação das condições de desencadeamento utilizando o método do limiar topográfico (declividade *versus* área de contribuição); (ii) aplicar a técnica de regressão logística binária, para caracterizar os principais fatores condicionantes dos processos erosivos ao longo dos cenários temporais; (iii) elaborar documentos cartográficos para representar as classes de predisposição do terreno à erosão.

1.2 Hipótese

A contextualização sobre o tema e procedimentos metodológicos permite formular hipóteses que justificam o desenvolvimento desta pesquisa: (i) as mudanças do uso do solo, entre o período de 1960 a 2010, podem ter modificado as condições de desencadeamento da erosão, assim como a relação entre declividade e área de contribuição; (ii) os modelos de regressão logística representam uma abordagem complementar no entendimento da dinâmica da erosão, e podem explicar a relação entre esses processos e um conjunto de fatores condicionantes; (iii) esses modelos podem auxiliar na elaboração de produtos cartográficos e assim, complementar a compreensão acerca do comportamento dos terrenos frente à suscetibilidade à erosão.

1.3 Estrutura da tese

A tese foi estruturada em seis capítulos, além da introdução (capítulo I):

- Capítulo II: compreende a revisão bibliográfica a respeito dos processos erosivos e métodos aplicados na literatura.
- Capítulo III: apresenta as características gerais do meio físico e antrópico da BHRM, bem como um histórico sobre as pesquisas desenvolvidas no município de São Pedro (SP).
- Capítulo IV: engloba os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa, bem como os materiais e *softwares*.
- Capítulo V: apresenta a análise dos resultados obtidos, organizados em três subcapítulos (inventário, limiar topográfico e modelos de regressão logística).
- Capítulo VI: traz uma síntese dos aspectos metodológicos, dinâmica dos processos erosivos, bem como as conclusões obtidas e sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos erosivos

Este subcapítulo aborda os aspectos conceituais e a fundamentação teórica a respeito dos processos erosivos, objeto de estudo deste trabalho. Trata-se dos conceitos, fatores condicionantes, bem como das características do desenvolvimento e da evolução de erosões lineares.

2.1.1 Aspectos conceituais

O termo erosão é utilizado na geologia para caracterizar os processos de delineamento da paisagem, que ocorrem devido à desagregação de partículas do solo ou da rocha em função da ação dos agentes erosivos. Esse processo varia no tempo e no espaço e ocorre quando as forças que atuam removendo e transportando os materiais excedem as forças resistentes (ZACHAR, 1982).

Segundo Morgan (2005), a erosão dos solos é um processo que ocorre em três etapas principais: remoção das partículas (*detachment*) devido ao impacto da gota; transporte do material removido pela ação dos agentes erosivos e, quando não há mais energia suficiente para transportar as partículas, ocorre a terceira fase, caracterizada pela deposição do material.

Os principais agentes deflagradores da erosão são água, vento e gelo que causam, respectivamente erosão hídrica, eólica e glacial. O grau de severidade da erosão depende da quantidade de material removido e da capacidade de transporte desses agentes. Para Morgan (2005), a chuva caracteriza-se como o principal agente deflagrador, devido principalmente, à ocorrência de eventos extremos e ciclos de umidificação e secagem.

De acordo com Zachar (1982), a erosão hídrica ocorre devido à ação da água que mobiliza e transporta as partículas de solo. Mais precisamente, esse tipo de erosão pode ser causado por diferentes fontes, como água da chuva (erosão pluvial), água de rios (erosão fluvial), água de lagos (erosão lacustre) e água do mar (erosão marinha).

Para compreender o processo da erosão hídrica, deve-se levar em consideração as características relacionadas com os mecanismos de infiltração, armazenamento e geração do *runoff*, que condicionam o escoamento superficial e subsuperficial, bem como o *piping* e efeito *splash* (GUERRA, 1998; MORGAN, 2005).

a) Infiltração e armazenamento

Durante um evento chuvoso, parte da água cai diretamente sobre o solo e gera um impacto devido à ação da gota da chuva, causando um processo denominado erosão por salpicamento (*splash*). Em seguida, ocorre o processo de infiltração e, quando a intensidade da chuva excede a capacidade de infiltração do solo, inicia-se o escoamento superficial. Em suma, o escoamento superficial é controlado pelas taxas de infiltração, que variam durante a precipitação e depende das características dos solos (HORTON, 1945; GUERRA, 1988; MORGAN, 2005).

Segundo Morgan (2005), solos de textura grossa, como areia e cascalho, apresentam taxas de infiltração mais altas, devido aos espaços maiores entre os grãos. Todavia, é importante considerar que essas condições podem mudar para solos tropicais. Além disso, textura, estrutura, grau de compactação, teor de umidade, forma do perfil e densidade da vegetação também podem afetar as taxas de infiltração.

b) Escoamento superficial

O escoamento superficial causado pelo excesso de água da chuva forma um fluxo disperso e sem canais definidos. Esse tipo de escoamento quase sempre acontece, sob condições de chuva prolongada ou intensa, que possui maior capacidade erosiva devido à interação entre o fluxo de água e as gotas e, portanto, pode condicionar a erosão laminar ou intersulcos (GUERRA, 1998). Para Vilar e Prandi (1993), raramente o fluxo ocorre na forma de uma lâmina de água com profundidade uniforme, portanto, o termo mais adequado para caracterizar esse tipo de processo é erosão intersulcos.

De acordo com Guerra (1998) e Morgan (2005), esse tipo de erosão acontece com mais frequência em áreas agrícolas devido à mecanização das lavouras e à diminuição do teor de matéria orgânica no solo. Além do mais, solos arenosos são mais suscetíveis a erosão intersulcos, pois normalmente apresentam menor resistência à ação da gota da chuva e do escoamento superficial.

Segundo Horton (1945), as zonas de fluxo ao longo da encosta são distribuídas da seguinte forma: o topo caracteriza-se como uma área sem fluxo; a uma certa distância do topo ocorrem as zonas de acúmulo de água e o início do fluxo, que condicionam o surgimento dos sulcos. Logo, na porção mais baixa da encosta a profundidade do fluxo tende a aumentar e, normalmente, isso ocorre de forma canalizada, originando as ravinas.

Os sulcos caracterizam-se por pequenas incisões com até 0.5 m de profundidade e, geralmente, estão associadas a trilhas de gado ou locais onde há movimentação de solo. Essas feições podem ser recuperadas com operações agrícolas convencionais, como preparo do solo, plantio em curva de nível e terraços (MORGAN, 2005).

De acordo com Guerra (1998), as ravinas se formam devido à ação do fluxo turbulento, que ocorre em razão do aumento da velocidade da água e o aumento do gradiente hidráulico, por sua vez, é diretamente proporcional à intensidade da chuva e à declividade do terreno. Para Morgan (2005), esse tipo de erosão não apresenta conexão com a rede de drenagem e, excepcionalmente, uma ravina pode evoluir para um canal de drenagem permanente. Nesse sentido, as principais características hidráulicas relacionadas com o processo de formação das ravinas são: escoamento superficial difuso e escoamento superficial concentrado em pontos preferenciais.

Destaca-se que o desmatamento, uso agrícola intenso, associado com chuvas concentradas em períodos nos quais os solos estão descobertos, bem como concentração de fluxo em rodovias e áreas urbanas podem favorecer o desenvolvimento das ravinas, contribuindo para a remoção e o transporte de grandes volumes de solo (GUERRA, 1998).

c) Escoamento subsuperficial

Quando o escoamento subsuperficial ocorre de forma concentrada, ele pode favorecer o colapso das estruturas superficiais do solo e resultar na formação de processos erosivos complexos, denominados voçorocas. Segundo Guerra (1998), esse tipo de erosão possui paredes laterais íngremes, fundo chato e, durante eventos chuvosos, pode ocorrer fluxo de água no seu interior. Além do mais, dependendo da profundidade, as voçorocas podem atingir o nível d'água.

As voçorocas são feições de característica permanente na encosta, definidas como um processo erosivo acelerado que ocasiona a instabilidade de paisagens (MORGAN, 2005). Para Salomão e Iwasa (1995), as voçorocas possuem elevada capacidade de destruição, devido aos processos relacionados com a sua evolução, como erosão interna (*piping*), escorregamento e colapso.

Segundo Guerra (1998), a ação erosiva da água nas bases e paredes laterais de uma ravina pode favorecer o alargamento e aprofundamento dessas feições, originando feições mais complexas, como as voçorocas. Além disso, antigos deslizamentos também podem dar origem às voçorocas, principalmente quando ocorre escoamento superficial concentrado nas cicatrizes.

A ocorrência das voçorocas está associada a eventos de chuva intensa, propriedades do solo e ação antrópica, como desmatamento, uso agrícola intenso, extensas áreas de pastagem e queimadas, que condicionam a ocorrência de processos acelerados, em taxas superiores à erosão natural (GUERRA, 1998).

Nesse sentido, as voçorocas podem causar alterações que modificam os componentes ambientais, como remoção de material geológico em grande volume e assoreamento de canais e lagos. Esses processos podem ocorrer em cadeia e, portanto, condicionam perdas associadas à degradação ambiental, como redução do volume de água armazenado, perda de qualidade da água, alteração da biodiversidade e redução da produtividade (ZUQUETTE et al. 2013).

d) Piping

O *piping* se caracteriza pela formação de dutos ou túneis em subsuperfície, com diâmetros que variam de poucos centímetros até vários metros. Eles ocorrem em ambientes variados e, estão relacionados com condições geoquímicas e hidráulicas, que ocasionam a dissolução e o carreamento de minerais em subsuperfície. Além disso, sua ocorrência está relacionada com a variação da textura do solo e o decréscimo da permeabilidade (GUERRA, 1998; MORGAN, 2005).

Segundo Guerra (1998), a presença desses dutos ocasiona o transporte de uma grande quantidade de material, resultando no colapso de solos superficiais. Esse tipo de processo pode dar origem às voçorocas ou provocar sua ampliação, quando ocorrem ao longo das paredes laterais. Os dutos formados podem, ainda, condicionar o fluxo de água em zonas preferenciais, ocasionando a remoção e o transporte dos sedimentos.

e) Splash e formação de crostas

Como descrito nos parágrafos anteriores, a erosão por *splash* ocorre devido ao impacto da gota da chuva. Segundo Bull e Kirkby (1997), a gota da chuva pode causar tanto o impacto no solo, como também favorecer o processo de selamento da superfície (*sealing*), que se caracteriza pela formação de uma crosta mais resistente à ação da gota da chuva. Entretanto, segundo Guerra (1998), como as crostas diminuem bastante a infiltração de água no solo, há uma tendência de formação do escoamento superficial, que pode ocasionar ao longo dos anos a remoção de sedimentos à medida que sua velocidade aumenta.

2.1.2 Fatores condicionantes

Os fatores condicionantes da erosão são aqueles que determinam as variações nas taxas de erosão e podem ser subdivididos em erosividade (causada pela chuva), erodibilidade (propriedades do solo), características das encostas e cobertura vegetal. A interação entre esses fatores, associada à ação antrópica, pode agravar a ocorrência da erosão, condicionando processos acelerados (GUERRA, 1998).

Dessa forma, para compreender o surgimento de processos erosivos e a maior ou menor suscetibilidade de algumas áreas, bem como a sua ocorrência de forma acelerada, é fundamental estudar esses fatores, analisando, ainda, as possíveis interações que podem surgir em cada local. O Quadro 1 apresenta uma relação geral entre as características dos fatores condicionantes e a erodibilidade.

Quadro 1. Relação entre erodibilidade e fatores condicionantes.

Fatores	Alta erodibilidade	Média erodibilidade	Baixa erodibilidade
Natureza dos terrenos	Materiais arenosos.	Materiais com predomínio de finos (silte e argila).	Materiais argilosos.
Relevo	Declividade maior que 12%, encostas convexas com alta extensão.	Declividade entre 6 e 12%; encostas côncavas de média extensão.	Declividade menor que 6%; encostas côncavas com extensa variação.
Cobertura vegetal	Culturas anuais; terrenos sem cobertura vegetal.	Culturas semi perenes.	Cobertura vegetal natural ou com reflorestamento.
Ação antrópica	Ocupação desordenada; sem medidas de proteção.	-	Ocupações em conformidade com as condições do meio físico e existência de medidas de proteção; ou sem ocupação.
Fatores climáticos	Grandes volumes de água em períodos curtos.	-	Volumes distribuídos uniformemente durante o ano.

Fonte: Adaptado de Zuquette (1987).

a) Erosividade da chuva

A erosividade corresponde ao potencial da chuva de causar a perda de solo por unidade de área, devido à desagregação e ao transporte das partículas de solo (LAL, 1994). Essa capacidade depende das características da chuva (distribuição e tamanho da gota), do relevo e do solo. Se considerarmos apenas o efeito da chuva e as demais características como constantes, a perda de solo tende a ser proporcional à energia cinética e à intensidade máxima da chuva (LOMBARDI NETO; MOLDENHAUER, 1992; WISCHMEIER; SMITH, 1958).

Nesse sentido, para avaliar a capacidade da chuva de causar erosão, são utilizados os seguintes fatores pluviométricos: intensidade, duração e frequência. A intensidade é considerada a característica mais importante, pois influencia tanto nas taxas de infiltração como no escoamento superficial. A duração condiciona os processos de infiltração e formação de enxurradas; e a frequência, assim como a intensidade, influencia na taxa de infiltração, teor de umidade e volume do escoamento superficial (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990; GUERRA, 1998).

Para avaliar a energia cinética, ou seja, a força que uma partícula possui para impactar o solo, Wischmeier e Smith (1958) consideram o produto entre energia cinética e intensidade máxima da chuva em 30 minutos Equação 1. De modo semelhante, para regiões tropicais e subtropicais, Hudson (1977) propôs uma adaptação, considerando a intensidade máxima de 25.4 mm ou maiores (Equação 2).

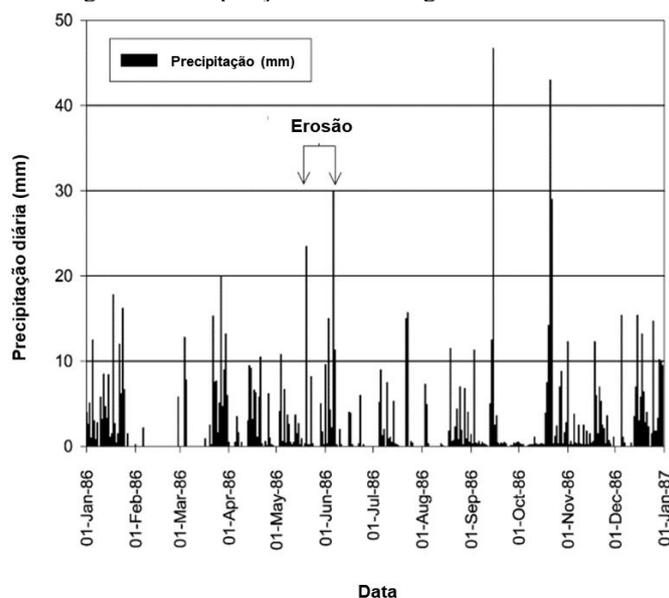
$$EC = 0.0119 + 0.0873 \log_{10} I \quad \text{Equação 1}$$

$$EC = 0.298 \left(1 - \frac{4.29}{I} \right) \quad \text{Equação 2}$$

em que: EC é a energia cinética (joules/m²/mm); I é a intensidade máxima da chuva (mm/h).

Além desses fatores, é importante destacar que o surgimento das erosões muitas vezes está associado a eventos de chuva extremos, conforme apresentado na Figura 1, que mostra uma análise realizada na Bélgica considerando dados meteorológicos de 1986 a 1999 (NACHTERGAELE *et al.* 2002). Além do potencial de desencadear novas feições, chuvas intensas também podem contribuir com a evolução das feições existentes.

Figura 1. Precipitação diária x surgimento da erosão.



Fonte: Adaptado de Nachtergaele et al. (2002).

b) Propriedades do solo

A erodibilidade corresponde à resistência do solo à desagregação e ao transporte, e está relacionada com textura, estrutura, teor de matéria orgânica, porosidade, mineralogia das argilas e composição química (LAL, 1994). Segundo Morgan (2005), a erodibilidade não é estática ao longo do tempo, pois os solos podem passar por processos de evolução que modificam suas propriedades, tornando-os mais ou menos resistente aos processos erosivos.

No meio geotécnico, para avaliar o potencial à erosão dos solos, utiliza-se frequentemente no Brasil, o índice de erodibilidade proposto por Nogami e Vilibor (1979) e modificado por Pejon (1992), conforme a Equação 3, sendo $E < 1$ característico de materiais erodíveis; e $E > 1$ solos com baixa erodibilidade.

$$E = 40S/P \quad \text{Equação 3}$$

em que: S é o índice de absorção de água; e P a perda de água por imersão.

De acordo com Salomão e Iwasa (1995), Guerra (1998) e Morgan (2005), as propriedades do solo relacionadas com a erodibilidade interferem principalmente na capacidade de infiltração, absorção e no fluxo do escoamento superficial. Entre as principais propriedades, pode-se citar: textura, estrutura, matéria orgânica, porosidade e composição química.

A textura afeta a erosão devido à maior ou menor capacidade de remoção das partículas, por isso, solos finos são mais resistentes em virtude da coesão entre as partículas. A estrutura, influencia tanto na capacidade de infiltração e absorção de água como na remoção dos sedimentos. A matéria orgânica, em conjunto com outras propriedades, contribui para a formação de agregados, que conferem maior estabilidade e, portanto, maior resistência do solo. A porosidade interfere diretamente nas taxas de infiltração e a composição química favorece a formação de agregados devido à ligação química entre os minerais, conferindo maior ou menor resistência (SALOMÃO; IWASA, 1995; GUERRA, 1998; MORGAN, 2005).

Segundo Salomão e Iwasa (1995) e Morgan (2005), espessura das camadas e umidade também devem ser consideradas. A espessura interfere na capacidade de infiltração e na formação do *runoff*; além do mais, a alteração das propriedades entre os horizontes, como textura e permeabilidade, pode conferir maior ou menor suscetibilidade à erosão. E a umidade enfraquece os agregados e diminui a coesão entre as partículas.

c) Cobertura vegetal

A cobertura vegetal protege o solo contra a erosão de diferentes maneiras: folhas e caules absorvem parte da energia da gota da chuva, reduzindo o impacto direto sobre o solo; parte da chuva é interceptada pelo dossel e retorna à atmosfera devido à evaporação; as raízes contribuem com a resistência mecânica e infiltração da água no solo; e a presença de serrapilheira favorece a formação da matéria orgânica humidificada. Dessa forma, a presença da vegetação atua principalmente no aumento das taxas de infiltração de água no solo e na redução do volume do *runoff* (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990; GOMES, 1998; MORGAN, 2005).

O efeito positivo da vegetação depende do percentual de cobertura vegetal. Nesse sentido, segundo Torri e Poesen (2014), paisagens com alta densidade de vegetação promovem um ganho na resistência do solo, pois aumentam a capacidade de retenção de água; retardam o selamento da superfície (*sealing*); favorecem a estabilização dos agregados do solo devido a presença de matéria orgânica; assim como as raízes aumentam a macro porosidade e a capacidade de infiltração.

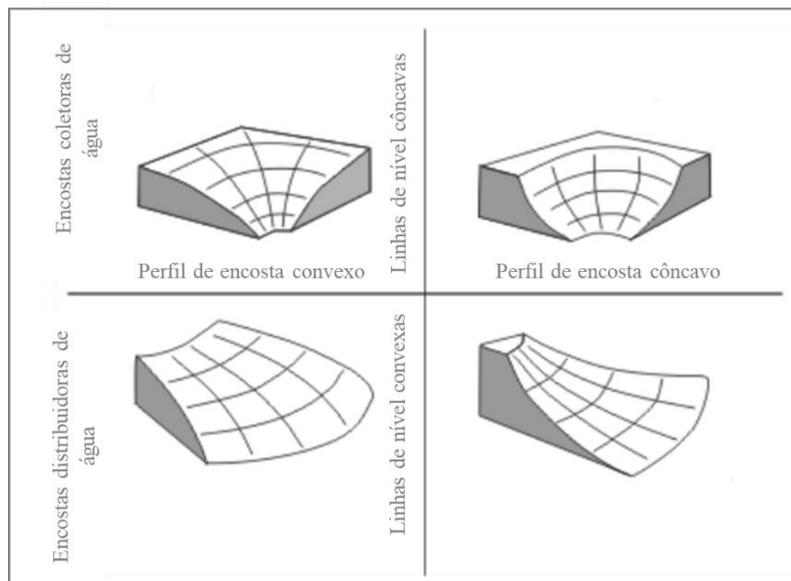
Assim, nota-se que vegetação se caracteriza como principal fator de proteção do solo e sua presença em áreas suscetíveis é fundamental. Segundo Morgan (2005), nesses locais, um percentual adequado de vegetação capaz de garantir uma boa proteção do solo seria de 70%, entretanto, um nível de proteção razoável pode ser alcançado com 30 a 40%. Esses valores

podem variar em função das propriedades do solo e a efetividade da proteção depende das características da vegetação.

d) Característica do relevo

Declividade, comprimento de rampa e forma de encosta são características que influenciam fortemente na distribuição do escoamento superficial, sendo, portanto, fatores fundamentais no estudo da suscetibilidade à erosão (GUERRA, 1998). Tanto a declividade como o comprimento de rampa influenciam na velocidade e no volume do escoamento superficial; assim como a forma da encosta influencia na sua distribuição, como mostra a Figura 2.

Figura 2. Classificação das encostas quanto ao tipo de perfil.



Fonte: Adaptado de Bloom (1970).

Segundo Santoro (1991), em relação a forma, observa-se que as encostas côncavas são mais relacionadas à formação de voçorocas, pois propiciam a formação do escoamento superficial concentrado. Contudo, o efeito destas características deve ser analisado em conjunto com as propriedades do solo, pois também afetam a velocidade do escoamento e taxa de remoção das partículas (GUERRA, 1998).

Segundo Morgan (2005), se o comprimento de rampa aumenta à medida que os terrenos se tornam mais íngremes e as taxas de infiltração permanecem altas, a erosão tende a diminuir. Da mesma forma, se a declividade diminui à medida que o comprimento de rampa aumenta, a perda de solo também tende a ser menor. Portanto, existe uma variedade de condições que

influencia no escoamento superficial e não é possível determinar uma única relação entre perda de solo, declividade e comprimento da encosta.

De acordo com Poesen et al. (2003), a declividade controla o local onde as erosões começam na paisagem, enquanto a presença de concavidades interfere diretamente na trajetória e na deposição dos sedimentos.

e) Intervenção antrópica

Os processos erosivos desencadeados por fatores naturais apresentam como principal característica taxas de remoção e perda de sedimentos em equilíbrio com a dinâmica natural da paisagem. Por outro lado, a interação entre as características do meio físico e os fatores antrópicos pode favorecer a ocorrência de processos acelerados, em taxas superiores à erosão natural, ocasionando a degradação ambiental (ROTTA; ZUQUETTE, 2015).

Segundo Poesen et al. (2003) e Santoro (2009), as principais atividades humanas que condicionam processos erosivos acelerados são: desmatamento; uso excessivo de áreas agrícolas; ausência de práticas de conservação do solo; áreas de pastagem; abertura de estradas e loteamento sem execução de obras de drenagem; queimadas e mineração. Além do mais, a intervenção antrópica pode modificar as características naturais das bacias hidrográficas, alterando a relação entre o escoamento superficial e a capacidade de armazenamento de água no solo.

Nesse sentido, a ocorrência de áreas degradadas por processos erosivos relaciona-se diretamente com as mudanças no uso do solo, que podem ocorrer de forma gradual ou repentina. De maneira geral, segundo Poesen et al. (2003) as principais modificações que influenciaram na ocorrência da erosão nos últimos anos foram: aumento de áreas de cultivo, aumento de áreas de pastagem, aumento de áreas para criação de gado e desmatamento excessivo.

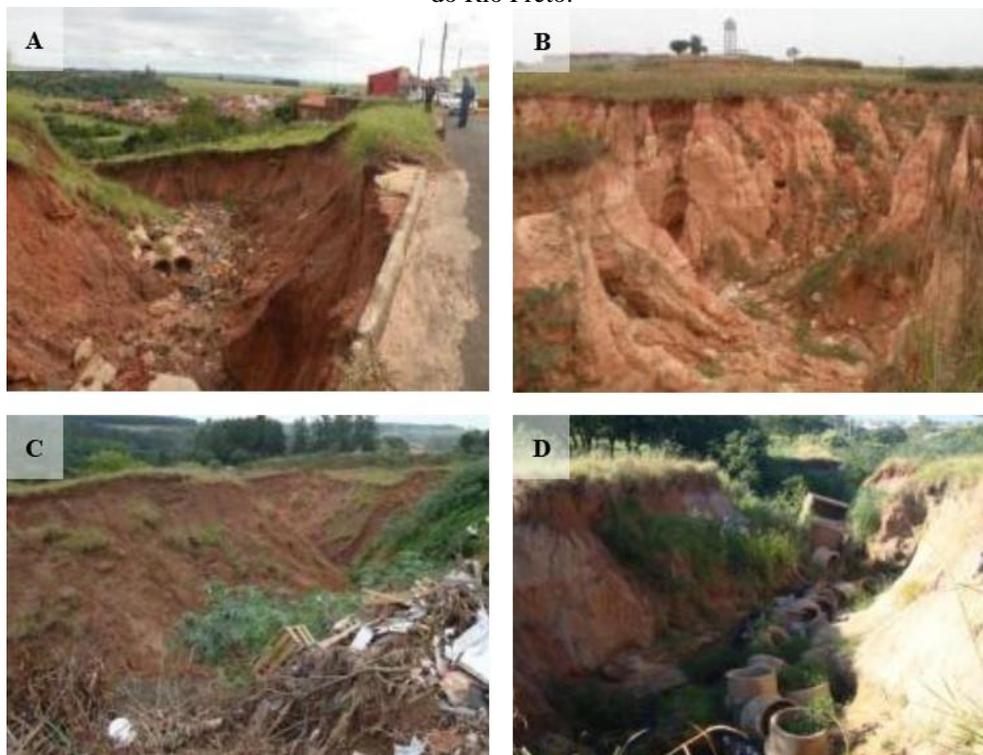
Segundo o IPT (2012), no estado de São Paulo, a expansão urbana acelerada se tornou um dos principais agentes da deflagração dos processos erosivos. O crescimento desordenado e as obras de infraestrutura ineficientes, como drenagem, principalmente na região oeste do estado, intensificaram o desencadeamento de novas erosões e a evolução para processos erosivos mais complexos. O Quadro 2 apresenta uma síntese com a descrição das ações antrópicas que condicionaram erosões em diversos municípios e a Figura 3 ilustra os processos erosivos acelerados em Botucatu, Campinas, São Pedro e São José do Rio Preto.

Quadro 2. Processos erosivos relacionados com ações antrópicas no estado de São Paulo.

Município	Descrição das ações antrópicas	Classe de suscetibilidade	Distância da área urbana
Botucatu	Lançamento concentrado de águas pluviais por meio de galeria.	Alta	0 m
Marília	Lançamento concentrado de águas pluviais por meio de galeria.	Alto	230 m
Mirante do Paranapanema	Concentração parcial do escoamento superficial de águas pluviais.	Médio	350 m
São Manuel	Concentração parcial de águas pluviais; Presença de resíduos no interior da feição.	Médio	160 m
São Pedro	Escoamento superficial concentrado de águas pluviais por meio de galeria e tubos de concreto; vários pontos com presença de resíduos sólidos.	Alto	0 m
São José do Rio Preto	Lançamento concentrado de águas pluviais por meio de galerias.	Alto	40 m
Campinas	Escoamento concentrado de águas pluviais provenientes da rodovia.	Alto	170 m
Casa Branca	Escoamento concentrado de águas pluvial.	Alto	80 m
Hortolândia	Escoamento concentrado de águas pluviais e lançamento concentrado, por meio de galeria.	Alto	20 m
Rio Claro	Escoamento concentrado de águas pluviais.	Médio	20 m

Fonte: Adaptado de IPT (2012).

Figura 3. Processos erosivos localizados em área urbana: a) Botucatu; b) Campinas; c) São Pedro e d) São José do Rio Preto.



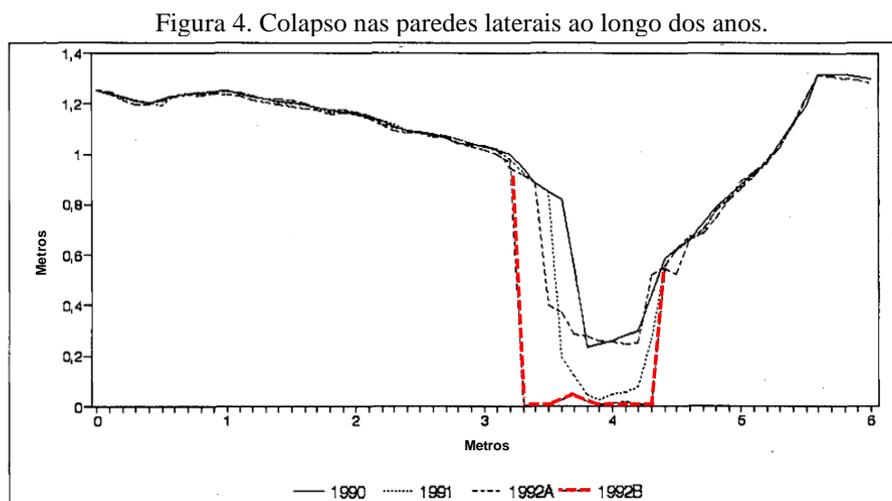
Fonte: Adaptado de IPT (2012).

No município de São Pedro (SP), diversos autores relataram que a ação antrópica favoreceu a evolução dos processos erosivos. Para Gomes (2002), Dantas-Ferreira (2004), e Zuquette et al. (2007) a evolução das erosões nessa região ocorreu após a implementação de loteamentos entre 1988 e 1995. Além disso, segundo Dantas-Ferreira (2004), a construção da rodovia SP-191 também contribuiu com a evolução de alguns processos e, devido às obras de aterramento realizadas de maneira inadequada, bem como às chuvas intensas em 1995, uma feição erosiva foi reativada provocando o rompimento da estrada.

2.1.3 Evolução dos processos erosivos

O surgimento das erosões está relacionado principalmente com os agentes geomórficos e climáticos. Já sua evolução e desenvolvimento ao longo da encosta, em termos de área e profundidade, depende da interação entre os fatores litológicos, pedológicos, climáticos e uso do solo (PATTON; SCHUMM, 1975; DIETRICH et al., 1992).

A água da chuva é considerada um dos principais fatores climáticos responsáveis pelo desencadeamento e evolução das erosões. Entretanto, períodos de chuva intensa (*rainstorms*) contribuem de maneira significativa com o processo evolutivo. De acordo com Schnabel e Gómez Amelia (1993), tempestades podem causar a ampliação das seções transversais nas erosões e o recuo da cabeceira, devido principalmente ao colapso nas paredes laterais. Em um estudo desenvolvido no sul da Espanha, os autores identificaram que os principais colapsos ocorrem durante o período de chuvas intensas (Figura 4).

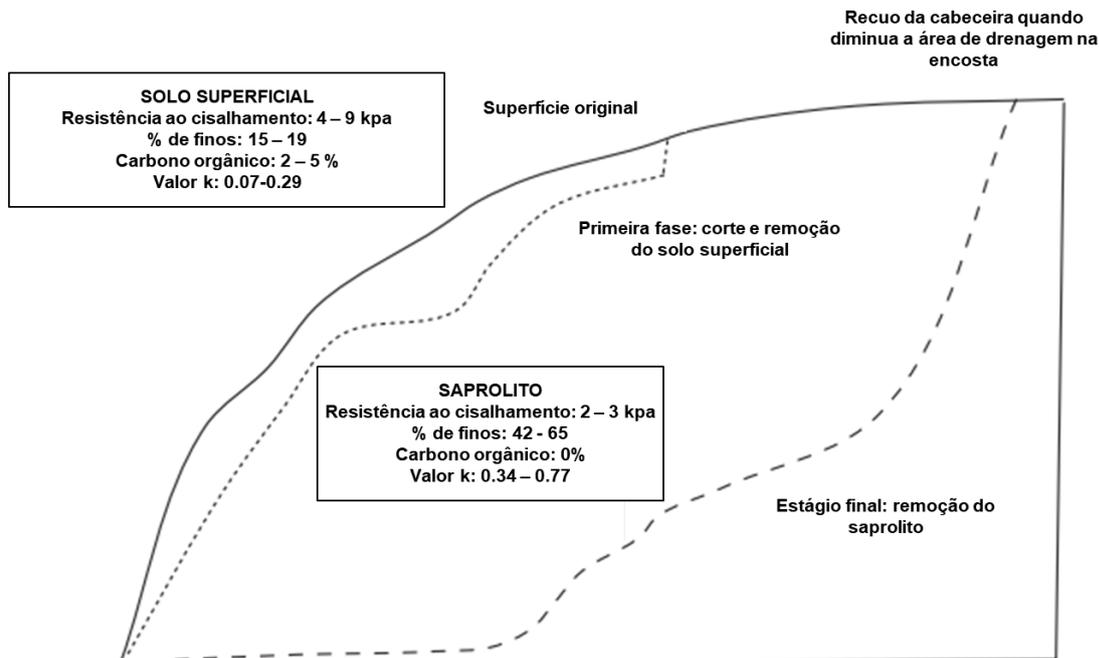


Fonte: Adaptado de Schnabel e Gómez Amelia (1993).

A profundidade do solo e suas características geotécnicas são outros fatores preponderantes nesse processo. Segundo Morgan (2005), as erosões surgem devido à

concentração do escoamento superficial e seu desenvolvimento ocorre em função do recuo da cabeceira em solos menos resistentes à erosão. Ao romper o solo superficial, o processo de evolução ocorre de forma mais rápida pois, o saprolito subjacente caracteriza-se como um material mais erodível. A Figura 5 mostra o desenvolvimento de erosões na África e padrões similares podem ser observados no Sudeste do Brasil.

Figura 5. Formação e desenvolvimento de uma erosão na África.



Fonte: Adaptado de Morgan (2005).

Quanto à posição no relevo, segundo Nachtergaele et al. (2002), o surgimento do canal ocorre nas porções mais íngremes. Quando o processo se aproxima de uma condição geomorfológica estável e não ocorrem chuvas intensas, as alterações são pequenas e concentram-se nas porções mais baixas da encosta, onde o depósito de sedimentos pode causar o assoreamento de canais de drenagem ou o preenchimento do fundo da feição (Figura 6). O último estágio de evolução da erosão se caracteriza por uma condição praticamente estável, localizada na porção mais baixa da encosta, formando uma rede de canais conectados devido, principalmente, às condições geomórficas semelhantes (MONTGOMERY; DIETRICH, 1992; POESEN et al., 2002).

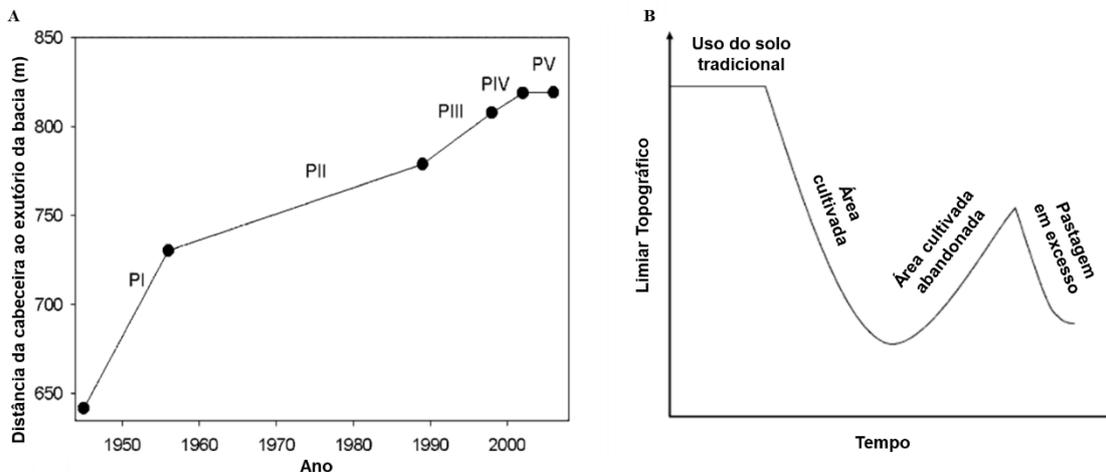
Figura 6. Processos erosivos na paisagem.



Fonte: Adaptado de Poesen et al. (2002).

Além dos fatores condicionantes naturais, é fundamental analisar o efeito do uso do solo na evolução dos canais. Segundo Gómez-Gutiérrez et al. (2009a), o uso do solo exerce grande influência na evolução das erosões devido, principalmente, às mudanças, que são marcadas pela alternância de períodos estáveis e não estáveis. Para compreender essa influência, os autores desenvolveram um estudo com feições erosivas localizadas no Sul da Espanha, considerando um período de 60 anos (1945-2006). A Figura 7a mostra o avanço da cabeceira ao longo dos anos, e a Figura 7b o efeito dessa mudança nas condições desencadeadoras, como área de contribuição e declividade. Segundo os autores, no período analisado, as principais mudanças no uso do solo estão associadas com o aumento de áreas agrícolas e remoção da cobertura vegetal que, por sua vez, modificaram o comportamento hidrológico na bacia hidrográfica e, conseqüentemente a erodibilidade do solo.

Figura 7. Avanço das cabeceiras em uma bacia hidrográfica na Espanha (a) e efeito do uso do solo. (b).



Fonte: Adaptado de Gómez-Gutiérrez et al. (2009a).

2.2 Mapeamento geotécnico e suscetibilidade à erosão

O mapeamento geotécnico compreende o processo de obtenção, avaliação e representação das características do meio físico, bem como seu comportamento frente à ocupação antrópica. Nesse sentido, busca-se retratar os componentes e os comportamentos do meio físico, avaliando suas limitações e potencialidades (ZUQUETTE, 1993). Os resultados desse processo são representados na forma de produtos cartográficos como mapas e cartas geotécnicas.

Por meio do conhecimento geológico-geotécnico pode-se compreender melhor os processos naturais, e orientar a tomada de decisão, garantindo o equilíbrio entre os componentes do meio físico, biológico e antrópico (ZUQUETTE, 1993). Para Diniz (2012), a cartografia geotécnica voltada para o planejamento e gestão ambiental, avalia o comportamento dos terrenos e estuda soluções para enfrentar os problemas decorrentes da ocupação antrópica sobre o meio físico.

Segundo Pejon (1992), os trabalhos de mapeamento geotécnico devem ser estruturados em três fases: (i) definição do problema a ser investigado e dos atributos a serem analisados; (ii) divisão da área em unidades em função das propriedades e relações entre os atributos, isto é, zonas homogêneas quanto às características dos componentes do meio físico; (iii) comprovação das zonas delimitadas, por meio de testes e ensaios e, quando necessário métodos estatísticos.

Assim, as cartas geotécnicas representam a dinâmica dos processos geodinâmicos como movimentos em encostas, inundação e erosão e, o reflexo desses processos nas formas de ocupação (CERRI, 1990). Para fins específicos de avaliação dos terrenos frente aos processos erosivos são elaboradas às cartas de suscetibilidade. A propósito, a suscetibilidade retrata a possibilidade de ocorrência de erosão em função da predisposição do meio físico e antrópico ao seu desenvolvimento (SOBREIRA; SOUZA, 2012).

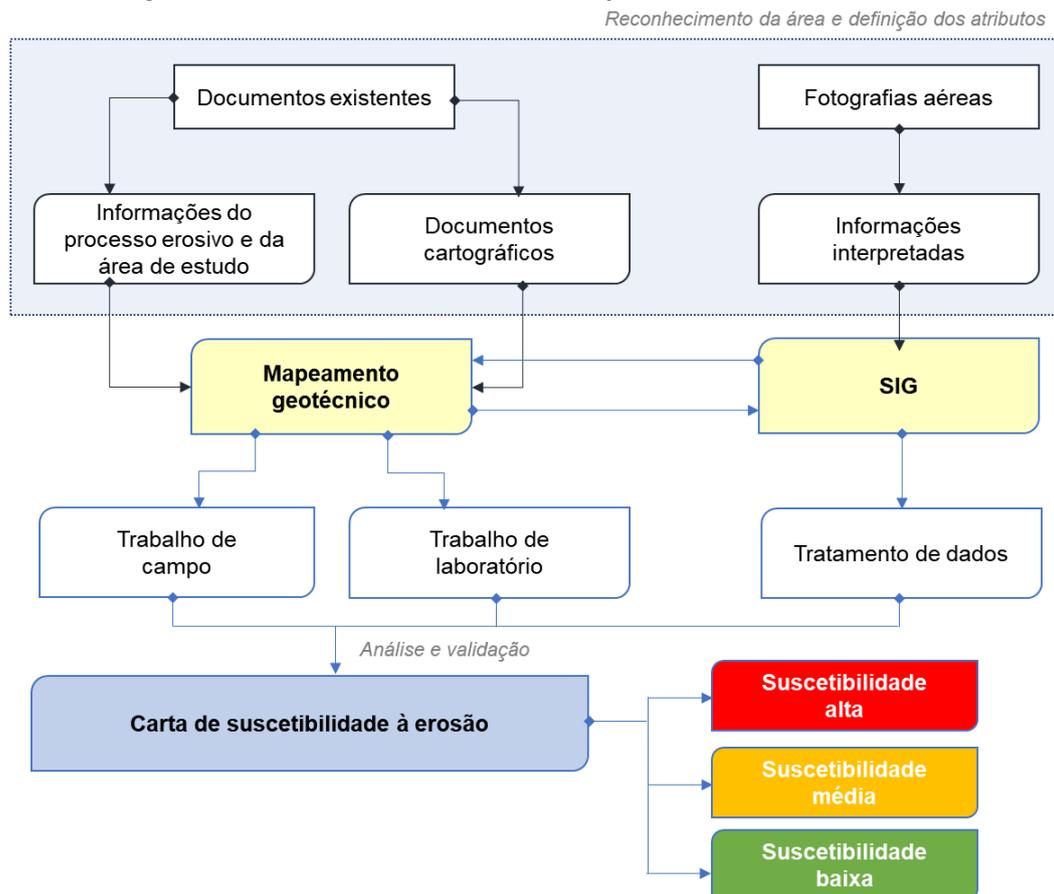
De acordo com Zuquette (1987), a elaboração da carta de suscetibilidade à erosão deve contemplar os seguintes atributos básicos: natureza dos materiais inconsolidados, relevo (declividade, forma e comprimento da encosta), cobertura vegetal, fatores climáticos, ação das águas e ação antrópica. Sobreira e Souza (2012) também destacam a importância de incluir os registros de erosão que, posteriormente poderão ser utilizados na validação das cartas.

A análise da suscetibilidade pode ser feita por meio de métodos determinísticos, estatísticos ou empíricos. Os métodos determinísticos são baseados em modelos matemáticos em bases físicas e exigem uma grande quantidade de dados de entrada. Dentre os métodos

estatísticos, os mais utilizados são os probabilísticos e, apresentam maior replicabilidade, porém dependem da quantidade e qualidade dos dados disponíveis. Por último, os métodos empíricos são baseados na atribuição de pesos aos temas, exigindo um bom nível de conhecimento e, apesar da subjetividade são amplamente utilizados (SOUZA; SOBREIRA, 2014).

Com o avanço da cartografia digital nos últimos quinze anos a integração dos aspectos do meio físico, bem como as análises dos diversos atributos tem sido feita em ambiente de sistema de informação geográfica (SIG) (Figura 8). Assim, as vantagens do uso do SIG no mapeamento geotécnico são rapidez nas análises espaciais e maior capacidade de armazenamento de dados, facilitando os processos de integração de dados, bem como a atualização dos mapas e cartas (SOBREIRA; SOUZA, 2012).

Figura 8. Procedimentos adotados na elaboração da carta de suscetibilidade.



Fonte: Adaptado de Gomes (2002).

Por fim, segundo Sobreira e Souza (2012), as cartas de suscetibilidade são mais eficientes no planejamento em um nível macro, isto é, escala de mapeamento 1:25.000 ou menores. Essas cartas apontam às áreas mais propícias e com restrições à ocupação e, devido

seu caráter orientativo podem subsidiar instrumentos importantes como planos diretores, ordenamento territorial, zoneamentos ambientais e gestão de bacias hidrográficas.

Analisando as publicações científicas nos últimos anos, nota-se que a avaliação da suscetibilidade à erosão foi fundamentada em diferentes métodos: Lollo e Sena (2013) e Bonetti et al. (2017) fundamentaram a análise na atribuição de pesos aos temas relacionados ao meio físico e antrópico; Lucà et al. (2011), Conoscenti et al. (2014), Arabameri et al. (2018) e Ghosh e Maiti (2021) aplicaram técnicas de análise multivariada, como a regressão logística; e Garosi et al. (2019) e Mosavi et al. (2020) basearam suas análises em *machine learning*, utilizando técnicas como floresta aleatória (*random forest*).

2.3 Modelo digital de elevação

Para a aplicação de modelos preditivos de processos erosivos, bem como o desenvolvimento de análises espaciais, utiliza-se frequentemente o modelo digital de elevação (MDE). Esse subcapítulo versa sobre os conceitos, métodos de interpolação, validação e resolução espacial do MDE.

2.3.1 Aspectos conceituais

O MDE constitui um dado essencial em análises espaciais, pois possibilita a representação de perfis topográficos, a aquisição de atributos topográficos primários e o desenvolvimento de análises hidrológicas. A partir da representação digital do MDE em ambiente SIG, pode-se extrair diversas informações, como característica do terreno e processos hidrológicos, fundamentais no desenvolvimento de modelos preditivos (MOORE et al., 1991; DIETRICH et al. 1992; AUGUSTO FILHO, 2013).

Segundo Montgomery (2003), o MDE é um modelo matemático de superfície contínua, interpolada com base nos valores de elevação e referenciado por coordenadas em um sistema de projeção cartográfica. A nomenclatura atribuída aos modelos matemáticos está relacionada com o tipo de representação digital e, nesta pesquisa, o modelo digital se refere especificamente ao modelo digital de terreno (MDT), ou seja, à representação da superfície em relação ao nível do terreno.

As formas mais usuais de representar o MDE são formato vetorial - *triangular irregular network* (TIN), construído a partir da triangulação de um conjunto de vértices e, formato matricial (*raster*), isto é, uma matriz retangular com linhas e colunas. As principais diferenças entre os dois formatos são observadas nos fundos de vale e divisores topográficos e, por isso,

possuem aplicações diferentes. A representação no formato TIN é recomendada para estudos planimétricos e representação de feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), enquanto o formato *raster* é mais adequado para estudos que necessitam de uma representação precisa e hidrologicamente consistente da superfície, como delimitação de bacias hidrográficas (AUGUSTO FILHO, 2013)

Diferentes métodos podem ser utilizados para obter as cotas altimétricas, como levantamento topográfico com auxílio de GPS, digitalização de mapas topográficos, ortofotografia, LiDAR (*Light Detection and Ranging*) e sistemas de radar baseados em satélite (NELSON et al. 2009). Recentemente, com a maior disseminação de dados digitais, utilizam-se cada vez mais MDE oriundos de sensores orbitais, alguns disponibilizados gratuitamente na internet, como ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) e SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*).

2.3.1.1 Elaboração do MDE: métodos de interpolação, validação e resolução

Para transformar dados discretos em uma superfície contínua, aplicam-se os métodos de interpolação. Segundo Colins (2004), a interpolação é um procedimento usado para estimar valores em regiões que não possuem dados amostrados e, tem como base os princípios da autocorrelação espacial ou dependência espacial.

Assim, segundo o autor citado, os métodos de interpolação podem ser classificados em determinísticos e probabilísticos. O método determinístico utiliza funções matemáticas para criar superfícies com base nos valores conhecidos, enquanto o probabilístico utiliza formulações estatísticas para investigar a autocorrelação e normalmente é aplicado para modelos de superfície mais avançados.

Ao longo dos anos, diversos interpoladores foram criados para desenvolver modelos de superfície mais próximos da realidade. O Quadro 3 apresenta as ferramentas de interpolação disponíveis no *software* ArcGIS®, aplicadas para gerar uma superfície a partir de dados pontuais. Esses métodos utilizam abordagem diferentes e, portanto, para selecionar o mais adequado deve-se levar em conta a distribuição dos pontos e o fenômeno estudado (COLINS, 2004).

O método *Topo to Raster* é específico para a criação de MDE hidrologicamente consistentes, pois, durante o processo de interpolação, são estabelecidas restrições para garantir a conexão entre os canais de drenagem e a representação adequada dos divisores topográficos (ESRI, 2020). Dessa maneira, segundo Augusto Filho (2013), a aquisição de um modelo

hidrologicamente consistente garante a representação de superfícies com maior precisão e, conseqüentemente, atributos topográficos com maior exatidão.

Quadro 3. Métodos de interpolação disponíveis no *software* ArcGIS.

Método	Descrição	Dados de entrada
<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	A técnica de distância ponderada inversa utiliza uma combinação linear ponderada para interpolar uma superfície.	Pontos de elevação; limite.
<i>Kriging</i>	Interpola uma superfície usando um procedimento geoestatística avançado (krigagem).	Pontos de elevação.
<i>Natural Neighbor</i>	O algoritmo de interpolação vizinho natural encontra o subconjunto de amostras mais próximo e aplica pesos para interpolar um valor.	Pontos de elevação.
<i>Spline</i>	Interpola uma superfície com base em uma função matemática que minimiza a curvatura geral da superfície.	Pontos de elevação; curvas de nível; rede de drenagem; limite; lago.
<i>Topo to Raster</i>	Interpola uma superfície hidrologicamente consistente.	Pontos de elevação; curvas de nível; rede de drenagem; limite; lago.
<i>Trend</i>	Interpola uma superfície usando uma função polinomial global.	Pontos de elevação.

Fonte: Adaptado de ESRI (2020).

Esse método foi desenvolvido com base no programa ANUDEM (*Australian National University's Digital Elevation Model*) e utiliza uma técnica iterativa de interpolação de diferenças finitas (HUTCHINSON, 1989). Além disso, ele se destaca em relação aos outros métodos, pois sua rotina de interpolação permite anexar planos de informação que representam as características da superfície, como curvas de nível, pontos cotados, rede de drenagem e lago. Logo, o processo de interpolação é otimizado para melhorar a resolução do MDE e, principalmente, representar de maneira adequada as mudanças abruptas no terreno, como topos de morro e canais de drenagem.

Após gerar o MDE em ambiente SIG, é fundamental avaliar a sua qualidade cartográfica para evitar que os erros sejam reproduzidos nas modelagens espaciais e hidrológicas subsequentes. Desse modo, Augusto Filho (2013) recomenda seguir uma rotina de controle de erro e validação. Como método qualitativo de controle de erro, recomenda-se a produção de curvas de nível a partir do MDE interpolado e sua posterior comparação visual com mapas topográficos originais e, como validação quantitativa utiliza-se o cálculo do erro médio quadrático (Equação 4).

$$REM\text{Q} = \sqrt{EM\text{Q}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(z_0 - z_i)^2}{N}}$$

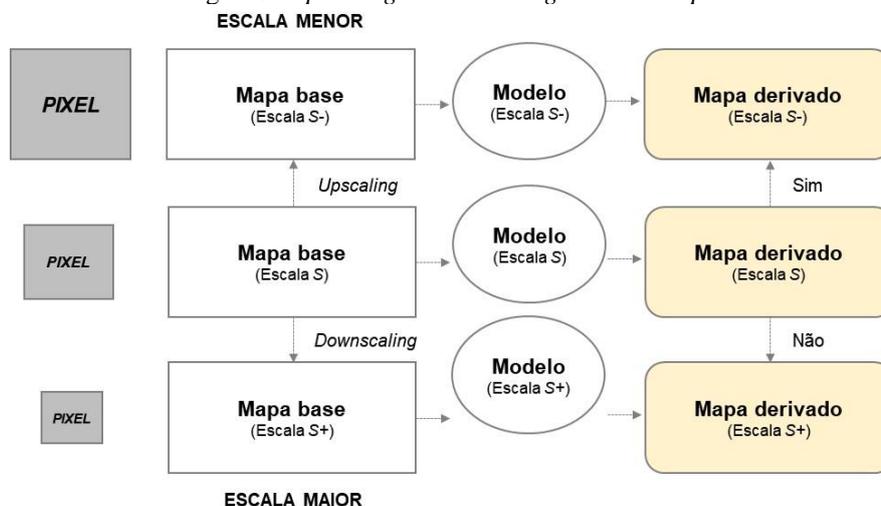
Equação 4

em que: z_0 = cota da curva de nível original no ponto; z_i = cota do MDE no ponto; N = número de dados.

Os erros associados ao MDE consistem em irregularidades da superfície geradas principalmente pela presença de depressões (*sinks*) e ruídos. Para a remoção dos *sinks*, é comum utilizar filtros como a ferramenta *Fill* para o preenchimento de depressões (TARBOTON et al. 1991) e em arquivos matriciais tem sido utilizado a estatística focal (SMITH et al. 2006; IRONSIDE et al. 2018; NEVES et al. 2021). Especificamente no MDE, a estatística focal realiza uma operação de vizinhança (convolução) e corrige as diferenças altimétricas dos *pixels*.

Por último, ao elaborar um MDE, é fundamental avaliar o tamanho do *pixel*. Essas considerações são importantes, pois, no campo da geomorfologia, a escala de mapeamento muitas vezes é determinada em função da resolução dos MDE. Desse modo, segundo Hengl (2006), o tamanho apropriado do *pixel* está relacionado com a escala dos dados de entrada, desempenho computacional, precisão posicional, complexidade do terreno e objetivo do estudo. Além disso, é importante considerar que, na cartografia, o tamanho do *pixel* depende essencialmente do nível de detalhe e precisão espacial de um mapa (Figura 9).

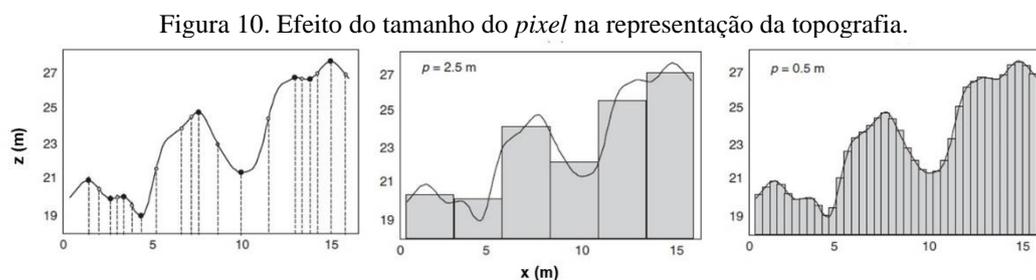
Figura 9. *Upscaling* e *downscaling* baseado no *pixel*.



Fonte: Adaptado de Hengl (2006).

Nos MDE, *pixels* maiores podem distorcer a topografia real e comprometer a representação dos divisores topográficos e canais de drenagem. Por outro lado, MDE com *pixels* menores, quando incompatíveis com a base cartográfica, podem apresentar novos elementos e, conseqüentemente, comprometer a obtenção de atributos topográficos precisos. Nesse sentido, para Kienzle (2004) e Hengl (2006), o tamanho do *pixel* ideal é aquele que reflete a variabilidade da superfície e representa a maioria das feições geomórficas.

Segundo Hengl (2006), considerando um exemplo unidimensional, o tamanho do *pixel* ideal deve ter pelo menos metade do espaçamento médio entre os pontos de inflexão (frequência). Como ilustrado na Figura 10, um MDE com *pixel* de 2.5m tende a representar incorretamente a topografia; por outro lado, um MDE com *pixel* de 0.5m tende a fornecer uma descrição mais precisa da superfície.



Fonte: Adaptado de Hengl (2006).

Dessa maneira, para auxiliar na definição do tamanho do *pixel*, Hengl (2006) propôs algumas equações relacionadas com características cartográficas e topográficas (Quadro 4). As equações pautadas nos aspectos cartográficos consideram a escala original da base de dados e, são fundamentadas na delimitação mínima legível (DML), definidas em função da menor área a ser mapeada. Sob outra perspectiva, as equações pautadas nos aspectos topográficos estão relacionadas com a complexidade do terreno e consideram as características inerentes às curvas de nível e pontos cotados.

Considerando essa proposta, Bater e Copos (2009); Paulin et al. (2010); Silveira e Silveira (2015); Garosi et al. (2019) aplicaram as equações pautadas na escala da base de dados e na complexidade do terreno para determinar o tamanho ideal do *pixel*. Uma ampla gama de MDE e dados cartográficos estão disponíveis, todavia a escolha da resolução espacial é uma etapa fundamental, pois pode comprometer a simulação dos processos hidrológicos e geomorfológicos (ZHANG et al. 2008) e, conseqüentemente a precisão dos modelos.

Quadro 4. Equações para auxiliar a definição da resolução espacial do MDE.

Aspectos	Resolução recomendada (<i>pixel size</i>)
Escala da base de dados	$p = SN \times 0.0005$
Erro de posicionamento do GPS	$p = 1.8 \times r_{E(P=95\%)}$
Tamanho dos objetos de referência	$p = \sqrt{a_{MLD}/4}$
Densidade de inspeção	$p = 0.0791\sqrt{A/N}$
Distância entre os pontos	$p = 0.25(0.5)\sqrt{A/N}$
Dependência espacial	$p = h_R \times m^{-1/3}$
Complexidade do terreno	$p = A/2 \sum l$

onde: p = resolução do *pixel* (m); SN = fator da escala; r_E = erro posicionamento; a_{MLD} = área referente a delimitação mínima legível; A = área total; N = número de pontos amostrados; h_R = amplitude da dependência espacial; m = número de pares de pontos dentro do intervalo de dependência espacial; l = comprimento total das curvas de nível.

Fonte: Adaptado de Hengl (2006).

2.4 Índices de erosão

Para representar espacialmente as áreas suscetíveis à erosão ou caracterizar os fatores condicionantes foram propostos alguns índices, como topográficos (THORNE et al. 1986, MOORE et al. 1988; MOORE; BURCH, 1986), erosividade (WISCHMEIER; SMITH, 1958; LOMBARDI NETO; MOLDENHAUER, 1992), e erodibilidade (PEJON, 1992). Neste subcapítulo, serão descritos os índices utilizados na pesquisa: topográficos e erosividade.

2.4.1 Índices topográficos

Para caracterizar espacialmente as áreas potenciais à erosão, alguns autores utilizaram os índices topográficos compostos, desenvolvidos a partir de simplificações físicas relacionadas com os processos hidrológicos e geomorfológicos (PIKE et al. 2009; HANCOK; EVANS, 2010; CONFORTI et al., 2011; CONOSCENTI et al., 2013; DAGGUPATI et al., 2013; MOMM et al., 2013; CAPOANE et al., 2015; GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al., 2015; DEWITTE et al. 2015; ARABAMERI et al., 2019).

Os índices topográficos compostos podem ser obtidos com auxílio das ferramentas de geoprocessamento, pois estes relacionam atributos topográficos primários derivados do MDE. Posto isso, como nem sempre é possível realizar medições diretas em campo devido, principalmente, a limitações econômicas, a aplicação dos índices se torna vantajosa. Essa alternativa tem auxiliado a tomada de decisão no âmbito do monitoramento hidrológico, bem

como a previsão de erosão em bacias hidrográficas (THORNE et al., 1986; MOORE et al., 1991). Nesse contexto, é importante compreender o significado hidrológico dos principais atributos topográficos e sua relação com a dinâmica de água no solo, que condiciona o desencadeamento de processos erosivos (Quadro 5).

Quadro 5. Índices topográficos primários.

Atributo	Definição	Significado hidrológico
Altitude	Elevação.	Potencial de energia.
Declividade	Gradiente de inclinação.	Velocidade do escoamento superficial.
Área de drenagem	Área de drenagem no exutório.	Volume do escoamento.
Área de drenagem específica	Área de drenagem por unidade de contorno.	Taxa do escoamento em estado estacionário.
Declividade da área de drenagem	Inclinação média na área de drenagem.	Tempo de concentração.
Comprimento a montante	Comprimento médio dos caminhos de fluxo até um ponto da bacia.	Fluxo acumulado e taxa de erosão.
Comprimento do fluxo	Distância máxima do fluxo até um determinado ponto na bacia.	Taxas de erosão; produção de sedimento e tempo de concentração.
Comprimento da área de drenagem	Distância do ponto mais alto até o exutório.	Atenuação do escoamento superficial.
Curvatura do perfil	Curvatura do perfil de declividade.	Fluxo acelerado; taxa de erosão e deposição.
Curvatura do plano	Curvatura do contorno.	Fluxo convergente/divergente e teor de água no solo.

Fonte: Adaptado de Moore et al. (1991).

A partir dos atributos topográficos primários, algumas equações foram desenvolvidas para prever a distribuição espacial dos processos erosivos e, como exemplo, cita-se o índice topográfico composto (THORNE et al. 1986), índice topográfico de umidade (MOORE et al. 1988), índice de transporte de sedimentos (MOORE; BURCH, 1986) e índice de potência de fluxo (MOORE et al. 1988). Esses índices representam o poder erosivo do escoamento superficial, em termos de descarga potencial, localização e capacidade de transporte.

O índice topográfico composto (*Compound Topographic Index - CTI*), proposto por Thorne et al. (1986), relaciona os parâmetros declividade (S), área de drenagem específica (A_s) e curvatura da encosta ($Plan_c$) e, é usado para identificar áreas propensas ao desenvolvimento das erosões (Equação 5).

$$CTI = S \times A_s \times Plan_c$$

Equação 5

em que: S (graus); A_s (m^2/m).

O índice topográfico de umidade (*Topographic Wetness Index - TWI*) reflete o efeito da topografia na distribuição espacial da água no solo e auxilia na identificação das zonas de saturação superficial (MOORE et al. 1988). O TWI é expresso por meio da Equação 6 .

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan\beta}\right) \quad \text{Equação 6}$$

em que: A_s (m^2/m); $\tan\beta$ (graus).

O índice de capacidade de transporte de sedimentos (*Sediment Transport Index – STI*) foi desenvolvido por Moore e Burch (1986), com base no fator topográfico de inclinação (S) e comprimento (L) da equação universal de perda de solos (EUPS). O STI é utilizado para prever as áreas potenciais de ocorrência de erosão e deposição (Equação 7).

$$STI = LS_p = \left(\frac{A_s}{a_0}\right)^m \left(\frac{S}{b_0}\right)^n \quad \text{Equação 7}$$

em que: $a_0 = 22.13$ m e $b_0 = 0.0896$ m são equivalentes ao fator de comprimento e inclinação; m e n são constantes, sendo $m = 1.3$ e $n = 0.6$; S (graus); A_s (m^2/m).

O índice de potência de fluxo (*Stream Power Index - SPI*) é uma medida do poder erosivo do fluxo de água, definida a partir do pressuposto que o volume do escoamento é proporcional à área de drenagem (MOORE et al., 1991). O SPI tem sido utilizado para estimar a erosão hídrica (Equação 8).

$$SPI = A_s \times \tan\beta \quad \text{Equação 8}$$

em que: A_s (m^2/m); $\tan\beta$ (graus).

Os índices topográficos compostos têm sido utilizados em diversos estudos para analisar a influência da topografia na erosão linear (PIKE et al. 2009; HANCOK e EVANS, 2010;

CONFORTI et al., 2011; CONOSCENTI et al., 2013; DAGGUPATI et al., 2013; MOMM et al., 2013; CAPOANE et al., 2015; GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al., 2015; DEWITTE et al. 2015; ARABAMERI et al., 2019). O Quadro 6 lista os autores, a área de estudo e os índices topográficos utilizados.

Quadro 6. Relação de autores que utilizaram índices secundários para avaliar a erosão.

Autores	Local	Índices
Pike et al. (2009)	EUA	SPI, STI e TWI
Hancock e Evans (2010)	Austrália	TWI
Conforti et al. (2011)	Itália	SPI, STI e TWI
Lucá et al. (2011)	Itália	SPI, STI e TWI
Conoscenti et al. (2013)	Itália	SPI, STI e TWI
Daggupati et al. (2013)	EUA	CTI e TWI
Momm et al. (2013)	EUA	CTI
Capoane et al. (2015)	Brasil	STI e TWI
Gómez-Gutiérrez et al. (2015)	Itália e Espanha	SPI, STI e TWI
Dewitte et al. (2015)	África	SPI, STI e TWI
Arabameri et al. (2019)	Irã	SPI, STI e TWI

Segundo Hancock e Evans (2010), os índices topográficos auxiliam na identificação espacial de áreas potenciais à erosão e, confirmam a relação entre hidrologia da encosta, parâmetros morfométricos e processos erosivos. O desempenho desses índices quanto à capacidade de prever as áreas de erosão depende das características locais e dos processos hidrológicos dominantes, bem como da qualidade dos MDE.

Para Conforti et al. (2011); Conoscenti et al. (2013), Dewitte et al. (2015) e Lucá et al. (2011), os índices SPI e STI refletiram melhor o efeito da topografia nos fenômenos da erosão. Por outro lado, segundo Gómez-Gutiérrez et al. (2015) e Arabameri et al. (2019), o TWI forneceu ótimos resultados em relação à distribuição das zonas saturadas.

Em relação ao CTI, Daggupati et al. (2013) e Momm et al. (2013) afirmam que o índice apresentou um bom desempenho para a identificação de processos erosivos no Kansas (EUA). A distribuição das áreas identificadas espacialmente apresentou boa concordância com as erosões mapeadas em campo. Além do mais, para os autores, o CTI se destaca em relação aos outros índices porque considera a influência da curvatura na concentração e velocidade do fluxo.

No Brasil, Capoane et al. (2015) caracterizaram os locais onde o fluxo superficial tem maior energia e, portanto, maior poder erosivo com o auxílio dos índices topográficos compostos (TWI e STI). Os índices contribuíram com a identificação dos locais mais suscetíveis à erosão, localizados principalmente ao longo dos cursos d'água e cabeceiras de drenagem.

Assim, a aplicação dos índices topográficos compostos pode ser considerada uma boa alternativa para a previsão dos locais suscetíveis a erosão. Entretanto, é fundamental realizar uma análise prévia das características dos processos erosivos para garantir uma boa representação dos processos hidrológicos e geomorfológicos. Além do mais, a seleção dos índices deve estar alinhada com os objetivos do estudo e, sua qualidade dependente também da precisão do MDE.

2.4.2 Índice de erosividade

A erosão pluvial constitui um dos principais fatores de degradação ambiental em regiões tropicais e subtropicais. Nesse sentido, ao avaliar a suscetibilidade é fundamental considerar as séries históricas de chuva (SOUZA; SOBREIRA, 2014).

Para caracterizar o potencial da chuva, Wischmeier e Smith (1958) propuseram o índice de erosividade (EI_{30}). O EI_{30} representa o produto entre a energia cinética e a intensidade máxima da chuva durante um período de 30 minutos (Equação 9). Esse índice se baseia nas características físicas da chuva, e é utilizado com frequência para representar o fator erosividade em regiões tropicais.

$$EI_{30} = E_c \times I_{30} \quad \text{Equação 9}$$

em que: EI_{30} = índice de erosão (MJ.mm/ha.h.mês); E_c = energia cinética (MJ/ha); I_{30} = intensidade máxima em 30 minutos (mm/h).

No entanto, a aplicação desse índice pode apresentar algumas limitações, pois, para obter os valores de intensidade máxima e de duração da chuva, é necessário realizar uma análise detalhada dos dados pluviométricos. Além disso, em certas regiões esses dados são escassos ou inexistentes (LOMBARDI NETO; MOLDENHAUER, 1992).

No Brasil, diversas equações foram desenvolvidas para estimar os valores de erosividade de maneira indireta (OLIVEIRA; MEDINA, 1990; LOMBARDI NETO; MOLDENHAUER, 1992; RUFINO et al., 1993; SILVA et al., 1997; GONÇALVES et al.,

2006; HICKMANN et al., 2008; CANTALICE et al., 2009; SILVA et al. 2010; ALMEIDA et al., 2011). Esses autores consideraram a relação entre o índice de Fournier modificado (Equação 10) e o índice de erosão (EI_{30}).

$$C_c = p^2/P \quad \text{Equação 10}$$

em que: p^2 = precipitação média mensal (mm); P = precipitação média anual (mm).

Especificamente no Estado de São Paulo, a modificação do índice de Fournier resultou nas equações apresentadas no Quadro 7. Dentre essas, destaca-se a equação de Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), desenvolvida a partir de dados pluviométricos disponíveis para o município de Campinas, em um período de 22 anos e que retornou uma ótima correlação entre o coeficiente de chuva e o índice de erosão, possibilitando sua aplicação para outras regiões que não possuíam dados pluviométricos.

Posteriormente, as equações desenvolvidas foram utilizadas para representar espacialmente o índice de erosividade. Viera e Lombardi Neto (1995) utilizaram dados pluviométricos da rede oficial do estado de São Paulo (DAEE) e técnicas de interpolação geoestatística para estudar a variabilidade espacial do potencial da chuva de causar erosão. Utilizando os valores estimados de erosividade foram construídos os mapas de isolinhas para três períodos (Figura 11).

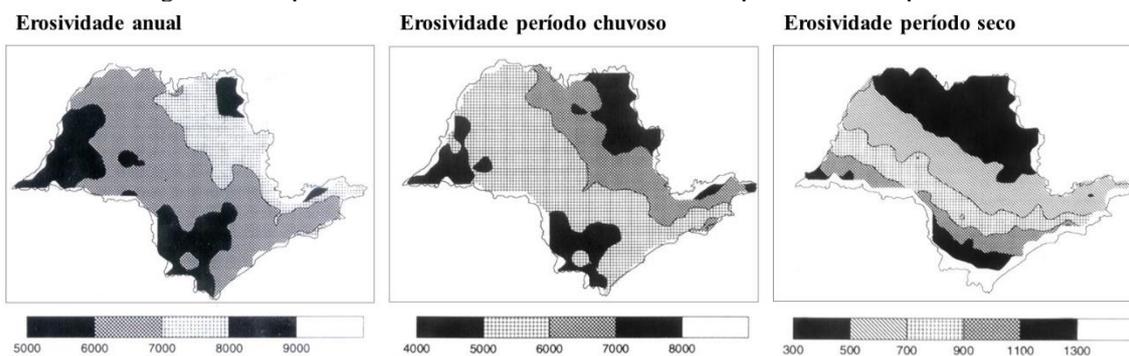
Quadro 7. Equação de erosividade para o estado de São Paulo.

Cidade	Equação	Autores
Teodoro Sampaio	$EI_{30} = 106.8183 + 46.9562 (p^2/P)$	Colodro et al. 2002
Campinas	$EI_{30} = 68.730 (p^2/P)^{0.841}$	Lombardi Neto; Moldenhauer (1992)
Piraju	$EI_{30} = 72.5488 (p^2/P)^{0.8488}$	Roque et al. (2001)
Sete Barras	$EI_{30} = 316.20 + 55.40(p^2/P)$	Silva et al. (2009)
Juquiá	$EI_{30} = 207.21 + 40.65(p^2/P)$	Silva et al. (2009)
Mococa	$EI_{30} = 111.173 (p^2/P)^{0.691}$	Carvalho et al. (1991)

onde: EI = média mensal do índice de erosão (MJ.mm/ha.h.ano); p^2 = precipitação média mensal (mm); P = precipitação média anual (mm).

Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2012).

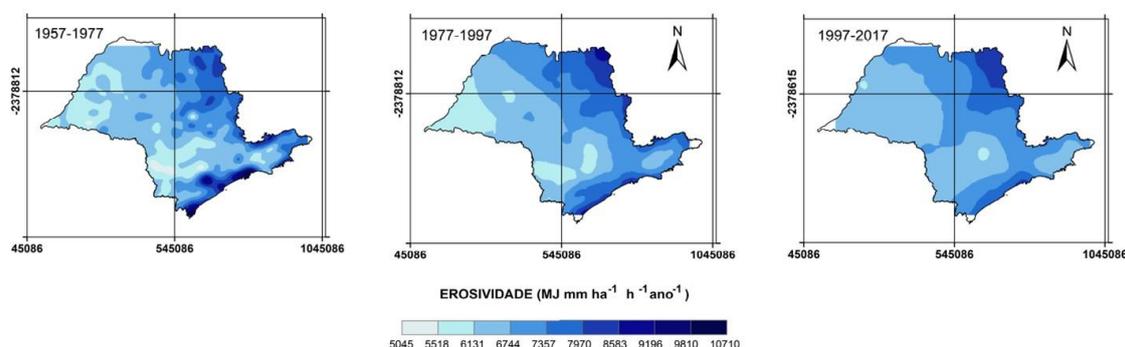
Figura 11. Mapa da erosividade do estado de São Paulo para diferentes períodos.



Fonte: Adaptado de Vieira e Lombardi Neto (1995).

De maneira similar, Santa'anna Neto (1995) aprimorou o estudo da variabilidade espacial da erosividade das chuvas, ampliando o segmento temporal (1970 a 1990) e a quantidade de postos pluviométricos. Recentemente, Ricardi (2020) aplicou o índice de erosividade para caracterizar a distribuição espacial da chuva para o estado de São Paulo, abrangendo o período de 1957 a 2017, possibilitando uma nova avaliação espacial e temporal do potencial da chuva causar erosão (Figura 12).

Figura 12. Mapas da erosividade anual do estado de São Paulo para os períodos de 1957-1977, 1977-1997 e 1997-2017.



Fonte: Adaptado de Ricardi (2020).

Por fim, ao estudar a erosividade da chuva no Brasil, Oliveira et al. (2012) constataram que poucas equações foram desenvolvidas e muitas são específicas para as regiões sul e sudeste. Nesse sentido, tanto a escassez de dados pluviométricos como as equações adequadas para cada região podem ser fatores limitantes para caracterizar a erosividade da chuva, pois os estudos devem ser realizados considerando as características climáticas locais. Apesar disso, destaca-se o uso das técnicas de interpolação, como a geoestatística, como ferramenta auxiliar na estimativa da erosividade.

2.5 Limiar topográfico

De maneira similar aos índices topográficos, outros métodos preditivos foram desenvolvidos considerando as relações entre os atributos topográficos primários. Este subcapítulo descreve o método do limiar topográfico, que relaciona declividade (S) e área de contribuição (A), utilizado para definir os limites topográficos que condicionam a incisão de processos erosivos nas encostas.

2.5.1 Aspectos conceituais

A erosão hídrica se inicia quando o escoamento superficial concentrado excede o limiar de resistência do solo, nesse caso, representado pela tensão de cisalhamento crítica (HORTON, 1945), descrita na Equação 11.

$$\tau_c = \rho g d s \quad \text{Equação 11}$$

em que: τ_c = tensão de cisalhamento crítica; ρ = densidade da água; g = aceleração da gravidade; d = profundidade do fluxo; s = gradiente de inclinação da superfície.

Com base nesse princípio, Patton e Schumm (1975) desenvolveram um modelo de predição de processos erosivos lineares, considerando a relação entre área de drenagem e declividade, conforme a Equação 12. Esse modelo pressupõe que, para uma determinada área de drenagem, existe uma inclinação mínima que condiciona o escoamento superficial necessário para iniciar o processo de erosão. Nos próximos parágrafos, a obtenção de $S \times A$ será descrita, bem como a representação gráfica do limiar topográfico.

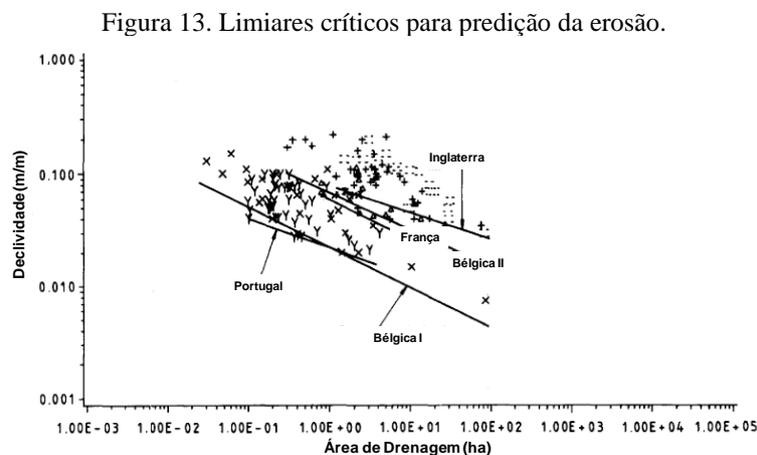
$$S \geq k A^{-b} \quad \text{Equação 12}$$

em que: S = declividade (m/m); A = área de drenagem (ha); k é uma constante que depende das condições ambientais (clima, solo e uso do solo), e b pode variar em função do fluxo superficial dominante.

Dadas às condições topográficas mínimas que condicionam a dinâmica e o desenvolvimento dos processos erosivos, a aplicabilidade do limiar topográfico tem se

mostrado mais eficiente para áreas com características físicas semelhantes (VANDAELE et al., 1996; VANDEKERCKHOVE et al., 1998). Ou seja, a relação SxA fornece uma base física para compreender a deflagração das erosões, entretanto, a influência de outros fatores condicionantes pode comprometer a investigação do limiar crítico.

Ao representar a relação SxA em um gráfico com escala logarítmica dupla, obtém-se o limite inferior dos dados (área de drenagem \times declividade) e, portanto, o limiar crítico para desencadeamento da erosão. Dessa forma, considera-se que abaixo dessa linha não existem condições morfométricas suficientes para condicionar o início do processo erosivo. A Figura 13 apresenta a relação SxA obtida por diferentes autores que avaliaram o início de erosões lineares na Bélgica, França, Inglaterra e Portugal.

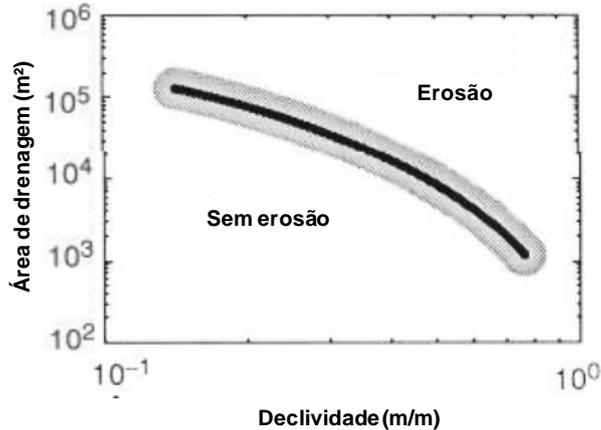


Fonte: Adaptado de Vandaele et al. (1996).

O coeficiente k da Equação 12 varia em função de características específicas como clima, uso do solo e vegetação e, pode refletir as propriedades do solo como resistência ao cisalhamento e rugosidade; enquanto b é um expoente que está relacionado com o mecanismo de fluxo dominante no processo de formação das erosões (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; VANDAELE et al., 1996).

Dessa forma, a variabilidade espacial e temporal inerente às características ambientais pode ocasionar uma aleatoriedade no modelo de predição (MONTGOMERY; DIETRICH, 1992). A tendência central dos dados no gráfico SxA reflete as condições ambientais da área, como clima e vegetação no início da erosão. Entretanto, como a variação espacial e temporal desses fatores modifica as condições hidrológicas que influenciam no desenvolvimento dos canais, os dados podem apresentar certa aleatoriedade entorno do limite crítico (Figura 14).

Figura 14. Variabilidade espacial da relação SxA.



Fonte: Adaptado de Montgomery e Dietrich (1992)

A partir da relação proposta por Patton e Schumm (1975), outros modelos foram desenvolvidos para representar os limiares crítico condicionados por diferentes processos hidrológicos (BEGGIN; SCHUMM, 1979; DIETRICH et al. 1992; DIETRICH et al., 1993; MONTGOMERY; DIETRICH, 1994). Dietrich et al. (1992) desenvolveram três equações para prever a condição inicial para o desencadeamento de erosão por saturação do solo (Equação 13); limiar para instabilidade da encosta (Equação 14) e limiar de erosão desencadeada por escoamento superficial (Equação 15).

$$\frac{a}{b} \geq \frac{T}{q} M \quad \text{Equação 13}$$

$$\frac{a}{b} \geq 2 \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi} \right) + \frac{T}{q} M \quad \text{Equação 14}$$

$$\frac{a}{b} \geq \frac{\alpha}{qM^2} + \frac{T}{q} M \quad \text{Equação 15}$$

em que: a = área de drenagem; b = unidade de contorno da bacia; T = transmissividade; q = precipitação; M = inclinação do terreno; $\alpha = 2 \times 10^{-4} \tau_c^3 K^{-1}$; τ_c = tensão de cisalhamento crítica; K = constante relacionada com a rugosidade do solo.

Considerando a base teórica dos limiares topográficos, outras equações foram desenvolvidas fundamentadas em outros parâmetros, como largura do fluxo (w). Nesse sentido,

Vandaele et al. (1996), Desmet e Govers (1997) e Vandaele et al. (1997) propuseram modelos para prever os locais propensos à ocorrência de erosões efêmeras (Equação 16, Equação 17 e Equação 18).

$$S \left(\frac{A}{w} \right)^{0.4} > 0.4 \quad \text{Equação 16}$$

$$S \left(\frac{A}{w} \right)^{0.4} > 0.72 \quad \text{Equação 17}$$

$$S \left(\frac{A}{w} \right) > 40 \text{ ou } \ln \left(\frac{A}{w} \right) > 9.8 \quad \text{Equação 18}$$

em que: S = declividade (m/m); A = área de drenagem (ha); w = largura do fluxo (m).

Após realizar uma revisão bibliográfica a respeito dos limiares topográficos propostos em diversas regiões, Torri e Poesen (2014) propuseram uma simplificação para a Equação 12, adotando um único valor para o expoente b . Desse modo, para representar o desencadeamento por fluxo superficial concentrado, foi proposto o valor de 0.38 para b assim, ao utilizar um valor constante, é possível obter um valor para k , que representa o limiar de resistência do solo à erosão. Isto é, resistência por fluxo concentrado e resistência devido ao excesso de escoamento (TORRI et al. 2018). Além do mais, segundo os autores, ao adotar essa simplificação, pode-se interpretar melhor o efeito do uso do solo no limiar de resistência.

Com a finalidade de representar as condições de uso do solo, bem como de compreender a relação entre o limiar de resistência e as características hidrológicas em função dos tipos de uso e cobertura do solo, Torri e Poesen (2014) consideraram o modelo da curva número (CN) (USDA-NRCS, 1986). Evidentemente, a relação entre os valores k e CN mostrou que os valores de k tendem a ser menores para terras agrícolas, bem como maior para áreas de floresta e pastagem.

Dessa maneira, Torri e Poesen (2014) propuseram um modelo de predição que relaciona SxA com outros parâmetros, como presença de *piping*, fragmentos de rochas e uso do solo (Equação 19). É importante destacar que os parâmetros ce e RFC foram incluídos para representar outros fatores específicos que podem influenciar no valor de k e não são representados por $S_{0.05}$, que representa uma medida hidrológica da bacia.

$$\text{sen}(\gamma) \geq 0.73ce^{1.3RFC}(0.00124S_{0.05} - 0.037)A^{-0.38} \quad \text{Equação 19}$$

em que: γ = inclinação do terreno; c = fator de influência que representa o efeito do *piping* e varia entre 0.1 e 0.4 (adimensional); RFC (*rock fragmente cover*) = efeito dos fragmentos de rocha na resistência do solo e varia de 0 a 1 (adimensional); $S_{0.05}$ = índice de armazenamento (mm); e A = área de drenagem (ha).

Resumidamente, o $S_{0.05}$ é um índice de armazenamento que mede a reposta hidrológica da bacia com base na perda potencial máxima para o escoamento (Equação 20). Esse índice é uma transformação do $S_{0.20}$ (Equação 21), proposto por Hawkins et al. (2009) e adotado por Torri e Poesen (2014) na Equação 12.

$$S_{0.05} = 0.819S_{0.20}^{1.15} \quad \text{Equação 20}$$

$$S_{0.20} = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad \text{Equação 21}$$

em que: CN = curva número; $S_{0.05}$ e $S_{0.20}$ = índice de armazenamento (mm).

Logo, o modelo proposto pelos autores fornece uma base para prever o desenvolvimento de erosões, considerando as mudanças nas condições ambientais, como uso do solo e vegetação. No entanto, como a Equação 19 foi formulada com base em dados da literatura, o modelo ainda precisa ser aprimorado a partir de dados de campo (TORRI; POESEN, 2014).

Considerando essas limitações, Torri et al. (2018) reformularam a Equação 19 com base em dados de campo de uma área na Itália altamente suscetível à erosão, bem como propuseram um modelo para prever o limiar de resistência k (Equação 22) com base no efeito dos fragmentos da rocha (Equação 23) e uso do solo (Equação 24).

$$k = R_{RFC} \times C \times LUV \quad \text{Equação 22}$$

$$R_{RFC} = 0.4 [1 + e^{1.46RFC}] \quad \text{Equação 23}$$

$$LUV = \{0.00113[1 - \exp(-0.0137S_{0.05})]S_{0.05}\}A^{0.4} \quad \text{Equação 24}$$

em que: C = fator adimensional normalmente igual a 1, que representa um conjunto de subfatores relacionados com a estrutura do solo; R_{RFC} = fator de correção, que representa o efeito dos fragmentos de rocha e varia de 0 a 1 (adimensional); e LUV = fator de correção, em função do uso do solo e vegetação.

Segundo Torri et al. (2018), os valores para RFC foram estimados com base em dados na literatura, e o valor adotado representa o efeito dos fragmentos de rocha na resistência do solo que, por sua vez, precisa ser alto para mostrar um efeito substancial nos valores de k . Assim como para determinar o fator C considerou-se a razão entre o valor C e k (mensurado em campo em regiões com propriedades estruturais específicas). Desse modo, recomenda-se que a adoção desses valores seja amparada por dados bibliográficos ou ensaios de campo.

2.5.2 Parâmetros SxA, características e processos dominantes

Em primeiro lugar, os parâmetros SxA devem ser mensurados a partir do registro da cabeceira da erosão e, para registros antigos, a determinação da cabeceira pode ser ainda mais difícil, devido ao recuo que ocorre ao longo dos anos. Nesse caso, as fotografias aéreas antigas podem ser mais úteis que o mapeamento de campo (VANDAELE et al., 1996).

Nesse contexto, para obter esses parâmetros, diferentes procedimentos foram utilizados ao longo dos anos, conforme apresentado no Quadro 8. Inicialmente, os parâmetros eram obtidos através de mensurações em campo ou por mapa topográfico; atualmente, com a evolução do geoprocessamento ambos têm sido obtidos de forma automática a partir do MDE. Entretanto, os diferentes procedimentos adotados para calcular S e A dificultam a comparação entre os limiares topográficos relatados na literatura (POESEN et al., 2002; STABILE, 2013).

Quadro 8. Síntese dos métodos utilizados para obter declividade e área de contribuição (continua).

Autores	Local de estudo	S	A
Patton e Schumm (1975)	Colorado (EUA)	Mapa topográfico	Mapa topográfico
Montgomery e Dietrich (1988)	Califórnia e Oregon (EUA)	Mensuração em campo	Mapa topográfico
Montgomery e Dietrich (1992)	Califórnia (EUA)	Mensuração em campo	Mapa topográfico
Vandaele et al. (1997)	Portugal	MDE	MDE
Vandekerckhove et al. (1998)	Espanha	Mensuração em campo	Mensuração em campo
Nachtergaele et al. (2000)	Bélgica	Mensuração em campo	GPS
Cheng et al. (2006)	China	MDE	MDE

Quadro 8. Síntese dos métodos utilizados para obter declividade e área de contribuição (continuação).

Autores	Local de estudo	S	A
Jetten et al. (2006)	Bélgica	Mensuração em campo	GPS
Parkner et al (2006)	Nova Zelândia	MDE	MDE
Menéndez-Duarte et al (2007)	Espanha	MDE	MDE
Gómez-Gutiérrez et al. (2009a)	Espanha	MDE	MDE/TauDEM
Nazari e Samani (2009)	Irã	MDE	MDE/ArcHydro
Knapen e Poesen (2010)	Bélgica	Mensuração em campo	GPS
Araújo (2011)	Brasil	MDE	MDE/ArcHydro
Millares et al. (2012)	Espanha	MDE	MDE
Stabile (2013)	Brasil	Mensuração em campo/MDE	MDE/Shalstab
Neves (2017)	Brasil	MDE	MDE/TauDEM
Hayas et al (2017)	Espanha	MDE	DEM/TauDEM
Torri et al. (2018)	Itália	Mensuração em campo	GPS
Yibeltal et al. (2019)	Etiópia	Mensuração em campo	GPS

Além dos procedimentos para a obtenção de SxA , as características locais do meio físico, como geologia, clima, vegetação e uso do solo modificam a dinâmica dos processos hidrológicos, bem como influenciam nas características do limiar geomorfológico. Segundo Vandekerckhove et al. (1998) e Vandekerckhove et al. (2000), as diferenças relacionadas com a posição do limiar topográfico referem-se essencialmente às características do solo, clima, vegetação e os diferentes processos dominantes, como escoamento superficial e subsuperficial.

A Tabela 1 apresenta os diferentes valores de k e b obtidos na literatura. Segundo Montgomery e Dietrich (1994), o valor de b varia entre 0.5 e 0.857, sendo que $b = 0.5$ pode indicar a dominância de fluxo laminar, enquanto $b = 0.857$ é mais representativo de fluxo turbulento. Entretanto, ao analisar os dados relatados na literatura, Poesen et al. (2011) concluíram que o limite inferior ($b = 0.5$) é muito alto e, por isso, não é adequado para caracterizar o fluxo laminar.

Tabela 1. Limiar de resistência (k) e expoente (b) obtidos na literatura (continua).

Uso do Solo predominante	Autores	Local	k	b
Agrícola	Vandekerckhove et al. (2000)	Portugal	0.10	0.23
	Cheng et al. (2006)	China	0.06	0.38
	Nazari e Samani (2009)	Irã	0.03	0.20
	Verachtert et al. (2010)	Bélgica	0.02	0.12
	Knapen e Poesen (2010)	Bélgica	0.05	0.40
	Araujo (2011) - Canal raso	Brasil (São Pedro - SP)	0.02	0.38

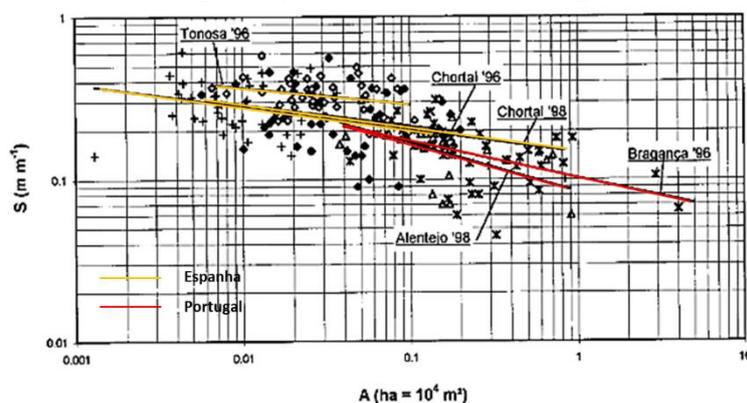
Tabela 1. Limiar de resistência (k) e expoente (b) obtidos na literatura (continuação).

Uso do Solo predominante	Autores	Local	k	b
Agrícola	Araujo (2011) - Canal profundo	Brasil (São Pedro - SP)	0.01	0.44
	Stabile (2013)	Brasil (Piratininga - SP)	0.06	0.08
	Neves (2017)	Brasil (São Pedro - SP)	0.06	0.28
Pastagem	Vandekerckhove et al. (2000)	Grécia	0.29	0.14
	Vandekerckhove et al. (2000)	Portugal	0.08	0.41
	Vandekerckhove et al. (2000)	Espanha	0.01	0.27
	Nyssen et al. (2002)	Etiópia	0.26	0.50
	Pederson et al. (2006)	USA	0.02	0.47
	Parkner et al. (2006)	Nova Zelândia	0.43	0.23
	Zucca et al. (2006)	Itália	0.18	0.20
	Menéndez-Duarte et al. (2007)	Espanha	0.46	0.18
	Gómez-Gutierrez et al. (2009)	Espanha	0.02	0.46
	Munoz-Robles et al. (2010)	Austrália	0.02	0.36

Fonte: Adaptado de Torri e Poesen (2014).

Com a finalidade de detalhar os limiares topográficos, os próximos parágrafos descrevem de maneira mais detalhada os resultados obtidos por alguns autores, bem como as condições observadas no processo de desencadeamento. Vandekerckhove et al. (2000) obtiveram limiares topográficos para locais com características de uso do solo e clima semelhantes. Todavia, foi observada uma variação no limiar devido, principalmente, à declividade, à profundidade dos solos e à presença de fragmentos de rocha na camada superficial do solo. Em síntese, segundo os autores, a posição mais horizontal para o conjunto de dados da Espanha é atribuída à forte influência do fluxo subsuperficial em uma região com encostas íngremes, que condiciona processos de escorregamentos (Figura 15).

Figura 15. Limiar topográfico para erosões efêmeras na região do Mediterrâneo.

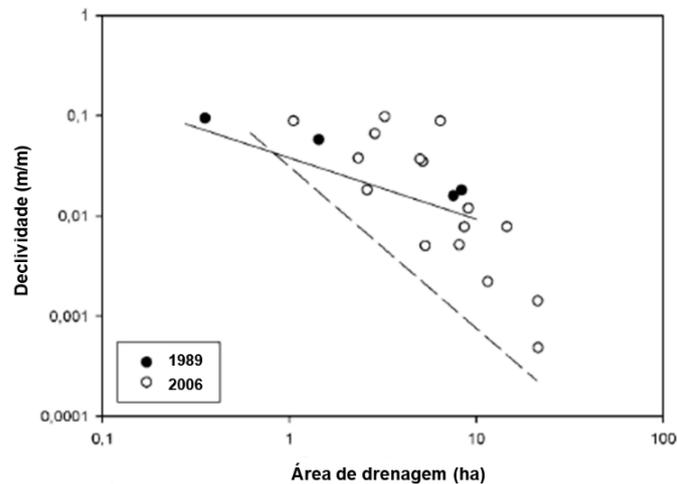


Fonte: Adaptado de Vandekerckhove et al. (2000)

Outros fatores, como ações antrópicas podem influenciar na apresentação do limiar topográfico. A exemplo dessa influência, Nyssen et al. (2002) obtiveram os valores mais altos para os coeficientes k e b e, nesse caso, a deflagração das erosões está condicionada com a presença de estradas nas áreas de drenagem. Resultado semelhante foi obtido por Svoray e Markovitch (2009), que constataram a influência de estradas não pavimentadas e linhas de plantio em áreas agrícolas nas condições hidrológicas.

Gómez-Gutiérrez et al. (2009a) analisaram a influência do processo de evolução das erosões no limiar topográfico (Figura 16). Os autores observaram que os valores de declividade crítica em 1986 foram relativamente maiores, o que se deve a posição inicial das cabeceiras, bem como os diferentes valores de k e b . Essas mudanças estavam relacionadas com as alterações no uso do solo, sendo a principal o aumento de áreas de pastagem.

Figura 16. Comparação para os limiares topográficos obtidos em 1989 e 2006.



Fonte: Adaptado de Gómez-Gutiérrez et al. (2009a)

Para explicar a interferência da dinâmica do uso do solo na predição da erosão, os autores citados desenvolveram o modelo apresentado na Figura 7b. A posição inicial do limiar topográfico é alta, devido à presença de cobertura vegetal densa, contudo à medida que as modificações do uso do solo começaram a ocorrer como a transformação de floresta para o uso agrícola as condições topográficas diminuíram. Dessa forma, fica evidente que existe uma relação entre o uso do solo e o avanço da cabeceira que, por sua vez, pode modificar as condições hidrológicas e, conseqüentemente as condições deflagradoras dos processos erosivos.

De acordo com Knapen e Poesen (2010), as mudanças no uso influenciam diretamente nas propriedades do solo e, conseqüentemente, no limiar de resistência (k). Os autores constataram que as mudanças no uso do solo, práticas de manejo agrícola e medidas de

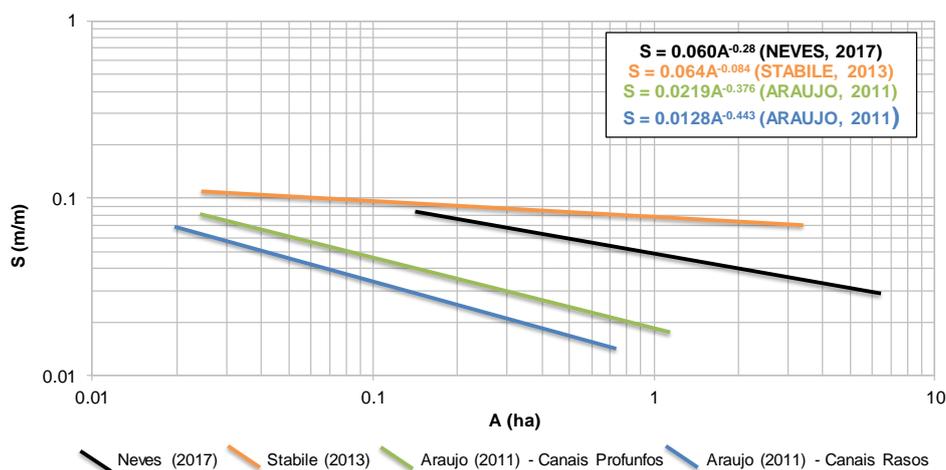
conservação podem modificar algumas propriedades do solo, como quantidade de água, densidade e matéria orgânica e, portanto, influenciam na resistência, principalmente nas camadas superficiais. Essa variação modifica a dinâmica hidrológica e os possíveis locais de iniciação do processo erosivo.

No Brasil, especificamente nas regiões de São Pedro (SP) e Bauru (SP), o método do limiar topográfico foi aplicado em três pesquisas (Figura 17). O trabalho de Araújo (2011) foi realizado na região de São Pedro e envolveu a proposição de um limiar topográfico para canais rasos (<1m) e profundos (>1 m). Para calcular $S \times A$, utilizou-se como base o MDE e, em relação às áreas de contribuição, o algoritmo D8 (*Hydrology toolset - ArcMap*).

Para investigar os limiares críticos de erosões localizadas em Piratininga, Stabile (2013) mensurou a declividade de duas maneiras: em campo utilizando um pantômetro e através do MDE, em que foram obtidas, também, as áreas de contribuição através do modelo matemático *Shalstab* no programa *ArcView*.

Neves (2017) também desenvolveu sua pesquisa na região de São Pedro, porém, diferentemente de Araújo (2011), a autora considerou outros pontos de erosão localizados na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Meio, identificados com o auxílio de ortofotos da Emplasa (2011). Para a obtenção da declividade e área de contribuição, utilizou-se o MDE e ferramentas de análise espacial, como o *TauDEM Tools*.

Figura 17. Limiares topográficos obtidos no estado de São Paulo.



Fonte: A autora.

Convém mencionar que Araújo (2011) e Neves (2017) desenvolveram seus trabalhos na mesma região e obtiveram posições diferentes para o limiar topográfico, o que se deve a três razões principais: algoritmo de fluxo diferente para a obtenção da área de drenagem (*D8* e *D-*

Infinity), mapeamento do ponto de cabeceira com escala temporal diferente e análise dos processos erosivos considerando a profundidade dos canais.

2.5.3 Características ambientais e interpretação do limiar topográfico

Conforme descrito nos itens anteriores, o modelo de predição proposto por Patton e Schumm (1975) foi desenvolvido para áreas com características ambientais semelhantes e, por isso, a variabilidade espacial e temporal das condições ambientais podem ocasionar a aleatoriedade dos dados. Dessa forma, tanto a variação espacial como a temporal podem influenciar na interpretação do limiar topográfico.

Segundo Vandekerckove et al. (2000), devido à interação entre os fatores condicionantes, como solo, uso do solo e clima, é fundamental distinguir o conjunto de dados considerando condições físicas semelhantes. Para Hayas et al. (2017), adotar um único modelo determinístico para uma área pode levar à super-predição (*overprediction*) ou sub-predição (*underprediction*) dos limiares topográficos.

Nesse sentido, desenvolver uma análise considerando características físicas e ambientais semelhantes favorece a aquisição de resultados mais satisfatórios, pois limita-se às condições iniciais do processo erosivo (VANDEKERCKOVE et al., 2000; MENÉNDEZ-DUARTE et al., 2007; PARKNER et al., 2006; NAZARI; SAMANI, 2009; TORRI; POESEN, 2014; HAYAS et al. 2017; YIBELTAL et al. 2019).

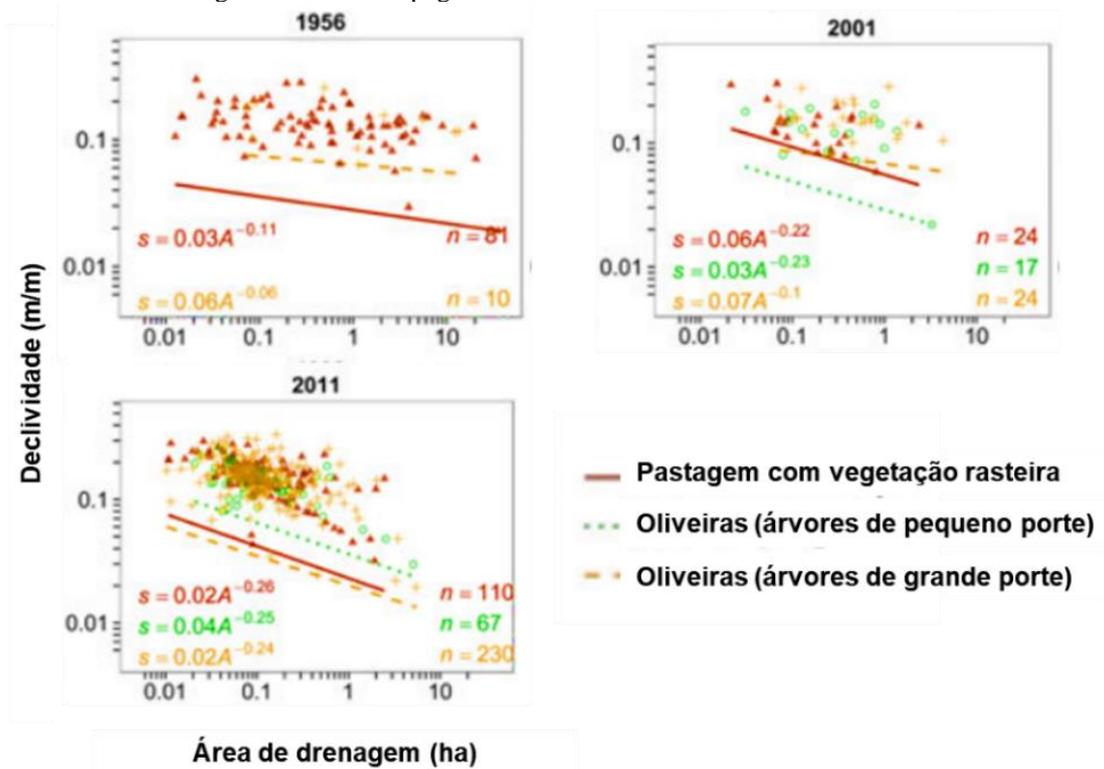
Vandekerckove et al. (2000) foram os primeiros autores a propor uma subdivisão no conjunto de dados com base no uso do solo predominante. Os autores consideraram feições erosivas localizadas em área agrícola ($S = 0.08A^{-0.3}$; $R^2 = 0.51$) e área de pastagem ($S = 0.07A^{-0.4}$; $R^2 = 0.72$). Nazari e Samani (2009) avaliaram as condições geomorfológicas para o desencadeamento de erosões no Irã, e obtiveram os seguintes limiares: $S = 0.04A^{-0.26}$ e $R^2 = 0.29$ para um conjunto de dados integrado; e $S = 0.04A^{-0.18}$ e $R^2 = 0.52$ para erosões localizadas em áreas onde não há cultivo agrícola intenso.

Da mesma forma, Neves (2017) analisou o limiar topográfico com base na posição no relevo, sendo canais em encosta ($S=0.05A^{-0.41}$; $R^2 = 0.50$) e canais em drenagem ($S=0.074A^{-0.39}$; $R^2 = 0.65$). Verifica-se, portanto, que ao considerar características homogêneas, obtém-se um melhor ajuste dos dados e, conseqüentemente, uma análise mais precisa dos valores críticos de S e A.

Hayas et al. (2017) desenvolveram uma análise considerando os efeitos do uso do solo para diferentes escalas temporais (Figura 18). Com relação ao uso do solo, os limiares obtidos

são semelhantes e, nota-se que ambas as classes influenciam de maneira semelhante no surgimento das erosões. Entretanto, independentemente do uso do solo, observou-se uma variabilidade temporal significativa nos valores do limiar topográfico, que podem estar relacionadas com as características da chuva e cobertura vegetal.

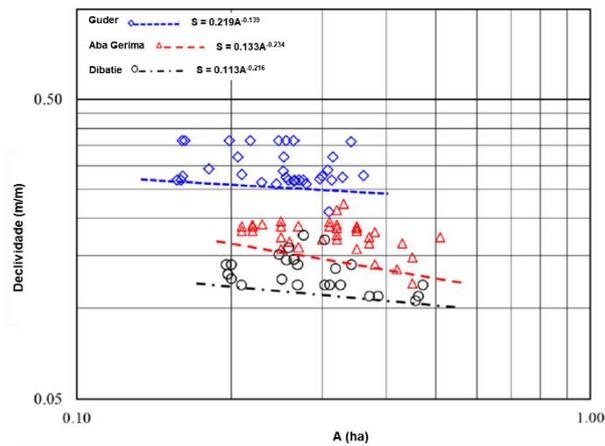
Figura 18. Limiar topográfico considerando três classes de uso do solo.



Fonte: Adaptado de Hayas et al. (2017)

Yibeltal et al. (2019) avaliaram o limiar de predição para feições localizadas na Etiópia, em três locais com zonas agroecológicas e morfológicas: *Guder* (agroecologia de montanha); *Aba Gerima* (agroecologia de região central); e *Dibatie* (agroecologia de planície). Segundo os autores, analisando os limiares em função de características ambientais, é possível identificar melhor os processos dominantes (Figura 19). Observa-se que, em *Guder*, há dominância de fluxo subterrâneo, enquanto em *Dibatie* e *Aba Gerima* o surgimento ocorre devido ação do escoamento superficial.

Figura 19. Limiar topográfico para erosões localizadas em três bacias hidrográficas.



Fonte: Yibeltal et al. (2019).

2.5.4 Representação espacial

Para representar espacialmente as áreas críticas, isto é, potenciais à ocorrência de erosão, utiliza-se as equações do limiar topográfico e as ferramentas de geoprocessamento. Diversos autores usaram essa metodologia para representar espacialmente o limiar topográfico e, obtiveram resultados satisfatórios: Vandaele et al. (1997); Gómez-Gutierrez et al. (2009a); Jetten et al. (2006); Svoray e Markovitch (2009); Nazari e Samani (2009); Millares et al. (2012) e Neves (2017).

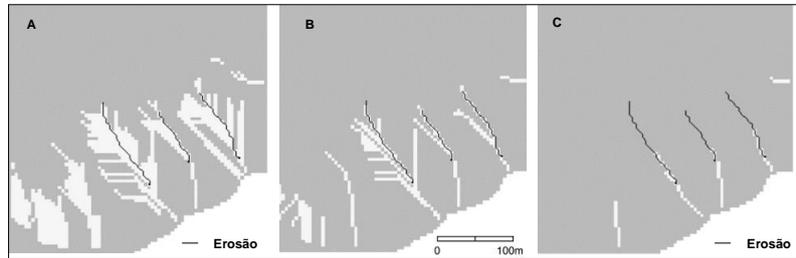
Segundo Jetten et al. (2006), a qualidade desses mapas depende essencialmente da resolução do MDE e da acurácia da rede de drenagem, que influencia nas zonas de fluxo acumulado. Recomenda-se, ainda, que sejam utilizados MDE hidrologicamente consistentes e, para evitar problemas na representação das áreas críticas os autores adotaram algumas medidas:

- Determinar inicialmente as zonas críticas, considerando o valor mínimo de declividade necessário para desencadear a erosão ($S_{\text{crítico}}$);
- Desconsiderar as bordas do mapa (*edge*) para evitar que sejam criados caminhos de fluxo nos divisores da bacia;
- Reclassificar os *pixels* não críticos como críticos, caso o *pixel* a montante ou a jusante fosse classificado como crítico. Nesse caso, a reclassificação é realizada assumindo que o escoamento superficial é capaz de superar pequenas áreas classificadas como não críticas.

Os autores citados consideraram as equações que relacionam $S \times A$ e largura do fluxo (Equação 16, Equação 17 e Equação 18) para representar espacialmente as áreas potenciais à erosão. O modelo de Desmet e Govers (1997) foi o que apresentou melhor concordância com as erosões mapeadas em campo (Figura 20). Segundo os autores, ao utilizar um modelo para

previsão baseado na largura do fluxo, obtém-se uma precisão adicional na modelagem de erosão, pois a largura do fluxo (w) representa a intensidade do fluxo superficial.

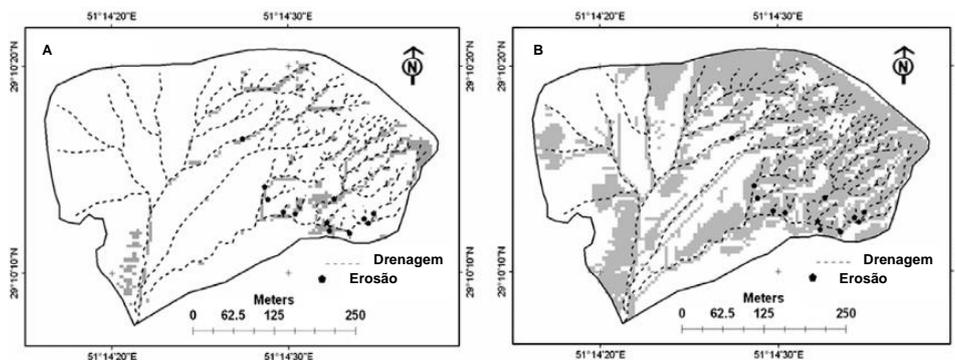
Figura 20. Áreas potenciais com diferentes relações $SxAxW$: (A) Vandaele et al. (1996); (B) Desmet e Govers (1997) e (C) Vandaele et al. (1997).



Fonte: Adaptado de Jetten et al. (2006).

Considerando as condições do limiar topográfico e uso do solo, Nazari e Samani (2009) elaboraram dois mapas para a previsão de erosão em áreas agrícolas e com pastagem (Figura 21). Para áreas com presença de pastagem, identificou-se um percentual de 6.5% de áreas críticas; enquanto para áreas agrícolas, o valor obtido foi 12%. Através da representação espacial, foi possível prever as áreas vulneráveis e avaliar quantitativamente a influência do uso do solo nas áreas críticas.

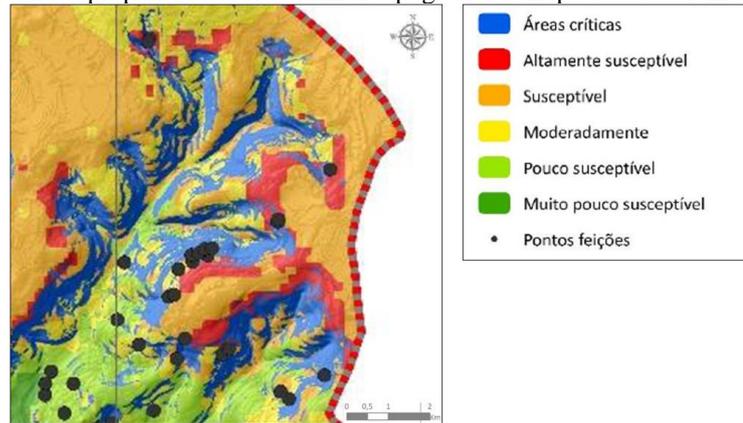
Figura 21. Áreas propensas a erosão conforme o uso do solo: (A) pastagem natural e (B) agrícola.



Fonte: Adaptado de Nazari e Samani et al. (2009).

Da mesma maneira, no Brasil, Neves (2017) utilizou-se do modelo do limiar topográfico para representar espacialmente as áreas potenciais à ocorrência de erosão. A autora comparou o mapa obtido com a carta de suscetibilidade à erosão elaborada por Gomes (2002) e os resultados foram satisfatórios (Figura 22). As áreas mais suscetíveis mostraram uma conformidade de 68.72% com as áreas críticas. Apesar de considerarem atributos de entrada diferentes, o percentual obtido revela a compatibilidade entre os métodos de mapeamento e, portanto, na ausência de um banco de dados mais completo, o método do limiar topográfico pode auxiliar na identificação de áreas potenciais à erosão.

Figura 22. Áreas propensas a erosão: limiar topográfico x mapa de suscetibilidade.



Fonte: Adaptado de Neves (2017).

Portanto, a representação espacial do limiar topográfica pode auxiliar a identificação das áreas com alta suscetibilidade à erosão. Além disso, pode orientar as práticas de manejo e conservação do solo, principalmente, nas em áreas agrícolas e com pastagem. Para Arabameri et al. (2019), o mapa de áreas críticas também pode auxiliar em ações de planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas e constitui uma ótima ferramenta para previsão das áreas mais suscetíveis à erosão.

2.6 Análise multivariada de dados

Com o avanço computacional e grande disponibilidade de dados em formato digital, novas técnicas têm sido aplicadas para compreender a dinâmica dos processos erosivos. Nesse sentido, é cada vez mais comum o uso de técnicas de análise multivariada em pesquisas que investigam os fatores condicionantes das erosões, bem como a suscetibilidade à erosão. Esse subcapítulo apresenta os conceitos e a fundamentação teórica da análise multivariada de dados, especificamente da técnica de regressão logística.

2.6.1 Aspectos conceituais e técnicas

Para analisar quantitativamente problemas complexos como a erosão, as técnicas de análise multivariada de dados podem ser úteis, pois permitem avaliar a probabilidade de ocorrência desse fenômeno a partir das relações estatísticas estabelecidas entre as variáveis ambientais e a distribuição espacial das erosões (VANWALLEGHEM et al., 2008; GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al. 2009b).

Segundo Hair et al. (2014), atualmente, nas diversas áreas da ciência, muitas informações coletadas e armazenadas estão disponíveis para serem mineradas e algumas dessas informações

podem ser analisadas e compreendidas com estatística multivariada. Para Pitombo (2007), o avanço computacional é um fator que contribuiu muito com a aplicação de técnicas estatísticas mais complexas. Dessa forma, o uso dessas técnicas, com o auxílio de linguagem computacional, pode contribuir com o avanço e aprimoramento do conhecimento e, assim auxiliar na tomada de decisão acerca de fenômenos complexos.

Em suma, a análise multivariada de dados representa um conjunto de técnicas estatísticas aplicadas para entender fenômenos complexos, que analisam simultaneamente mais de duas variáveis, realizam medições e identificam padrões ou diferenciam grupos com base nas diversas interações de um conjunto de dados. Essas técnicas são extensões de análise univariada e bivariada, e foram aprimoradas para incluir várias variáveis preditoras (JOHNSON; WICHERN, 2007; HAIR et al., 2014).

Além do mais, de acordo com Hair et al. (2014), no âmbito da análise estatística multivariada, as variáveis devem ser aleatórias e inter-relacionadas e, o efeito dessas variáveis no fenômeno analisado não pode ser interpretado separadamente. Dessa maneira, os principais objetivos da análise estatística multivariada são medir, explicar e prever o grau de relacionamento entre as variáveis.

As técnicas de análise estatística multivariada podem ser classificadas conforme o objetivo da pesquisa e natureza dos dados (Figura 23). As técnicas de dependência são aquelas em que uma variável ou um conjunto de variáveis dependentes é previsto ou explicado por meio de outras variáveis, denominadas independentes. Essas técnicas podem ser divididas em dois grupos principais, conforme o número de variáveis dependentes e a natureza das variáveis (métrica ou não métrica). As técnicas de interdependência são aquelas em que as variáveis são analisadas simultaneamente com o objetivo de encontrar estruturas subjacentes ao conjunto de dados (HAIR et al., 2014).

Dessa forma, a análise multivariada pode auxiliar no desenvolvimento de uma ampla gama de pesquisas. No campo das geociências, destacam-se o uso das seguintes técnicas: regressão logística, árvore de decisão e floresta aleatória (ARABAMERI et al. 2018; GAROSI et al. 2019; MOSAVI et al. 2020; GHOSH; MAITI, 2021).

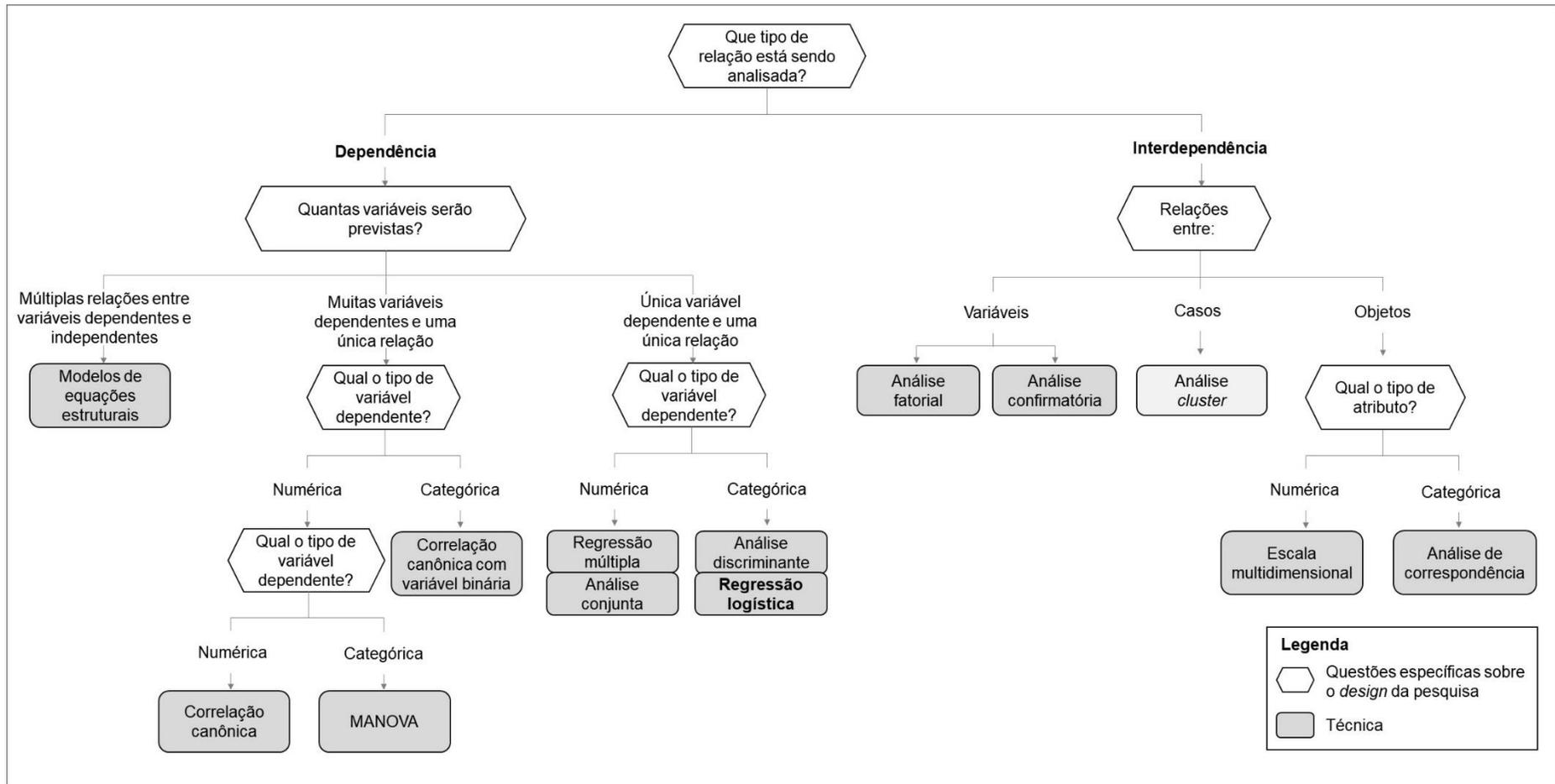
Entre esses três métodos, a regressão logística tem sido usualmente aplicada nos estudos preditivos de processos erosivos (VANWALLEGHEM et al., 2008; PIKE et al., 2009; GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al., 2009b; AKGÜN; TÜRK, 2011; LUCÁ et al., 2011; CONOSCENTI et al. 2014; DEBANSHI; PAL, 2018; GHOSH; MAITI, 2021).

Uma possível explicação se deve ao fato de a técnica não considerar muitas premissas rígidas, quando comparada com outras técnicas de análise multivariada. Segundo Lucá et al.

(2011), Conoscenti et al. (2014) e Debasnshi e Pal (2018), a regressão logística é uma técnica apropriada para prever áreas suscetíveis à erosão, pois considera uma variável dependente categórica (ocorrência ou não de um evento), variáveis independentes quantitativas e categóricas e não pressupõem a normalidade das variáveis.

Além disso, a técnica tem como objetivo identificar o efeito das variáveis independentes na variável dependente e seu resultado pode ser utilizado para estabelecer um sistema de classificação. Nesse sentido, a modelagem de processos erosivos, com o apoio da estatística multivariada, pode auxiliar na identificação de um conjunto de fatores condicionantes que explicam a ocorrência da erosão, a classificação das áreas suscetíveis à erosão e, ainda, pode ser útil na predição de situações futuras.

Figura 23. Síntese das técnicas de análise multivariada.



Fonte: Adaptado de Hair et al. (2014).

2.6.2 Regressão Logística

A regressão logística é uma técnica similar às demais técnicas de regressão utilizadas na estatística, ou seja, tem como objetivo encontrar o melhor ajuste para descrever a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. A principal diferença se deve ao fato de que, na regressão logística binária, a variável dependente é dicotômica, isto é, assume apenas dois valores possíveis (HOSMER; LEMESHOW, 2000; HAIR et al., 2014).

Assim, a regressão logística pode ser aplicada quando o conjunto de dados é composto por uma variável dependente dicotômica, normalmente codificada como 0 e 1, e variáveis independentes métricas (quantitativas) ou não métricas (categóricas). Na estatística multivariada, o padrão binário de uma variável dependente permite o desenvolvimento de modelos preditivos e, na regressão logística a resposta desse modelo é expressa em termos de probabilidade de ocorrência (HAIR et al., 2014).

Desse modo, a codificação da variável dependente assume uma importância na organização dos dados, pois os valores atribuídos interferem na interpretação do modelo de regressão logística. Segundo Hair et al. (2014), quando a variável dependente é projetada para prever se um evento aconteceu ou não, o grupo que representa a ocorrência do evento deve ser codificado como 1 e a não ocorrência como 0, pois os coeficientes de regressão representam o efeito das variáveis independentes na probabilidade desse evento ocorrer.

Para estimar a resposta de uma variável dependente, limitada a 0 e 1, a regressão logística utiliza a função *logit*, que representa a razão de probabilidade de $Y = 1$, dada as variáveis x (Equação 25). A Figura 24 mostra a curva logística que representa a relação entre as variáveis dependente e independentes, ou seja, para cada observação no conjunto de dados, a técnica prevê um valor entre 0 e 1.

No modelo de regressão logística os coeficientes ($b_0, b_1, b_2, b_3...b_n$) são estimados pelo método da máxima verossimilhança, que atribui os valores maximizando a probabilidade de obtenção dos dados observados. Ou seja, os valores dos coeficientes maximizam a estimativa da probabilidade de $Y = 1$ em função das variáveis independentes (HOSMER; LEMESHOW, 2000). Desse modo, o modelo é interpretado com base nos coeficientes de regressão, que expressam o poder discriminatório das variáveis independentes.

Figura 24. Curva logística.



$$\text{Logit} = \ln \left[\frac{P(Y = 1)}{1 - P(Y = 1)} \right] = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad \text{Equação 25}$$

em que: P = probabilidade de ocorrência de um evento; Y = variável dependente; b_0 = intercepto; b_n = coeficientes de regressão; x = as variáveis independentes.

Após estimar os coeficientes do modelo de regressão logística, avalia-se a sua significância estatística. Para isso, utiliza-se um teste de hipótese, que avalia se os coeficientes atribuídos às variáveis independentes do modelo estão significativamente relacionados com a variável dependente, ou seja, o teste compara os valores observados com os valores preditos, incluindo ou não a variável em questão no modelo. Segundo Hosmer e Lemeshow (2000), os testes estatísticos utilizados são razão de verossimilhança, *Wald e Score*.

Em suma, se o coeficiente atribuído à variável independente for estatisticamente significativo, pode-se interpretar seu impacto na probabilidade estimada. Contudo, ao interpretar o coeficiente, deve-se considerar que essa medida indica as variações na proporção da probabilidade e, a direção (positiva ou negativa) seu efeito (HAIR et al., 2014). Isto é, um coeficiente com direção positiva indica que a variável independente condiciona um aumento na probabilidade prevista e vice-versa para um coeficiente com direção negativa. Ademais, para interpretar a magnitude dos coeficientes de regressão no valor de probabilidade deve-se considerar os coeficientes em valores exponenciais.

Ao aplicar a regressão logística, deve-se levar em conta dois aspectos importantes, o tamanho da amostra, que deve apoiar de maneira adequada a estimativa do modelo de regressão

logística, e a divisão da amostra entre treino e teste. A técnica de estimação dos coeficientes (máxima verossimilhança), por exemplo, exige um tamanho de amostra maior. Nesse sentido, Hosmer e Lemeshow (2000) recomendam amostras com no mínimo 400 observações; enquanto Hair et al. (2014) sugere pelo menos 10 observações por parâmetro estimado.

Por fim, deve-se considerar a validação do modelo calibrado. Segundo Hair et al. (2014), essa etapa pode ser realizada com amostras, que representam uma parte do conjunto geral de dados. Para isso, aplica-se o modelo de regressão logística, considerando um conjunto separado denominado (amostra de validação), e avalia-se os níveis preditivos alcançados, isto é, a eficiência do modelo.

2.6.2.1 Métodos de construção de modelos de regressão logística

Para desenvolver um modelo de regressão logística, é fundamental desenvolver critérios que possibilitem uma boa seleção das variáveis. Para isso, utilizam-se métodos como *stepwise*, que realiza esse procedimento de forma sequencial, com base em critérios estatísticos (HOSMER; LEMESHOW, 2000). Essa abordagem é bastante utilizada na regressão logística, pois possibilita a avaliação de vários modelos, calibrados com diferentes variáveis, e a escolha daquele modelo que melhor representa o objeto em análise.

Uma medida estatística comumente usada na seleção de modelos é o Critério de Informação de Akaike (*Akaike Information Criterion* - AIC). O AIC é uma medida que avalia a qualidade do ajuste do modelo e, para isso, considera a distância entre um modelo ajustado e um modelo real com base na máxima verossimilhança. Assim, quando existem vários modelos, os valores de AIC são calculados e comparados para encontrar aquele com valor mínimo de AIC que, por sua vez, representa o modelo com melhor adequação aos dados (BOZDANGAN, 1987). Portanto, o modelo com menor AIC é aquele com maior ganho de informação, ou seja, contém as variáveis independentes que melhor explicam o comportamento da variável dependente.

2.6.2.2 Avaliação do ajuste do modelo

Para avaliar o ajuste do modelo de regressão logística, ou seja, se as probabilidades produzidas refletem com precisão as características dos dados, são consideradas algumas medidas de ajustamento, que indicam a qualidade do ajuste do modelo e se existe diferença entre os valores observados e preditos (HOSMER; LEMESHOW, 2000; HAIR et al. 2014).

Entre essas medidas, destacam-se o *pseudo R²* e o Teste de Hosmer e Lemeshow, bem como a matriz de classificação e a Curva ROC como medidas de desempenho.

a) Teste de Hosmer e Lemeshow

Mede a qualidade de ajuste do modelo, indicando se existem diferenças significativas entre os valores observados e preditos. Nesse teste, os dados são divididos em grupos iguais e, os valores preditos e observados são comparados com base no teste do Qui-quadrado (FÁVERO et al. 2009). O critério de avaliação é estabelecido a partir de um nível de significância ($\alpha = 0.05$) e busca-se não rejeitar a hipótese nula ($p\text{-valor} > \alpha$), que supõe que o modelo está bem ajustado aos dados, ou seja, que as proporções entre os valores preditos e observados são as mesmas.

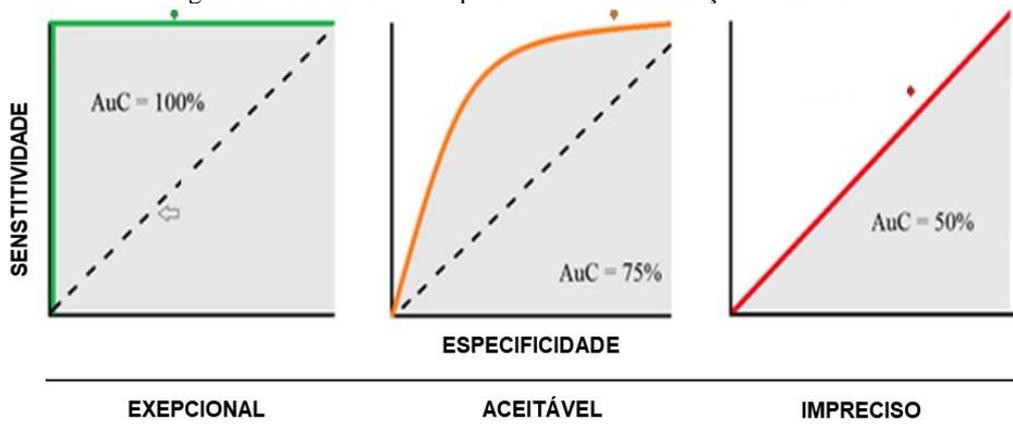
b) Matriz de confusão

Mede a taxa de acerto com base em uma matriz de classificação cruzada, que relaciona os valores preditos com os observados. Para analisar o poder preditivo, utiliza-se um valor de corte (c), normalmente igual a 0.5, sendo que os valores de probabilidade acima desse ponto indicam a ocorrência do evento de interesse e valores abaixo indicam a ausência. Para determinar o percentual de acerto do modelo, calcula-se a relação entre sensibilidade (verdadeiro positivo) e especificidade (verdadeiro negativo). Logo, a sensibilidade corresponde ao percentual de acerto dos casos de ocorrência do evento; enquanto a especificidade o percentual de acerto dos casos em que não ocorreram o evento (FÁVERO et al. 2009).

c) Curva ROC (Receiver Operating Characteristic)

É uma medida de desempenho dos modelos preditivos derivada da teoria de detecção de sinal. O gráfico da curva ROC representa a relação sensibilidade e especificidade, sendo que quanto mais próxima a Curva ROC estiver da reta diagonal, pior é o poder discriminatório do modelo (Figura 25). Para descrever a curva ROC, utiliza-se a AUC (*Area Under Curvature*), uma medida que indica a qualidade do modelo em termos de capacidade de discriminação (HOSMER; LEMESHOW, 2000). Para interpretar a capacidade de discriminação do modelo com base no valor AUC considera-se as diretrizes da Tabela 2.

Figura 25. Curva ROC e capacidade de discriminação do modelo.



Fonte: Adaptado de Glen (2019).

Tabela 2. Valores de AUC e capacidade de discriminação do modelo de regressão logística.

Valores AUC	Interpretação
AUC = 0.5	Não há discriminação
$0.5 < \text{AUC} < 0.7$	Discriminação pobre
$0.7 \leq \text{AUC} < 0.8$	Discriminação aceitável
$0.8 \leq \text{AUC} < 0.9$	Discriminação excelente
$\text{AUC} \geq 0.9$	Discriminação excepcional

Fonte: Adaptado de Hosmer; Lemeshow (2000).

d) Pseudo R²

É uma medida que indica a qualidade do ajuste do modelo. Deve ser interpretada como a proporção da variabilidade total contabilizada pelo modelo de regressão logística, de maneira semelhante ao coeficiente de determinação R² (HAIR et al., 2014). Os pacotes estatísticos utilizam as medidas estabelecidas por *Cox and Snell*, *McFadden* e *Nagerlkerke* e, normalmente, utiliza-se o R² de *Nagerlkerke*, por apresentar valores em uma escala estatística ajustada entre 0 e 1.

Convém mencionar que, quando comparado com os valores de R² dos modelos de regressão linear, os valores de R² encontrados nos modelos de regressão logística são baixos (HOSMER; LEMESHOW, 2000). Desse modo, ao avaliar a qualidade do ajuste do modelo, o R² não pode ser interpretado de maneira independente e outras medidas devem ser consideradas.

Por fim, segundo Hosmer e Lemeshow (2000), o uso das medidas de ajustamento deve ser compatível com os objetivos da pesquisa, isto é, se o objetivo da pesquisa está relacionado com a estimativa dos coeficientes de regressão, é importante avaliar a sua significância

estatística. Por outro lado, se o objetivo é estimar a probabilidade de um evento, deve-se avaliar a qualidade do ajuste e capacidade de discriminação do modelo.

2.6.2.3 Multicolinearidade no modelo de regressão logística

A colinearidade corresponde à associação, medida como correlação entre duas variáveis independentes. Já a multicolinearidade refere-se à correlação entre três ou mais variáveis independentes. Assim sendo, um coeficiente de correlação igual a 1 indica colinearidade completa entre duas variáveis; enquanto um coeficiente igual a 0 indica a ausência de colinearidade (HAIR et al. 2014).

Segundo Hair et al. (2014), nos modelos de regressão, a correlação entre as variáveis independentes pode reduzir o poder preditivo de qualquer variável independente única. Nesse caso, para maximizar a previsão, com base em um conjunto de variáveis independentes, o modelo deve ser calibrado com variáveis independentes que tenham baixa multicolinearidade, mas sejam altamente correlacionadas com a variável dependente.

Para avaliar a multicolinearidade, utiliza-se o fator de inflação da variância (*Variance inflation factor* - VIF), uma medida que indica o grau de dependência de uma variável independente em relação às demais variáveis. Segundo Johnson e Wichern (2007), $VIF > 10$, indica um alto grau de colinearidade e, portanto, a multicolinearidade entre as variáveis causará efeito nos coeficientes de regressão.

2.6.3 Regressão logística e suscetibilidade à erosão

No campo das geociências, os primeiros modelos de regressão logística foram desenvolvidos com diferentes objetivos, como predição de deslizamentos (VANACKER et al. 2003) e processos erosivos (MARTINEZ-CASANOVAS et al., 2004; VANWALLEGHEM et al., 2008; PIKE et al., 2009; AKGÜN; TÜRK, 2011; LUCÁ et al., 2011; CONOSCENTI et al., 2014; BERGONESE; REIS, 2015; DEWITTE et al., 2015; GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al., 2015; DEBANSHI; PAL, 2018; HEMBRAM et al., 2018; ARABAMERI et al., 2019; ROY et al., 2020; RAZAVI-TERMEH et al., 2020; GHOSH; MAITI, 2021). Esse tópico descreve o uso dos modelos de regressão logística na análise da suscetibilidade à erosão.

Com o objetivo de avaliar os locais potenciais à ocorrência de erosão, os autores citados consideraram diversas variáveis independentes relacionadas com os aspectos geológicos, topográficos, uso do solo, entre outras. Conoscenti et al. (2014) mencionam a importância de utilizar planos de informação na mesma escala para obter as variáveis independentes, bem

como, se necessário, considerar variáveis independentes categóricas para representar as diferentes classes de um atributo. Com relação à variável dependente, dada a sua natureza binária e a característica do processo modelado, adota-se duas categorias para representar a ausência e presença de erosão. O Quadro 9 apresenta uma síntese de modelos de regressão logística aplicados à erosão.

Para classificar as áreas com e sem erosão, normalmente utiliza-se como base o mapa de inventário. Pike et al. (2009) e Lucá et al. (2011) recomendam dividir as áreas onde ocorreram as erosões em dois grupos aleatórios: conjunto de treinamento e teste, sendo o primeiro utilizado na calibração do modelo e, portanto, identificação dos fatores condicionantes, e o segundo utilizado para validar o desempenho do modelo.

Quadro 9. Modelos de regressão logística aplicados à erosão: local; objetivo e variáveis consideradas (continua).

Autores	Local	Objetivo	Variáveis independentes
Martinez-Casasnovas et al. (2004)	Espanha	Prever a ocorrência de processos erosivos.	Declividade; aspecto; curvatura do perfil; curvatura do plano; área de contribuição específica; TWI; SPI.
Vanwallegghem et al. (2008)	Bélgica	Identificar os principais fatores condicionantes e prever o local de desencadeamento.	Características relacionadas com o uso do solo; distância de estradas; solo; aspecto; declividade; SPI.
Pike et al. (2009)	EUA	Prever a ocorrência de processos erosivos.	Declividade; aspecto; curvatura do perfil; área de contribuição específica; SPI; STI; TWI.
Akgün e Türk (2011)	Turquia	Avaliar a suscetibilidade à erosão.	Declividade; curvatura do perfil; densidade de drenagem; litologia; uso do solo; SPI.
Lucá et al. (2011)	Itália	Avaliar a suscetibilidade à erosão.	Litologia; uso do solo; declividade; aspecto; curvatura do perfil; TWI; SPI; STI.
Conoscenti et al. (2014)	Itália	Avaliar a suscetibilidade à erosão.	Litologia; uso do solo; aspecto; elevação; declividade; curvatura do perfil; distância de estrada; distância dos canais de drenagem; SPI; STI; TWI.
Bergonese e Reis (2015)	Portugal	Identificar os principais fatores condicionantes.	Declividade; curvatura do perfil; curvatura transversal; orientação; distância da foz; área de drenagem; SPI; TWI.
Dewitte et al. (2015)	África	Desenvolver uma abordagem quantitativa para estimar a suscetibilidade à erosão.	Elevação; declividade; aspecto; curvatura do perfil; curvatura do plano; área de contribuição; litologia; STI; SPI; TWI.
Gómez-Gutiérrez et al. (2015)	Espanha	Prever a ocorrência de processos erosivos usando somente variáveis topográficas.	Elevação; declividade; curvatura do perfil; curvatura do plano; área de contribuição específica; SPI; STI; TWI.
Debanshi e Pal (2018)	Índia	Avaliar a suscetibilidade à erosão em função de fatores topográficos, erosividade, erodibilidade e resistência.	Declividade; aspecto; distância dos canais de drenagem; distância dos canais de drenagem; áreas úmidas; geologia; textura do solo; erosividade do solo; uso do solo; cobertura vegetal; temperatura mensal; SPI.
Hembram et al. (2018)	Índia	Avaliar a suscetibilidade à erosão.	Declividade; elevação; aspecto; uso do solo; chuva; geologia; SPI, STI; TWI

Quadro 10. Modelos de regressão logística aplicados à erosão: local; objetivo e variáveis consideradas (continuação).

Autores	Local	Objetivo	Variáveis independentes
Arabameri et al. (2019)	Irã	Avaliar a suscetibilidade à erosão.	Elevação; declividade; aspecto; curvatura do plano; densidade de drenagem; distância de estradas; solo; litologia; uso do solo; NDVI; SPI; STI e TWI.
Roy et al. (2020)	Índia	Identificar os fatores condicionantes e identificar áreas susceptíveis.	Elevação; declividade; aspecto; curvatura do plano; curvatura do perfil; geologia; geomorfologia; solo; densidade de drenagem; uso do solo; distância estrada; erosividade; erodibilidade; SPI; TWI.
Razavi-Termeh et al. (2020)	Irã	Avaliar a suscetibilidade à erosão.	Elevação; aspecto; declividade; curvatura do plano; distância da drenagem; distância da estrada; precipitação; litologia; solo; uso do solo; NDVI; TWI.
Ghosh e Maiti (2021)	Índia	Prever a ocorrência de processos erosivos.	Elevação; declividade; aspecto; erosividade; uso do solo; NDVI; SPI; TWI.

Legenda: NDVI = índice de vegetação por diferença normalizada; SPI = índice de potência de fluxo; STI = índice de transporte de sedimento; TWI = índice de umidade.

O desenvolvimento de um modelo de regressão logística se inicia considerando um modelo completo composto por todas as variáveis e, normalmente, por meio de um processo iterativo, as variáveis com coeficientes de regressão não significativos são eliminadas. Para garantir o desempenho do modelo, cada vez que uma variável é eliminada devem ser realizados os ajustes necessários, assim quando não for possível eliminar mais variáveis, conclui-se a análise de regressão logística (AKGÜN; TÜRK, 2011). Dessa maneira, espera-se que o modelo final seja calibrado com variáveis que possuam coeficientes estatisticamente significativos, apresente um bom ajuste, bem como boa capacidade de discriminação.

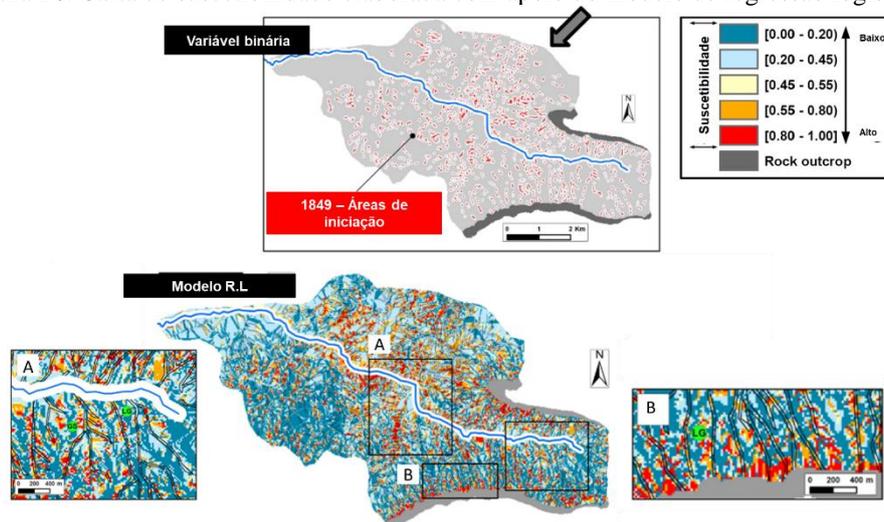
Segundo Vanwalleghem et al. (2008), ao analisar a significância estatística de cada variável independente, é possível inferir, por meio de uma técnica quantitativa os fatores que mais contribuíram com o desencadeamento da erosão. Desse modo, ao aplicar o modelo de regressão logística na Bélgica, os fatores condicionantes com maior importância na suscetibilidade à erosão foram declividade, aspecto e distância de áreas com vegetação.

O desempenho dos modelos de regressão logística na identificação de fatores condicionantes também foi constatado por Pike et al. (2009). Os autores compararam as técnicas de regressão logística e redes neurais e, concluíram que o modelo de regressão logística conseguiu prever adequadamente as áreas susceptíveis à erosão, sendo STI e TWI as variáveis mais preponderantes. Além do mais, dada a complexidade dos modelos desenvolvidos com redes neurais, bem como a resposta semelhante dos modelos, a regressão logística se mostrou mais apropriada para a área estudada.

Ao desenvolver um modelo de regressão logística para avaliar a suscetibilidade à erosão, deve-se levar em conta as características das variáveis independentes e o método de amostragem. Lucá et al. (2011) avaliaram a qualidade de dois modelos de regressão. Para isso, consideraram a calibração com variáveis independentes contínuas e categóricas e o método de amostragem por ponto e polígono. Analisando o poder de discriminação do modelo com base na ROC/AUC, os autores constataram que a amostragem por ponto se mostrou mais adequada para o conjunto de dados analisados, pois conseguiu delinear melhor os locais com erosão.

Dewitte et al. (2015) propuseram uma abordagem diferente para prever a suscetibilidade à erosão, conciliando o limiar topográfico com a regressão logística. Na primeira etapa, os autores utilizaram a relação $S \times A$ para identificar os locais de iniciação da erosão e posteriormente essas áreas foram divididas em dois grupos para representar a variável dependente (Figura 26). Na sequência, considerando a relação entre a variável dependente e um conjunto de variáveis independentes, os autores desenvolveram uma abordagem quantitativa para estimar a suscetibilidade à erosão para locais onde há poucos dados disponíveis (MDE, mapas topográficos e litologia). Enfim, os modelos de regressão logística apresentaram uma boa capacidade de discriminação ($AUC = 0.86$) e são eficientes para identificar as áreas propensas à erosão.

Figura 26. Carta de suscetibilidade elaborada com apoio do modelo de regressão logística.



Fonte: Adaptado de Dewitte et al. (2015).

Além da regressão logística, outras técnicas foram analisadas na análise da suscetibilidade à erosão, como regressão multivariada e árvore de regressão. Segundo Roy et al. (2020), ao comparar o uso dessas três técnicas, os modelos de regressão logística se mostraram mais eficientes ($ROC = 90.6$). Dessa forma, para além da modelagem preditiva,

essas técnicas auxiliam na identificação das áreas com potencial de desenvolvimento de erosão, assim como as cartas elaboradas podem ser úteis na implementação de medidas corretivas, minimizando os danos causados pela erosão.

Por fim, os próximos parágrafos apresentam alguns modelos de regressão logística obtidos na literatura. Pike et al. (2009) calibraram um modelo de regressão logística para prever erosões em áreas agrícolas (Equação 26). Akgün e Türk (2011), por sua vez, desenvolveram um modelo para investigar os fatores condicionantes de processos erosivos na Turquia (Equação 27); de maneira similar, Bergonse e Reis (2015) aplicaram a técnica para investigar os fatores condicionantes de erosões em Portugal (Equação 28). Já Arabameri et al. (2019) desenvolveram modelos para investigar a dinâmica de processos erosivos no Irã (Equação 29). Por fim, Ghosh e Maiti (2021) aplicaram o modelo de regressão logística para delinear os fatores condicionantes de processos erosivos localizados na Índia (Equação 30).

$$Logit = -3.63 + 1.11STI + 0.217TWI - 12.1PLAN \quad \text{Equação 26}$$

em que: STI = índice topográfico de transporte de sedimento; TWI = índice topográfico de umidade; $PLAN$ = curvatura do plano.

$$Logit = -5.9164 + 0.008357Wg + 0.001264SPI + 0.001821S - \\ 0.002798Dd + 0.9516996L - 0.002235Lc - 0.000722C \quad \text{Equação 27}$$

em que: W_G = grau de intemperismo; SPI = índice topográfico de potência de fluxo; S = declividade; Dd = densidade de drenagem; L = litologia; Lc = uso do solo; C = plano da curvatura.

$$Logit = -2.647 - 0.0002D_{DES} + 0.5719STI + 0.0995DEC \\ + 0.5044C_{PER} \quad \text{Equação 28}$$

em que: D_{DES} = distância da foz; STI = índice topográfico de transporte de sedimento; DEC = declividade; C_{PER} = curvatura do perfil.

$$Logit = -16.20 + 8.82NDVI + 1.97ST + 0.92SPI + 0.86LIT + \\ 0.46Dd + 0.38LULc + 0.001ASP + 0.00007DtF - 0.0001DtR - \quad \text{Equação 29}$$

$$0.0005DtS - 0.0021E - 0.0023Ci - 0.1STI - 0.23S - 0.4 PLc - \\ 0.63TWI$$

em que: *NDVI* = índice de vegetação por diferença normalizada; *ST* = tipo de solo; *SPI* = índice topográfico de potência de fluxo; *LIT* = litologia; *Dd* = distância drenagem; *Lc* = uso do solo; *DfF* = distância de falhas geológicas; *DtR* = distância de estradas; *E* = elevação; *Ci* = índice de convergência; *STI* = índice topográfico de transporte de sedimento; *S* = declividade; *PLc* = plano da curvatura; *TWI* = índice topográfico de umidade.

$$\text{Logit} = -82.09 + 0.026E - 0.721C + 0.003A + 0.002R - 0.372TWI - \\ 0.187S + 0.187G + 2.04Df + 0.37Re - 31.65NDVI - 0.540STI - \\ 1.19LULC \quad \text{Equação 30}$$

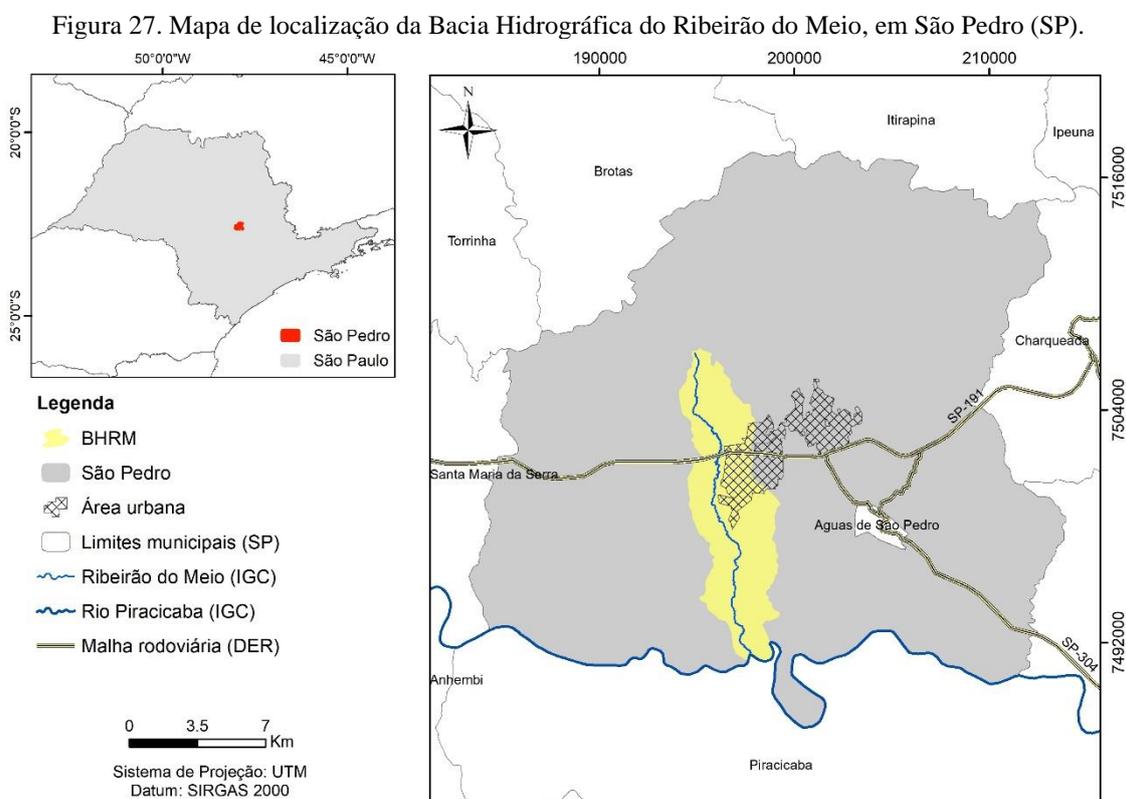
em que: *E* = elevação; *C* = curvatura; *A* = aspecto; *R* = *runoff*; *TWI* = índice topográfico de umidade; *S* = declividade; *G* = geologia; *Df* = frequência de drenagem; *NDVI* = índice de vegetação por diferença normalizada; *Re* = erosividade da chuva; *STI* = índice topográfico de transporte de sedimento; *LULC* = uso do solo.

As equações mostram que os modelos de regressão logística podem ser aplicados para investigar a ocorrência dos processos erosivos em diferentes locais, todavia, o caráter dinâmico das erosões evidencia a necessidade de desenvolver modelos específicos para cada bacia hidrográfica ou região. Para isso, é fundamental definir critérios que justifiquem a escolha das variáveis independentes, como também devem ser selecionadas variáveis com escala semelhante (HOSMER; LEMESHOW, 2000; CONOSCENTI et al., 2014).

Desse modo, essas pesquisas mostram que é possível desenvolver análises estatísticas para caracterizar os fatores condicionantes e auxiliar a elaboração de produtos cartográficos, como a carta de suscetibilidade. Assim, esses modelos e cartas poderão auxiliar a gestão dessas áreas, minimizando a degradação ambiental, bem como as perdas ambientais, sociais e econômicas.

3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

A área em estudo compreende a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Meio (BHRM), localizada no município de São Pedro, na região centro-leste do estado de São Paulo. A área é limitada pelas coordenadas UTM 194000 - 199000 E, e 7507000 - 7491000 N, e apresenta uma área de 48,06 km², da qual 5 km² correspondem a uma porção da área urbana do município de São Pedro (Figura 27). O Ribeirão do Meio nasce na Serra de São Pedro, possui 41 km de extensão, ordem de ramificação 5 conforme a classificação de *Strahler* e sua foz no Rio Piracicaba. A BHRM está situada na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Piracicaba/Capivari/Jundiá (UGRHI 05).



Fonte: A Autora.

A área do município de São Pedro possui 611 km², com população de 36.298 habitantes, e PIB *per capita* de 21.316 reais (IBGE, 2021). Localiza-se aproximadamente a 190 km de São Paulo e tem como principais rodovias de acesso a SP-304 (Rodovia Geraldo de Barros) e SP-191 (Rodovia Wilson Finardi). Os municípios limítrofes à São Pedro são: ao norte, Itirapina, Brotas e Torrinha; ao sul, Piracicaba; à leste, Charqueada; e à oeste Santa Maria da Serra.

A BHRM foi selecionada como área de estudo devido ao conhecimento prévio acumulado em função de outras pesquisas realizadas, como Gomes (2002), Araújo (2011) e Neves (2017), e da disponibilidade de produtos cartográficos, como mapas e fotografias aéreas em escala compatível com a escala de trabalho (1:20.000). Além do mais, as características do meio físico favorecem a aplicação do limiar topográfico. Da mesma forma, a aplicação do modelo de regressão logística pode auxiliar na compreensão dos fatores condicionantes ao longo dos anos, bem como na análise da suscetibilidade à erosão.

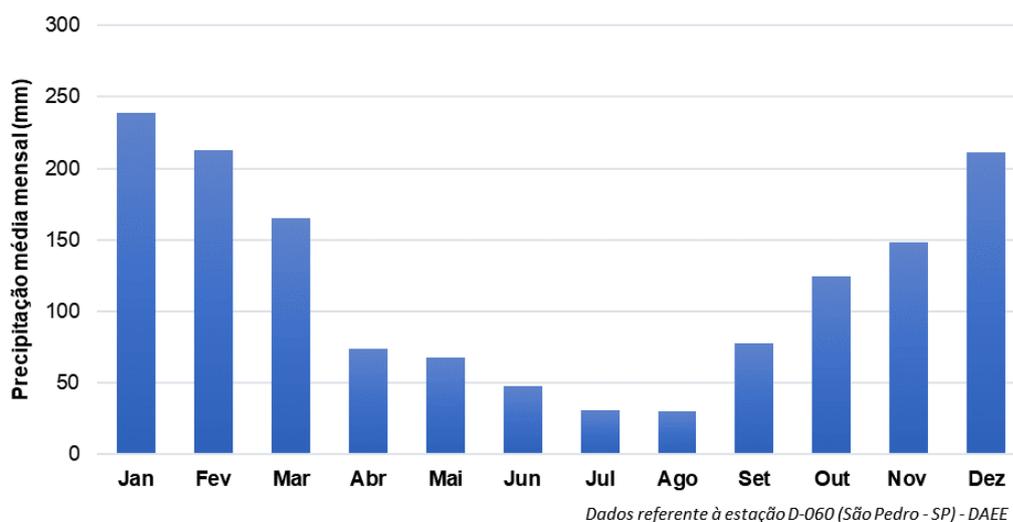
3.1 Aspectos do meio físico

3.1.1 Clima

O clima de São Pedro é o *Cwa* (Classificação climática de *Köppen*) e se caracteriza como mesotérmico, com inverno seco e verão quente (ALVARES et al. 2014). As temperaturas médias mensais oscilam entre 16 e 27 °C.

No município de São Pedro, a precipitação média mensal para o período de 1962 a 2000, foi de 183.7 mm nos meses mais chuvosos e 54.7 mm nos meses mais secos, como mostra a Figura 28. Segundo Dantas-Ferreira (2004), no município, as chuvas que ocorreram principalmente nos meses de janeiro e fevereiro, com índices pluviométricos elevados são as que exerceram maior influência no surgimento e na evolução dos processos erosivos.

Figura 28. Pluviosidade média mensal no município de São Pedro (SP) para o período de 1962 a 2000.



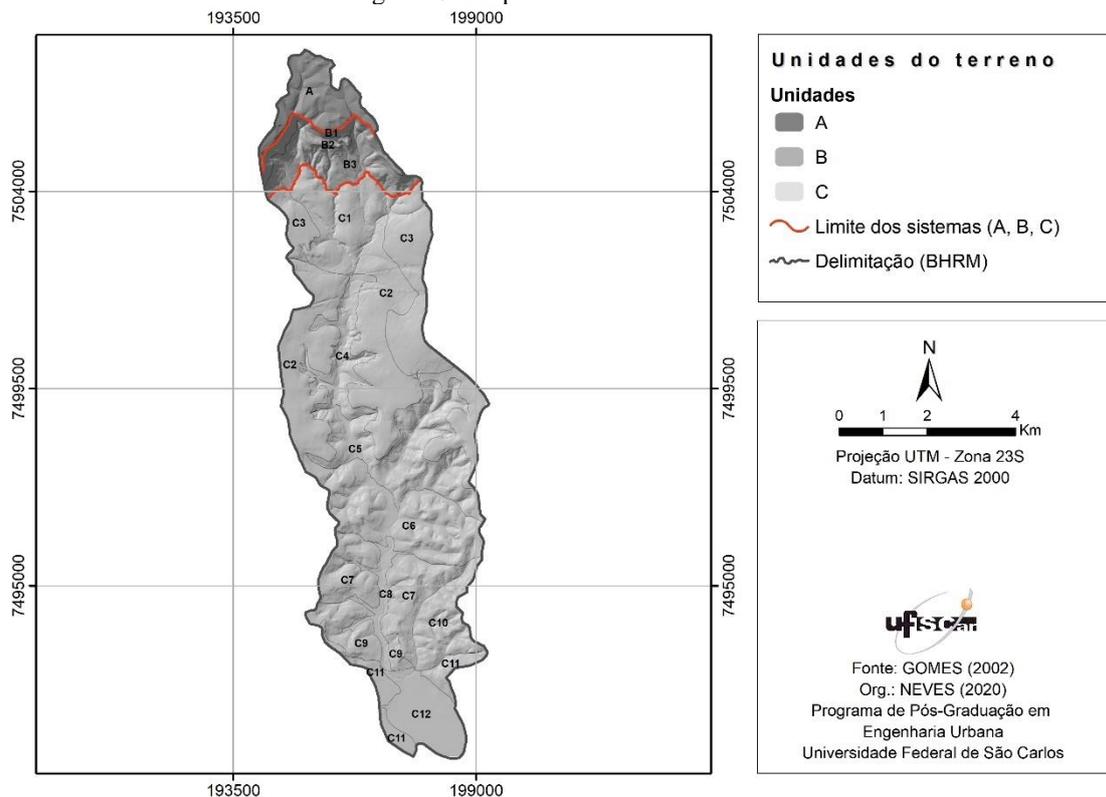
Fonte: A Autora.

3.1.2 Relevo

O relevo da BHRM compreende três unidades principais: Serra de São Pedro, *Cuestas Basálticas* e Depressão Periférica. A Depressão Periférica é a unidade com maior predomínio e se caracteriza por uma região com relevo suave, sob forma de colinas e morrotes associados à Formação Pirambóia, baixa densidade de drenagem e planícies aluviais ao norte (IPT, 1981).

Ao desenvolver um trabalho de mapeamento na BHRM, na escala de 1:20.000, Gomes (2002) identificou três sistemas de terreno, denominados A, B e C, e subdivididos em 16 unidades, conforme o mapa da Figura 29 e Tabela 3. O sistema A compreende uma área de planaltos e localiza-se na porção norte da bacia hidrográfica; o sistema B representa a região das *Cuestas Basálticas*, caracterizada pela presença de escarpa com topos irregulares e áreas de colúvio e/ou tálus; e o sistema C ocorre em 80% da área de estudo e é constituído por feições bastante dissecadas, associadas a colinas médias e amplas, morrotes alongados e planícies aluviais.

Figura 29. Mapa de unidades do terreno.



Fonte: Adaptado de Gomes (2002).

Tabela 3. Descrição das unidades do terreno.

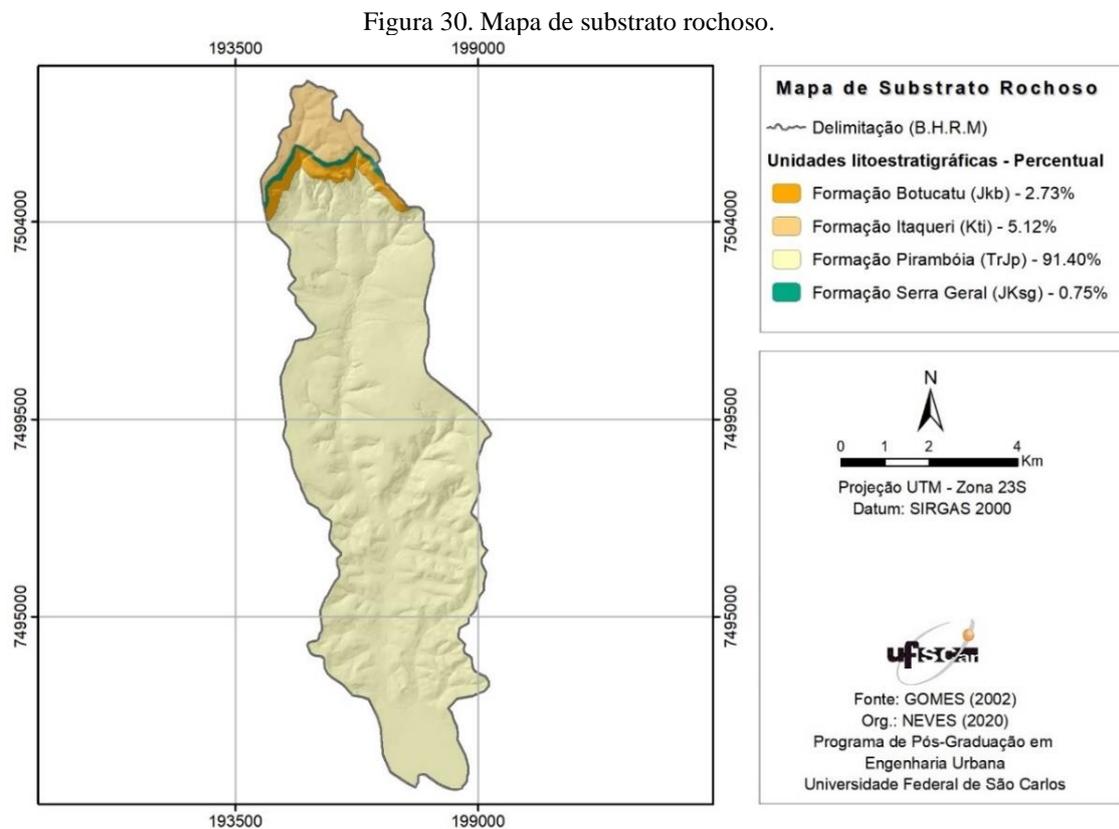
Sistema	Unidades	Área (%)	Características
A	-	5,12	Planalto com encostas suavemente onduladas e extensas, de topos planos, associados a vales de pequena amplitude e expressão geográfica; drenagem de baixa densidade e sinuosidade mista; materiais laterizados com maior resistência aos processos de intemperismo; presença de sulcos e ravina.
B	B1	1,96	Encostas íngremes, convexas e retilíneas, associadas a topos irregulares e angulosos; vertentes com perfis retilíneos, e vales dissecados de pequenas amplitudes; baixa frequência de canais de drenagem e sinuosidade mista; presença de queda de blocos de rocha.
	B2	0,43	Encosta de sequência de escarpa, situada entre as unidades B1 e B3; ausência de cobertura vegetal e textura de relevo; material litológico resistente de textura clara.
	B3	5,47	Encosta com declividade moderada a suave; compreende zonas de colúvio e talos; materiais inconsolidados bastante espessos e do tipo arenosos; moderada frequência de canais de drenagem.
C	C1	6,84	Unidade com baixa declividade associada a encostas retilíneas e côncavo-convexas, topo suavemente arredondado; moderada frequência de canais; presença de sulcos, ravinas e voçorocas.
	C2	21,10	Colinas amplas, de topos suavemente ondulados; vertentes de perfis retilíneos a convexas; baixa densidade de canais de drenagem; presença de ravinas que podem progredir para voçorocas
	C3	8,72	Colinas amplas de topos aplainados; vertentes com perfis retilíneos; declividade muito baixa e canais de drenagem praticamente ausentes; presença de sulcos e ravinas.
	C4	4,26	Terrenos relativamente planos, situados às margens dos rios sujeitos a inundações periódicas; presença de ravinas que podem progredir para voçorocas.
	C5	10,53	Unidade com vales fechados; encostas retilíneas e convexas, associadas às planícies aluviais; média a alta densidade de canais de drenagem com sinuosidade mista; presença de sulcos e ravinas.
	C6	10,03	Unidade formada por morrotes com vertentes convexas de topos arredondados a angulosos; declividade moderada; média a baixa densidade de canais de drenagem e sinuosidade mista.
	C7	7,83	Colinas pequenas associadas às encostas convexas de topos suavemente arredondados; densidade de drenagem média a alta e sinuosidade mista.
	C8	1,89	Unidade de planície aluvial; canais de drenagem rasos e largos; densidade média e sinuosidade mista; presença de margens erodidas
	C9	3,44	Superfície de relevo com feições marcadas pela baixa densidade de drenagem; sinuosidade mista; presença de sulcos e ravinas próximas às redes de drenagem; material inconsolidado pouco suscetível à erosão
	C10	4,33	Colinas pequenas de topos suavemente ondulados, associadas às vertentes côncavo-convexa com declividade moderada; moderada frequência de canais de drenagem com sinuosidade mista
	C11	3,12	Colinas com topos suavemente ondulados; vertentes com perfis retilíneos a convexas; declividade baixa, associada a vales fechados; frequência de canais quase ausente.
	C12	4,93	Unidade de planícies aluviais, com superfícies próximas às margens do Rio Piracicaba e sujeita a constantes inundações; presença de lagos perenes ou intermitentes.

Fonte: Adaptado de Gomes (2002).

3.1.3 Unidades geológicas

Na BHRM ocorrem rochas sedimentares das Formações Itaqueri, Pirambóia e Botucatu (compostas essencialmente por arenitos) e rochas ígneas da Formação Serra Geral. A Figura 30 apresenta o mapa de substrato rochoso da área de estudo, elaborado originalmente por Gomes (2002), na escala 1:20.000.

A Formação Pirambóia ocupa 91,4% da área de estudo, caracteriza-se pela presença de arenitos de granulação fina a média, de cores variegadas, com intercalações de siltitos, folhelhos, lamitos e conglomerados; estratificações cruzadas; e presença de fraturas subverticais. A Formação Itaqueri é composta por arenitos grosseiros, conglomeráticos e seixos de quartzito de tamanho variado. A Formação Botucatu ocorre ao longo das escarpas, associada às *Cuestas Basálticas*, e caracteriza-se pela presença de arenitos finos a médios, silicificados e de coloração amarelada. A Formação Serra Geral compreende a região da Serra de São Pedro e é composta por basaltos de coloração cinza escura e textura afanítica, assim como por diques de diabásio (GOMES, 2002).



Fonte: Adaptado de Gomes (2002).

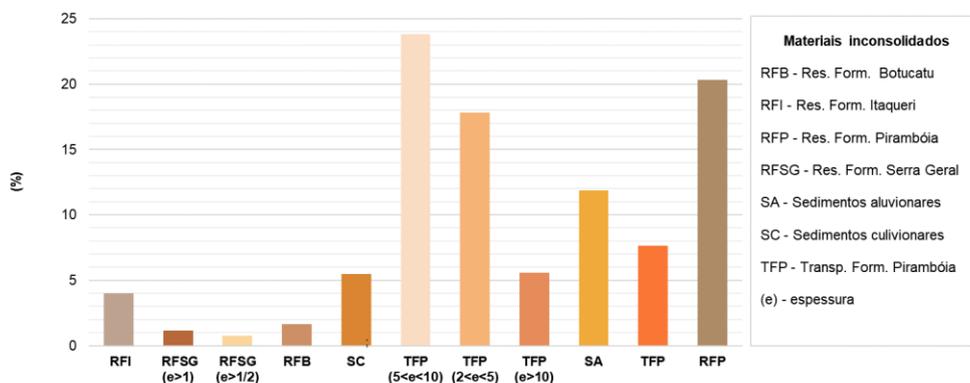
3.1.4 Materiais inconsolidados

De acordo com o mapa de materiais inconsolidados, escala 1:20.000, de Gomes (2002) na área de estudo foram reconhecidas sete unidades, agrupadas conforme sua espessura e características geotécnicas. Entre essas unidades, predominam os materiais transportados e residuais associados à Formação Pirambóia como mostra o gráfico da Figura 31 e o mapa da Figura 32.

Os materiais transportados associados à Formação Pirambóia, são predominantes na BHRM (54.8%), com espessura que varia de 0,5 a 10 m; são arenosos, de cor marrom avermelhada, textura fina a média, estrutura porosa, sem cimentação, consistência muito baixa; e comportamento altamente erodível. Os materiais residuais associados à Formação Pirambóia ocorrem em 20,3% da área, caracterizam-se por materiais com diferentes níveis de alteração, classificados como saprólito (residual jovem) e saprolítico (residual maduro). O residual jovem é composto por materiais com textura arenosa fina e coloração esbranquiçada, espessura superior a 2 m e baixo potencial à erosão ($E < 1$); e o material residual maduro caracteriza-se por um material de textura areno-argilosa, coloração vermelha-amarronzada, espessura entre 0,5 e 2 m e apresenta comportamento erodível nas camadas próximas do topo, ou seja, nas mais evoluídas (GOMES, 2002).

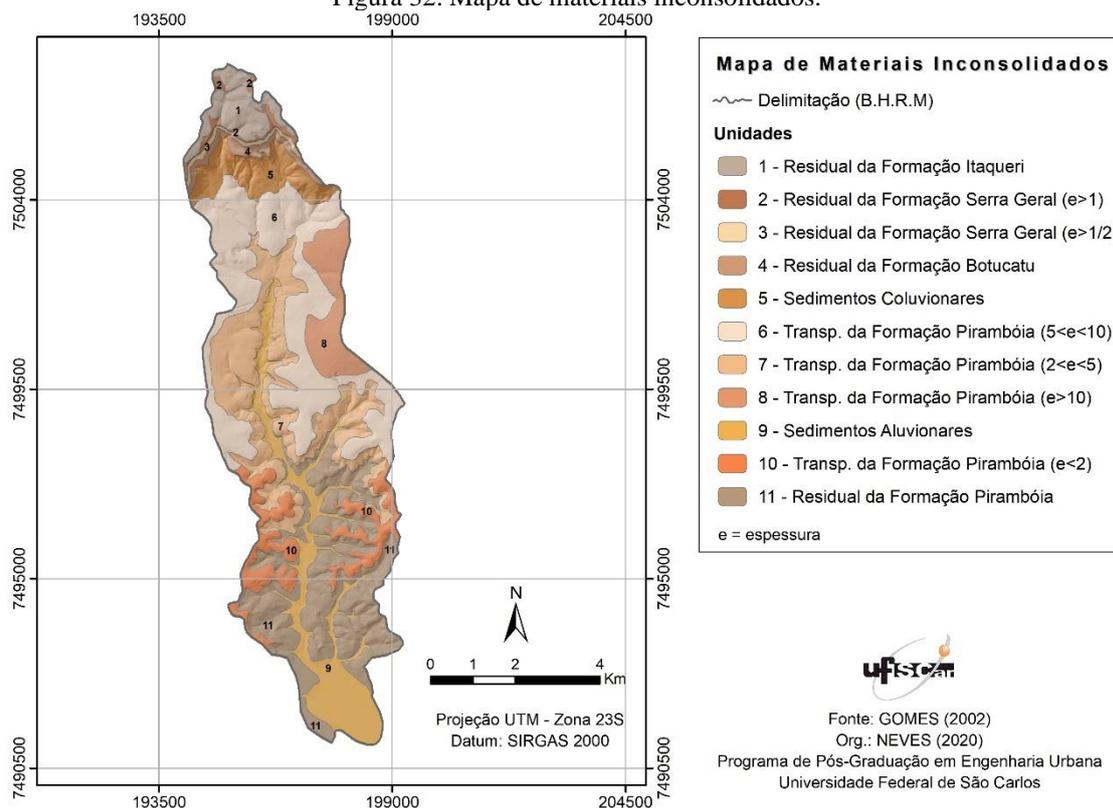
Com relação aos demais materiais, os sedimentos aluvionares ocorrem ao longo das drenagens e são materiais de textura arenosa, com percentual de areia acima de 90%; os sedimentos coluvionares ocorrem ao longo das unidades inferiores às escarpas da Serra de São Pedro e são materiais de textura arenosa grossa; os materiais residuais associados à Formação Itaqueri são arenosos com consistência média e baixa erodibilidade; os materiais residuais associados à Formação Serra Geral possuem textura argilo-areno-siltosa, estrutura maciça e consistência de média a alta; por fim, os materiais residuais associados à Formação Botucatu possuem textura arenosa, com percentual de areia acima de 80% e consistência média (GOMES, 2002).

Figura 31. Percentual de ocorrência das unidades de materiais inconsolidados.



Fonte: A autora.

Figura 32. Mapa de materiais inconsolidados.



Fonte: Adaptado de Gomes (2002).

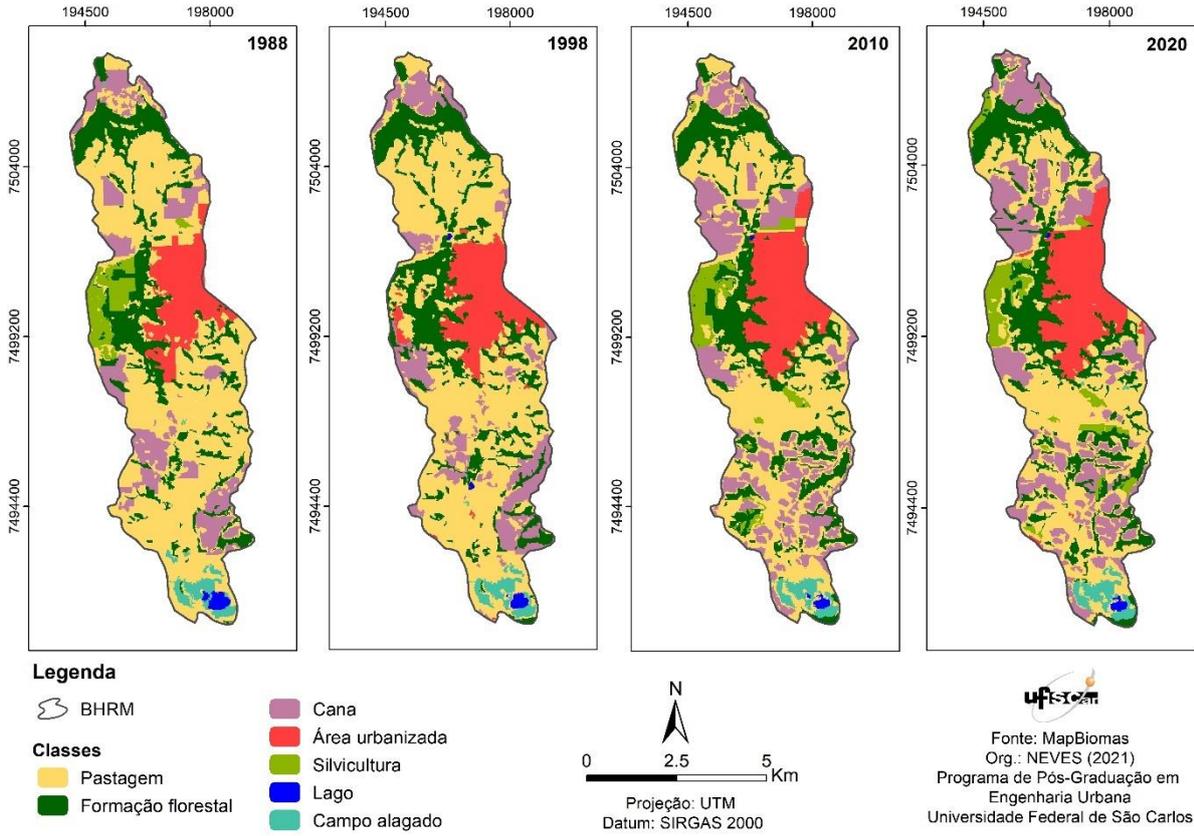
3.2 Aspectos do meio antrópico

3.2.1 Uso do solo

As classes de uso do solo presentes na área de estudo são pastagem, formação florestal, cana-de-açúcar, área urbanizada, silvicultura, lago e campo alagado, como mostra o mapa da Figura 33. Nos cenários de 1988, 1998, 2010 e 2020, as classes com maior predominância foram pastagem, formação florestal, cana-de-açúcar e área urbana (Figura 34). Para caracterizar o uso do solo, considerou-se a base de dados do MapBiomas - Coleção 6 (MAPBIOMAS, 2021).

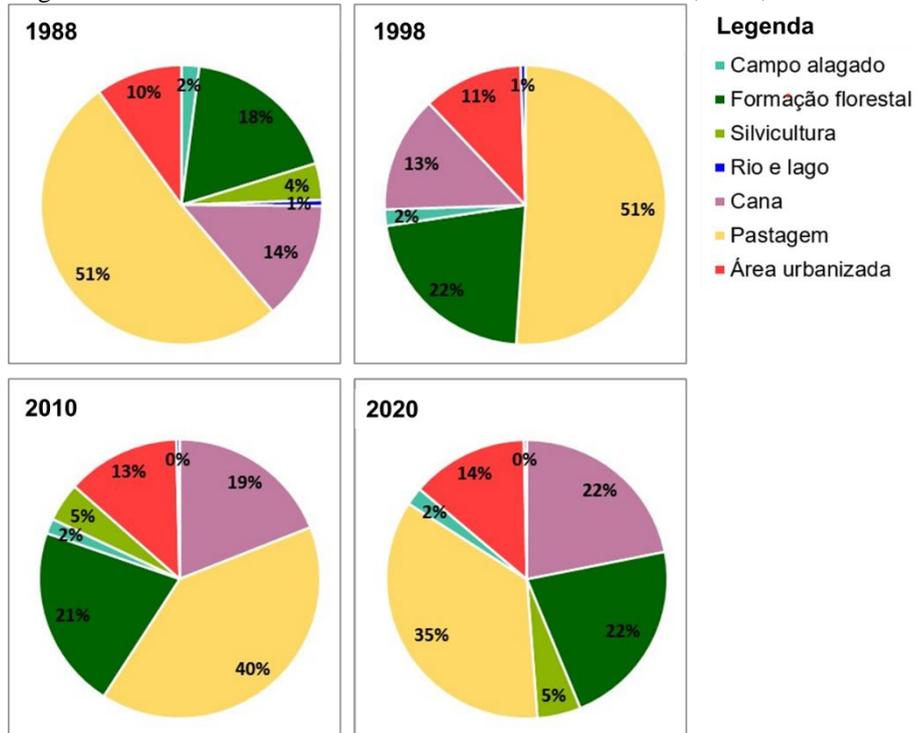
Ao longo dos anos, houve um aumento da área urbana: 10% em 1988 para 13% em 2020; área com cultivo de cana-de-açúcar, 14% em 1988 para 22% em 2020; área com cultivo de eucalipto, 4% em 1988 para 5% em 2020. Além do mais, houve uma redução das áreas de pastagem, 51% em 1988 para 35% em 2020 (Figura 34). Por fim, destaca-se que as principais modificações de uso do solo na região ocorreram devido à substituição das áreas de pastagem pelo cultivo de cana-de-açúcar (LOLLO et al., 2018).

Figura 33. Mapas de uso e ocupação do solo: cenários 1988, 1998, 2010 e 2020.



Fonte: A autora.

Figura 34. Percentual das classes de uso do solo: cenários 1988, 1998, 2010 e 2020.



Fonte: A autora.

Com relação à área urbanizada, a porção presente na BHRM é denominada zona urbana fora da sede do município (PMSP, 2013). Essa área é composta por três zonas de chacreamento: Mirante São Pedro, ABC e Alpes das Águas. Convém mencionar que, nessa região, diversos autores identificaram processos erosivos evoluídos, como voçorocas (GOMES, 2002; ARAÚJO, 2011; NEVES, 2017).

3.3 Processos erosivos em São Pedro (SP)

No município de São Pedro, a presença de processos erosivos é notória, afetando tanto a área urbana como rural e acarretando perdas ambientais, sociais e econômicas. Registros fotográficos, mapas e outros dados da literatura evidenciam a presença de erosões desde 1960. Além do mais, conforme o mapa de erosão do estado de São Paulo, o município localiza-se em uma região com alta suscetibilidade (KERTZMAN et al. 1995). Nesse sentido, muitos estudos relativos à dinâmica das erosões foram desenvolvidos, tais como Santoro (1991), Pejon (1992), Gomes (2002), Daniel (2012), entre outros (Quadro 11).

Quadro 11. Pesquisas desenvolvidas no município de São Pedro com enfoque nos processos erosivos (continua).

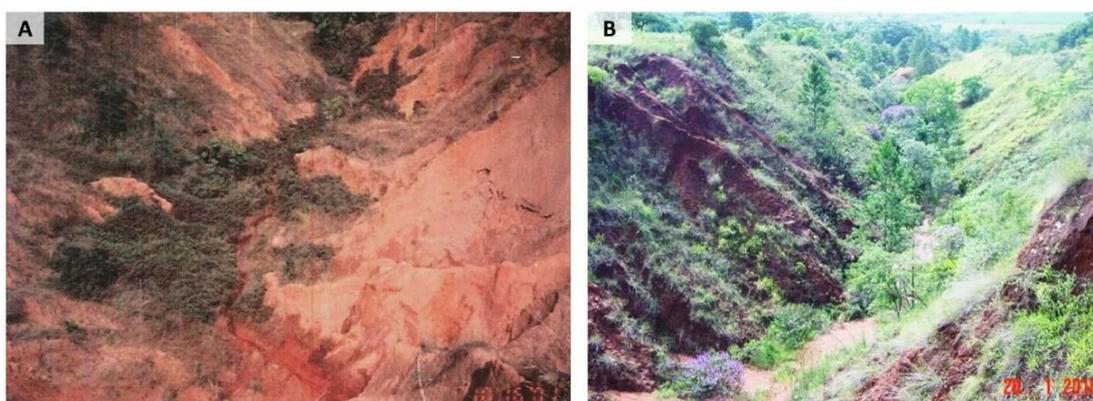
Autor	Título
Santoro (1991)	Fenômenos erosivos acelerados na região de São Pedro-SP: Estudo da fenomenologia, com ênfase geotécnica
Pejon (1992)	Mapeamento geotécnico regional da Folha de Piracicaba - SP (Escala 1:100.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos
Facincani (1995)	Influência da estrutura e tectônica no desenvolvimento de boçorocas na região de São Pedro/SP: proposta de reabilitação e aspectos jurídicos-institucionais correlatos
Gomes (2002)	Mapeamento geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na Bacia do Ribeirão do Meio, São Pedro/SP, na Escala 1:20.000
Fernandes (2003)	Erodibilidade de materiais inconsolidados da Bacia do Ribeirão Samambaia (Região de São Pedro – SP)
Silva (2003)	Mapeamento geotécnico e análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego Tuncum, São Pedro-SP, Escala 1:10.000
Yamananouth (2003)	Avaliação dos processos erosivos e técnicas de controle e reabilitação – Bacia do Córrego do Espriado (São Pedro – SP)
Almeida Filho et al. (2004)	Estudo da dinâmica evolutiva da boçoroca São Dimas no município de São Pedro, SP
Dantas-Ferreira (2004)	Análise da evolução dos processos erosivos acelerados em áreas urbanas e das técnicas de controle e recuperação – Córrego do Tucum (São Pedro/SP)
Guimarães (2008)	Mapeamento geotécnico da Bacia Córrego da Barra, aplicação do penetrômetro de impacto em estudos de processos erosivos em São Pedro – SP – Escala 1:10.000
Pinheiro (2009)	Técnicas cartográficas e aerofotogramétricas no estudo da erosão: Alta Bacia do Ribeirão Araquá – São Pedro e Charqueada/SP

Quadro 11. Pesquisas desenvolvidas no município de São Pedro com enfoque nos processos erosivos (continuação).

Autor	Título
Menezes (2010)	Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade
Araujo (2011)	Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro/SP
Daniel (2012)	Análise do papel da morfologia e do uso do solo na gênese e na distribuição das feições erosivas na Bacia do Córrego Espreado, São Pedro (SP)
Rotta (2012)	Estudo da recuperação de áreas degradadas por processos erosivos: procedimentos metodológicos e eficiência dos métodos
Carrazza (2016)	Identificação das cavidades em voçorocas por meio da aplicação do método geofísico da eletrorresistividade
Mathias (2016)	Contribuição metodológica para diagnóstico da dinâmica erosiva linear e seu prognóstico evolutivo visando subsidiar projetos de recuperação
Neves (2017)	Análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego do Meio – Município de São Pedro (SP): Estudo do desencadeamento das erosões
Piga (2017)	Modelagem ambiental de áreas degradadas por processos erosivos, com vista ao planejamento ambiental – São Pedro e Santa Maria da Serra/SP

De acordo com Santoro (1991), as características geotécnicas dos materiais geológicos da região favoreceram a rápida evolução da erosão superficial. Para Pejon (1992), a região possui alto potencial à ocorrência de processos erosivos devido, principalmente, à erodibilidade dos materiais retrabalhados arenosos e uso inadequado do terreno. Desse modo, segundo Gomes (2002), na BHRM as erosões ocorrem principalmente nos locais com presença de materiais inconsolidados associados à Formação Pirambóia. Dessa forma, as características geotécnicas desses materiais propiciaram a formação de feições do tipo voçorocas (Figura 35).

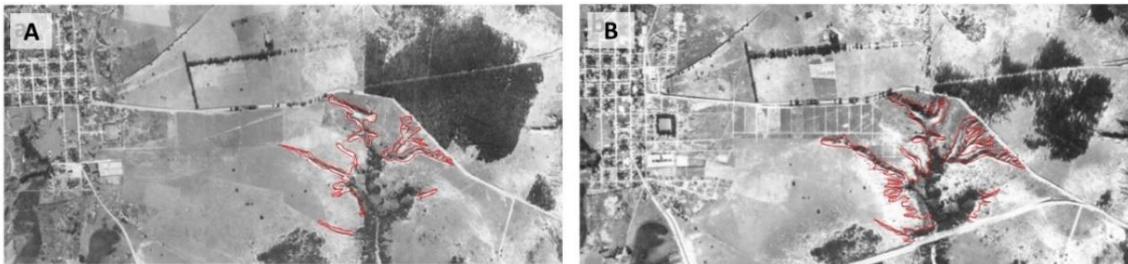
Figura 35. Voçoroca na zona de chacreamento Alpes das Águas na BHRM em 2001 (a) e 2010 (b).



Fonte: Adaptado de Gomes (2002) e Martins et al. (2010).

Além das características do meio físico, de acordo com o IPT (1993), o processo de expansão urbana, por volta do ano de 1995, contribuiu com ativação e aceleração do fenômeno erosivo. Desse modo, algumas erosões no município evoluíram devido, principalmente, à deficiência dos sistemas de drenagem. A Figura 36 mostra a evolução de uma erosão condicionada pelo escoamento das águas pluviais proveniente da área urbana e estradas vicinais. Segundo Almeida Filho et al. (2004), a ausência de um planejamento urbano adequado, considerando as particularidades do meio físico, contribuiu com a evolução dos processos erosivos na região desde a década de 1960.

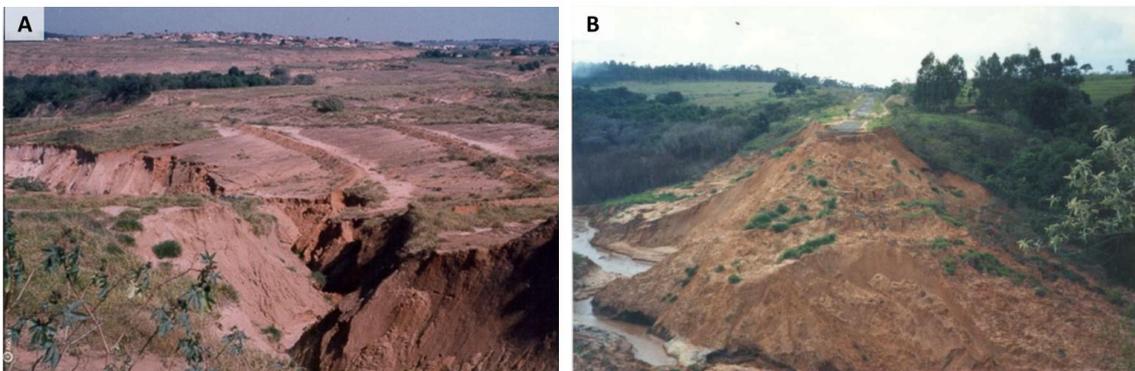
Figura 36. Processo erosivo na Bacia do Córrego Tucum: fotografias aéreas de 1962 (a) e 1972 (b).



Fonte: Almeida Filho et al. (2004).

De acordo com Dantas-Ferreira (2004), para conter o avanço das feições erosivas, em 1991, a Prefeitura de São Pedro realizou obras de recuperação, como aterramento, terraceamento em nível, retaludamento e macrodrenagem (Figura 37a). Entretanto, durante a estação chuvosa de 1995, ocorreu a reativação da erosão e o rompimento da rodovia SP-191 (Figura 37b). Segundo o IPT (1995), a reativação ocorreu por conta da implantação de medidas inadequadas e o rompimento da rodovia aconteceu devido à ausência de manutenção das obras de drenagem.

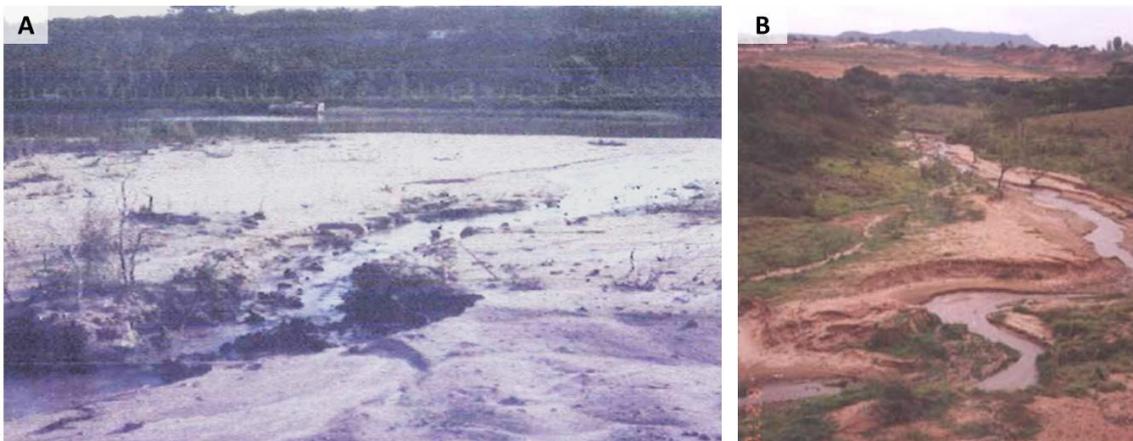
Figura 37. Terraceamento no entorno do processo erosivo em 1991 (a) e rompimento da rodovia em 1995 (b).



Fonte: Adaptado de Dantas-Ferreira (2004) e Almeida Filho et al. (2004).

A respeito dos documentos cartográficos, destacam-se as cartas de suscetibilidade à erosão da Bacia do Ribeirão do Meio (GOMES, 2002), apresentada no Anexo A, bem como a carta para a Bacia do Córrego Tuncum (SILVA, 2003). Segundo Gomes (2002), na BHRM, as áreas susceptíveis totalizam 32,13% e são favorecidas pelos seguintes fatores: terrenos com inclinação superior a 5%, presença de materiais associados à Formação Pirambóia, e proximidade com a rede de drenagem. Nessas áreas, a presença de erosão linear condicionou um quadro intenso de degradação ambiental, resultando no assoreamento de reservatórios e cursos d'água (Figura 38a). Do mesmo modo, Silva (2003) constatou o assoreamento do Córrego no Tucum (Figura 38b).

Figura 38. Assoreamento de um reservatório da BHRM (a) e no Córrego do Tucum (b).



Fonte: Adaptado de Gomes (2002) e Silva (2003).

No diagnóstico realizado pelo IPT (2012), em São Pedro, foram identificadas 7 erosões urbanas e 241 erosões em área rurais. Com relação as erosões localizadas em área urbana, foi possível verificar processos de instabilidade, como rupturas e abatimentos, pontos de erosão interna, lançamento concentrado de águas pluviais e, ainda, vários locais com depósito inadequado de resíduos sólidos. Além do mais, segundo o IPT (2012), os processos erosivos que ocorrem próximo da área urbana apresentam alto risco de reativação e evolução, colocando em risco a população que ocupa seu entorno.

Nesse contexto, segundo Mathias (2016), as fotografias aéreas de 2014, mostraram a formação de novas feições, colapsos em estruturas de microdrenagem e intervenções corretivas (Figura 39). O autor, ainda, mencionou que as obras realizadas no local não consideraram as características físicas da área, sobretudo os aspectos geotécnicos. Tal fato, contribuiu com a intensidade dos processos erosivos, bem com a transformação da paisagem. Portanto, a

condição antropogênica, amplia o nível de complexidade dos processos erosivos, afetando significativamente a dinâmica processual.

Figura 39. Fotografia aérea do Córrego do Tuncum em 2013 (a) e detalhe dos taludes na feição erosiva (b).



Fonte: Adaptado de Mathias (2016).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para cumprir com os objetivos propostos, inicialmente, foram levantados os dados e materiais cartográficos disponíveis da BHRM. Posteriormente, os materiais disponíveis foram analisados para contemplar a série temporal de 1960 a 2010, e a escala cartográfica semi-detalhada (1:20.000).

Segundo Zuquette (1987), os documentos que compõem o mapeamento geotécnico, cartas ou mapas, podem ser classificados em três grupos conforme a escala, sendo geral (menores que 1:100.000), regional (1:100.000 e 1:25.000) e semi detalhada (1:25.000 a 1:10.000).

De modo geral, a base cartográfica disponível contemplou a escala semi detalhada, com exceção dos dados pluviométricos e do uso e cobertura da terra. Os dados pluviométricos foram selecionados devido à abrangência das séries temporais e disponibilidade de postos próximo da área de estudo. Da mesma forma, os dados de uso e ocupação da terra do Projeto MapBiomass foram utilizados como base, pois contemplavam as séries temporais. Convém mencionar que, para alcançar um maior detalhamento do uso do solo para a BHRM, a base cartográfica foi editada manualmente em ambiente SIG. Esse critério foi adotado, uma vez que os dados do Projeto MapBiomass foram utilizados apenas na etapa de validação do modelo de regressão logística.

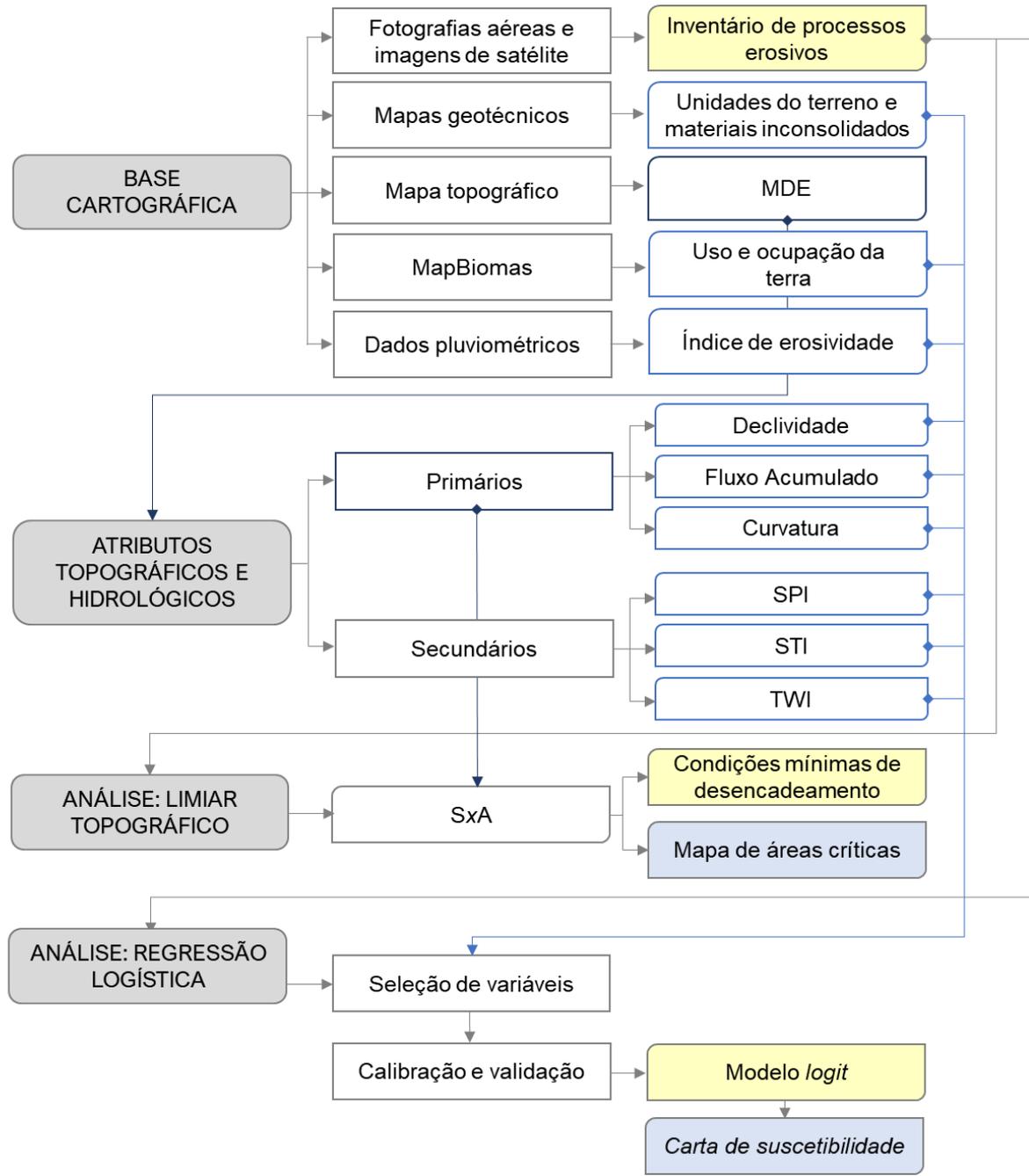
O Quadro 12 apresenta os materiais e *softwares* utilizados no desenvolvimento desta pesquisa. As cartas topográficas, fotografias aéreas, imagens de satélites e mapas geotécnicos foram compilados e organizados em um banco de dados georreferenciado, adotando como referência o sistema de projeção UTM e *Datum* SIRGAS 2000.

Os procedimentos metodológicos para o desenvolvimento desta pesquisa foram divididos em quatro etapas principais: preparação da base cartográfica; obtenção dos atributos topográficos e hidrológicos em ambiente SIG; análise das condições topográficas mínimas de desencadeamento dos processos erosivos (SxA); e aplicação da técnica de regressão logística para a identificação dos fatores condicionantes no *software* R e elaboração da carta de suscetibilidade à erosão (Figura 40).

Quadro 12. Materiais e *softwares* utilizados na pesquisa.

Tipo	Nome/descrição	Fonte
Folhas topográficas (1:10.000)	Fazenda São Bento (SF-23-Y-A-IV-1-NO-A)	IGC (1979)
	São Pedro I (SF-23-Y-A-IV-1-NO-B)	
	São Pedro II (SF-23-Y-A-IV-1-NO-C)	
	São Pedro III (SF-23-Y-A-IV-1-NO-D)	
	Ribeirão do Meio (SF-23-Y-A-IV-1-NO-E)	
	Águas de São Pedro (SF-23-Y-A-IV-1-NO-F)	
	Ribeirão Vermelho (SF-23-Y-A-IV-1-SO-A)	
	Ribeirão Samambaia (SF-23-Y-A-IV-1-SO-B)	
Fotografias aéreas (1:25.000)	1960	IAC
	1972	IBC
	1988	IGC
	2010	EMPLASA
Imagens de satélite	2020	<i>Google Earth Pro</i>
Mapas geotécnicos (1:20.000)	Mapa de <i>landforms</i>	Gomes (2002)
	Mapa de substrato rochoso	
	Mata de materiais inconsolidados	
Dados matriciais	Uso e cobertura da terra (1960, 1972, 1988, 2010, 2020)	MapBiomias (2021)
Dados pluviométricos	D5-044 – Anhembi	DAEE (2020)
	D4-054 - Charqueada	
	D4-074 - Ipeúna	
	D4-036 – Itirapina	
	D4-104 - Piracicaba	
	D4-060 - São Pedro	
	D5-062 - Santa Maria da Serra	
<i>Softwares</i>	ArcGIS® 10.5 (ESRI)	
	<i>Google Earth Pro</i> ®	
	R®	

Figura 40. Fluxograma com a estrutura geral dos métodos aplicados.



Legenda

- Resultados principais
- Produtos cartográficos

4.1 Inventário de feições erosivas

O inventário tem por objetivo cadastrar e caracterizar os processos erosivos, por meio de um levantamento detalhado das suas características. Desse modo, constitui uma etapa fundamental, pois fornece uma compreensão da distribuição espacial e temporal dos processos

erosivos e, portanto, auxilia no diagnóstico da dinâmica evolutiva das erosões (RODRIGUES et al. 2015).

Para elaborar o inventário da BHRM, foram utilizadas as fotografias aéreas de 1960, 1972, 1988 e 2010. Com relação aos anos, a escolha se justifica por conta da disponibilidade das fotografias aéreas para a área de estudo, escala 1:25.000, nos institutos parceiros (IPT e IGC). Após a preparação da base cartográfica, procedeu-se com a identificação do registro de cabeceira. Para isso, foram utilizadas as ferramentas de edição do ArcGIS e, para cada processo erosivo, foram levantadas as seguintes características: localização (coordenadas UTM), unidade de material inconsolidado, unidade do terreno e uso do solo predominante.

Convém destacar que, para definir o uso do solo predominante, foi utilizado o método de fotointerpretação em ambiente SIG, ou seja, foram consideradas as características de uso do solo relacionadas com as classes agrícola, urbana, pastagem, silvicultura e vegetação. As classes foram interpretadas conforme o Sistema de Classificação de Uso da Terra (IBGE, 2015), sendo área agrícola os locais ocupados com lavoura temporária e/ou permanente; área urbana os locais com uso urbano, estruturado por edificações e sistema viário; pastagem as áreas ocupadas por vegetação campestre sujeita a pastoreio e outras influências antrópicas; silvicultura as áreas com cultivo de floresta plantada; e vegetação os locais com presença de formações arbóreas.

Com o objetivo de ampliar o conhecimento acerca da situação atual das voçorocas e complementar o banco de dados da BHRM, durante os trabalhos de campo, realizou-se um levantamento aerofotogramétrico com drone modelo *Inspire 1 V2.0* da DJI, com o apoio da Seção de Planejamento Territorial, Recursos Hídricos, Saneamento e Florestas (SPRSF/IPT). O plano de voo foi realizado por meio do aplicativo *Precision Flight* e o processamento das imagens no *software Agisoft Photoscan*.

4.2 MDE e atributos derivados

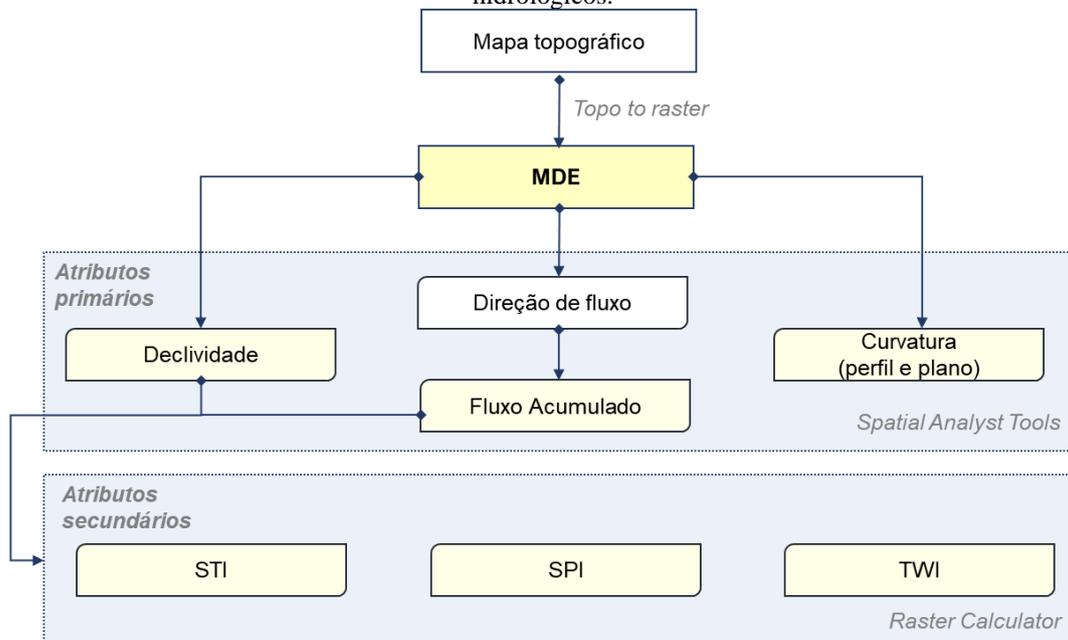
O MDE foi gerado por meio da interpolação dos arquivos vetoriais (vetorização manual) derivados dos mapas topográficas, escala 1:10.000 (IGC, 1979). A interpolação foi realizada com a ferramenta *Topo to Raster*, utilizando como dados de entrada as curvas de nível, pontos cotados e rede drenagem. Convém ressaltar que a escolha dessa ferramenta de interpolação se deve ao fato de obter um modelo digital com informação hidrológica consistente (HUTCHINSON, 1989). Tendo como premissa a escala dos mapas topográficos e o objetivo desta pesquisa, bem como as equações propostas por Hengl (2006), o MDE foi gerado com uma resolução espacial de 5m.

Após a etapa de interpolação, foram aplicadas as ferramentas *Fill* para remover os *sinks* e *Focal Statistics* para suavizar as diferenças entre os *pixels* vizinhos. Nesse processo, também foi feita a validação com o método quantitativo de controle de erro (AUGUSTO FILHO, 2013). Assim, comparou-se visualmente as curvas de nível geradas pelo MDE com as curvas originais dos mapas topográficos.

Dando sequência na etapa de processamento de dados em ambiente SIG, com base no MDE, foram gerados os atributos topográficos e hidrológicos (primários e secundários) considerados influentes no desencadeamento dos processos erosivos (Figura 41). Desse modo, foram gerados os mapas de declividade através da ferramenta *Slope*; fluxo acumulado com auxílio do *plugin TauDEM*, que utiliza o algoritmo *D-Infinity* e distribui de maneira proporcional a direção de fluxo entre os *pixels* (TARBOTON, 1997); e plano da curvatura e perfil da curvatura a partir da ferramenta *Curvature*.

Ainda com relação ao mapa de declividade, para representar esse atributo por meio de um intervalo de classes, utilizou-se as recomendações do IG (1993), descritas na Tabela 4. A definição desses intervalos relaciona-se diretamente com os objetivos desta pesquisa e auxilia no entendimento das características topográficas da BHRM, relacionadas com a dinâmica do escoamento superficial e suscetibilidade à erosão.

Figura 41. Procedimentos realizados em ambiente SIG para obtenção dos MDE, atributos topográficos e hidrológicos.



Fonte: A autora.

Tabela 4. Classes de declividade.

Classes (%)	Descrição
< 2	Terrenos planos ou quase planos; escoamento superficial muito lento ou lento.
2 - 5	Terrenos com declividades suaves; escoamento superficial lento ou médio; problemas de erosão requerem práticas simples de conservação.
5 - 10	Terrenos inclinados, geralmente com relevo ondulado; escoamento superficial médio e rápido; poucos problemas de erosão superficial.
10 - 15	Terrenos muito inclinados ou colinosos; escoamento superficial rápido; presença de erosão em solos arenosos.
15 - 20	Terrenos fortemente inclinado; escoamento superficial rápido; problemas de erosão superficial.
20 - 25	Terrenos fortemente inclinados; escoamento superficial muito rápido; suscetível a ocorrência de processos erosivos.
25 - 50	Terrenos fortemente inclinados ou íngremes; escoamento superficial muito rápido; suscetível à erosão, movimentos de massa e queda de blocos.
> 50	Terrenos muito íngremes ou escarpados; desenvolvimento de solos muito rasos, com exposição da rocha; extremamente suscetível a erosão.

Fonte: Adaptado de IG (1993).

Após a obtenção do MDE, realizou-se uma sequência de operações para gerar os atributos topográficos secundários (STI, SPI e TWI). Inicialmente, foram obtidos os parâmetros área de contribuição específica (A_s) e declividade (S). Para isto fez-se uso das ferramentas *D-Infinity Contributing Area (TauDEM Tools)*, que retorna um *raster* com a área de contribuição por unidade de contorno; e *Slope* para calcular a declividade em graus. Em seguida, foi utilizada a ferramenta *raster calculator* para aplicar as equações do STI (Equação 31), SPI (Equação 32) e TWI (Equação 33). Por fim, para classificar os atributos topográficos secundários adotou-se o método *Natural Breaks*, pois o agrupamento dos valores é realizado conforme a natureza dos dados e, além disso, busca-se maximizar as diferenças entre as classes.

$$STI = ((A_s/22.13)^{1.3}(S/0.0896)^{0.6}) \quad \text{Equação 31}$$

$$SPI = \ln (A_s \times S) \quad \text{Equação 32}$$

$$TWI = \ln (A_s/S) \quad \text{Equação 33}$$

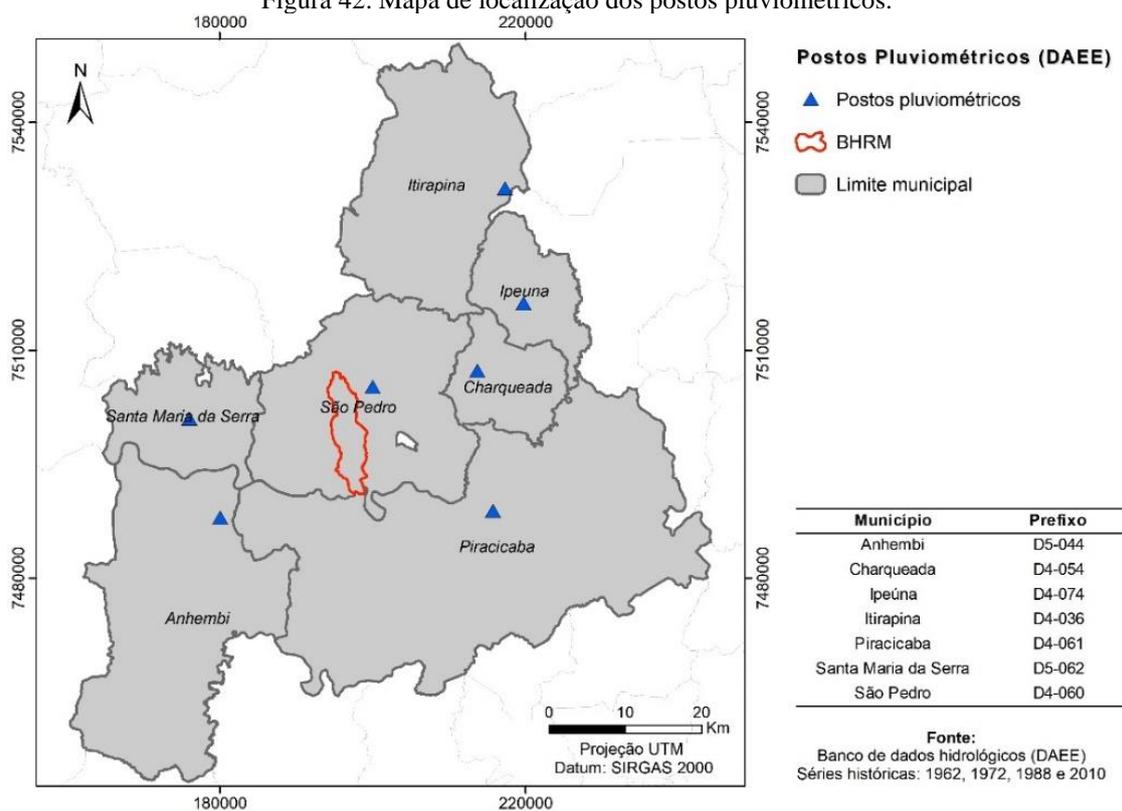
em que: S (graus); A_s (m^2/m).

4.3 Índice de erosividade

A erosividade representa um parâmetro importante nos modelos preditivos, pois intervém de maneira direta no processo da erosão hídrica, condicionando o volume e velocidade do escoamento superficial (ZUQUETTE, 1987). Assim, com o intuito de representar o potencial da chuva causar erosão, recorreu-se ao índice de erosividade da chuva (EI_{30}).

Para isso, foram analisados os dados de chuva mensal de 1960, 1972, 1988 e 2010 disponíveis no banco de dados hidrológicos do DAEE (2020). Considerando os postos pluviométricos localizados na UGRHI 05, selecionaram-se os mais próximos da BHRM, localizados nos municípios Anhembi, Charqueada, Ipeúna, Itirapina, Piracicaba, Santa Maria da Serra e São Pedro (Figura 42). Convém destacar que, ao analisar a erosividade, deve-se utilizar a escala de bacia hidrográfica pelo fato de essa unidade territorial integrar os fatores hidrológicos condicionantes dos processos erosivos (TRINDADE et al. 2014).

Figura 42. Mapa de localização dos postos pluviométricos.



Fonte: A autora.

Após a etapa de compilação dos dados mensais para cada um dos cenários analisados, calculou-se o índice de erosividade (EI_{30}) a partir da abordagem proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), conforme a Equação 34. Depois de obter o EI_{30} mensal para cada cenário

estudado (1960, 1972, 1988 e 2010), calculou-se a erosividade anual (R), a partir do somatório dos valores de EI_{30} .

$$EI_{30} = 68.73 (p^2/P)^{0.841} \quad \text{Equação 34}$$

em que: EI_{30} = índice de erosividade mensal ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$); p^2 = precipitação média mensal (mm); P = precipitação média anual (mm).

Por fim, para elaborar os mapas de erosividade, procedeu-se com a importação dos dados para o ArcGIS e a interpolação por meio do método da ponderação pelo inverso da distância (*Inverse Distance Weighted* - IDW), adotando o expoente da distância padrão (2). O IDW, por sua vez, estima os valores com base na ponderação de pesos a cada um dos n postos pluviométricos mais próximos, isto é, função da inversão da potência da distância (ESRI, 2019), conforme a Equação 36.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad \text{Equação 35}$$

em que: Z = valor interpolado; n = número de indivíduos observados; z_i = valores atribuídos aos indivíduos observados; d_i = distância entre os indivíduos observados e o interpolado.

Destaca-se que a escolha do método IDW se deve ao fato do interpolador apresentar desempenho satisfatório para a obtenção de estimativas anuais do índice de erosividade (OLIVEIRA et al. 2015; TEIXEIRA et al. 2021). Além do mais, em comparação com outros métodos, exige-se poucas decisões acerca dos parâmetros do modelo.

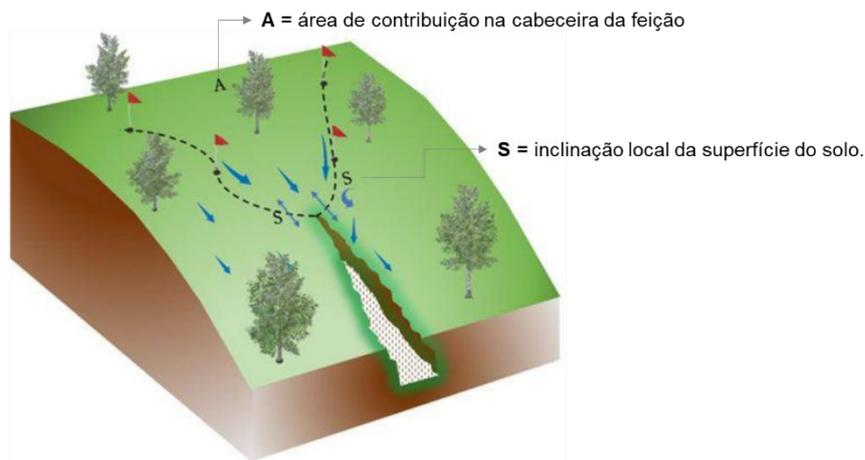
4.4 Limiar topográfico: procedimentos iniciais, efeitos do uso do solo e representação espacial das áreas críticas

Para compreender as condições mínimas de desencadeamento dos processos erosivos na BHRM, aplicou-se o método do limiar topográfico, relação entre declividade (S) e área de contribuição (A). Assim, com o objetivo de analisar a dinâmica das feições erosivas, determinou-se o limiar topográfico para quatro cenários, sendo 1960, 1972, 1988 e 2010.

Como já descrito anteriormente, a base cartográfica para a obtenção dos atributos declividade e área de contribuição constituiu o MDE. Convém mencionar que mudanças significativas no relevo aconteceram entre 1960 e 2010, todavia para garantir a comparação entre os limiares topográficos, optou-se por ultimar a mesma base cartográfica para obtenção de SxA.

O levantamento de SxA foi feito considerando o registro da cabeceira, como mostra a Figura 43. Existe pouca discussão teórica a respeito da mensuração da declividade média ou local. Dessa forma, nesse trabalho, considerou-se a declividade local, e essa abordagem se justifica, pois a posição das feições é muito influenciada pela inclinação da superfície perto da cabeceira (MONTGOMERY; DIETRICH, 1988; NYSSSEN et al., 2002; TORRI; POESEN, 2014).

Figura 43. Representação esquemática da mensuração de S e A.



Fonte: Adaptado de Yibeltal et al. (2019).

A identificação do registro da cabeceira foi feita com base no mapa de inventário e, tendo em vista o conceito teórico desse modelo, relacionado com a formação de canais, foram selecionados apenas os processos erosivos em estágio inicial de desenvolvimento (HORTON, 1945; PATTON, SCHUMM, 1975), isto é, desconsiderou-se as feições com estágio evolutivo mais avançado, como as voçorocas, identificadas nos cenários de 1972, 1988 e 2010.

Assim, com base no mapa de declividade foi feita a extração dos valores de declividade com a ferramenta *Extract Value to Points* e a área de contribuição foi delimitada de maneira automática por meio da ferramenta *D-Infinity Contributing Area (TauDEM Tools)*, considerando o ponto de cabeceira como domínio de interesse. Devido à escala temporal utilizada nesta pesquisa, não foi possível validar as áreas de contribuição em campo, entretanto, foi realizada uma comparação visual entre as áreas delimitadas de maneira automática e os

mapas topográficos, a fim de garantir a representação cartográfica correta desse atributo. Segundo Rossi et al. (2015) para representar de maneira adequada o limiar topográfico, as áreas de drenagem devem ser efetivas, ou seja, devem estar hidraulicamente conectadas à cabeceira da erosão.

Depois de obter os parâmetros SxA , calculou-se o limiar topográfico para cada cenário, considerando os valores de k e b originais dos dados, ou seja, expoente b variável, abordagem proposta por Patton e Schumm (1975), apresentada na Equação 36. Posteriormente, adotando $b = 0.4$, proposto Torri e Poesen (2014), calculou-se o limiar de resistência k . Adotou-se esse valor, pois os processos erosivos são desencadeados por fluxo superficial concentrado.

$$S \geq kA^{-b} \quad \text{Equação 36}$$

em que: S = declividade (m/m); A = área de drenagem (ha).

Desse modo, para obter a equação que representa o limiar topográfico, realizou-se a análise de regressão no Excel[®]. Inicialmente, adicionou-se uma linha de regressão à série de dados SxA , considerando a função potência. Em seguida, ajustou-se essa linha ao limite inferior de todos os dados e calculou-se um novo valor para k , com base nos valores de SxA mais próximos do limite crítico (VANWALLEGUEM et al. 2005).

Em um segundo momento, manteve-se b como valor fixo e o coeficiente k foi calculado como o primeiro percentil da distribuição de valores observados para S e A . Lembrando que o percentil é uma medida de posição estatística, que divide o conjunto de dados em cem partes iguais e indica o valor do qual determinado percentual é inferior ou igual. Esse método foi adotado por Torri et al. (2018) e se justifica, pois o critério estatístico do percentil é uma alternativa usada para estabelecer limites inferiores de maneira semelhante ao ajuste da função potência.

Com o intuito de analisar os efeitos do uso do solo no limiar de resistência k , comparou-se os valores de k com os valores da curva número (CN), conforme a abordagem de Torri e Posen (2014). Para estabelecer o CN do uso agrícola e pastagem, foram definidos valores médios para as condições hidrológicas (pobre, escassa e boa). Com relação à área urbana, considerou-se o percentual de área impermeável, entre 10 e 20%, e adotou-se um valor médio. A Tabela 5 apresenta os valores CN para os três tipos de uso do solo predominante na BHRM, em função do tipo de solo (grupo hidrológico B).

Cabe ressaltar que o método pode introduzir alguma subjetividade, devido, principalmente, à dificuldade de interpretar a qualidade da cobertura vegetal nas fotografias aéreas. No entanto, devido à ausência de dados hidrológicos em escala de detalhe e, para desenvolver uma análise temporal do uso do solo, foi necessário considerar os valores médios e, portanto, um intervalo entre os valores da CN. Por fim, considerando a abordagem de Torri e Poesen (2014), calculou-se o índice de armazenamento ($S_{0.05}$), uma medida da resposta hidrológica da bacia, com base no $S_{0.20}$ (Equação 37 e Equação 38).

Tabela 5. Valores da curva número (CN) para a área de estudo.

Uso do solo	CN	$S_{0.20}$	$S_{0.05}$
Plantação (em linha reta e curva de nível)	78	72	111
Pastagem	70	109	180
Urbano (10 a 20% impermeável)	67	125	211

$$S_{0.20} = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad \text{Equação 37}$$

$$S_{0.05} = 0.819S_{0.20}^{1.15} \quad \text{Equação 38}$$

em que: $S_{0.05}$ = índice de capacidade máxima de armazenamento no solo (mm); CN = curva número.

Por último, com base nos valores limites obtidos (k), foi elaborado o mapa de áreas críticas, ou seja, o mapa que representa as áreas propensas à erosão. Para isso, considerou-se a ferramenta *Raster Calculator* do ArcGIS. Conforme a proposta de Millares et al. (2012), as áreas críticas foram classificadas em regiões críticas sob condições extraordinárias e áreas críticas mais frequentes. Como forma de avaliar a qualidade do mapa, foi feita uma comparação visual entre as áreas críticas e os registros de erosão identificados no inventário.

4.5 Modelo de regressão logística: desenvolvimento e carta de suscetibilidade

Essa etapa compreendeu a aplicação da técnica de regressão logística, como uma abordagem estatística multivariada para avaliar a suscetibilidade à erosão na BHRM, entre o período de 1960 e 2010. Desse modo, foram desenvolvidos modelos de regressão logística para os cenários de 1960, 1972, 1988 e 2010. Além dos quatro cenários, elaborou-se um modelo

geral, considerando o conjunto total de dados. Entretanto, para evitar a repetição de dados, considerou-se apenas o registro mais antigo da erosão e as novas feições identificadas nos cenários subsequentes (1972, 1988 e 2010). Ou seja, no modelo geral não foram incluídas erosões identificadas em dois ou mais cenários.

Acerca das etapas metodológicas, convém destacar que os procedimentos aplicados para compreender a dinâmica dos processos erosivos se fundamentam em dois modelos (topográfico e regressão logística), com pressupostos e finalidades diferentes, entretanto, complementares. Isto é, primeiramente aplicou-se a relação $S \times A$ para compreender as condições mínimas de desencadeamento e os possíveis locais de deflagração das erosões, contudo, sabendo que outras condições ambientais influenciam nos processos erosivos, aplicou-se o modelo de regressão logística, como uma técnica complementar capaz de explicar os demais fatores condicionantes, bem como auxiliar a elaboração da carta de suscetibilidade.

Por fim, ressalta-se que a escolha da técnica de regressão logística se deve a duas razões principais. Primeiro: a natureza binária da variável dependente possibilita a representação das áreas com ausência e presença de processos erosivos. Segundo: as variáveis independentes podem ser quantitativas e categóricas e, portanto, podem representar diversos atributos relacionados com a dinâmica das erosões (LUCÁ et al., 2011; CONOSCENTI et al., 2014; DEBANSHI e PAL, 2018).

Nesse contexto, este subcapítulo apresenta a sequência de procedimentos realizados em ambiente SIG e no *software* R. Em suma, foram realizadas três etapas principais: seleção das variáveis, calibração e validação. Destaca-se que foram realizados testes preliminares para definir a representação mais adequada para as variáveis independentes (categórica ou numérica), bem como a configuração do modelo de regressão logística (divisão da amostra e método de amostragem). Logo, com base nesses testes e na base bibliográfica, desenvolveu-se os modelos de regressão logística da BHRM.

4.5.1 Seleção das variáveis

4.5.1.1 Variável dependente

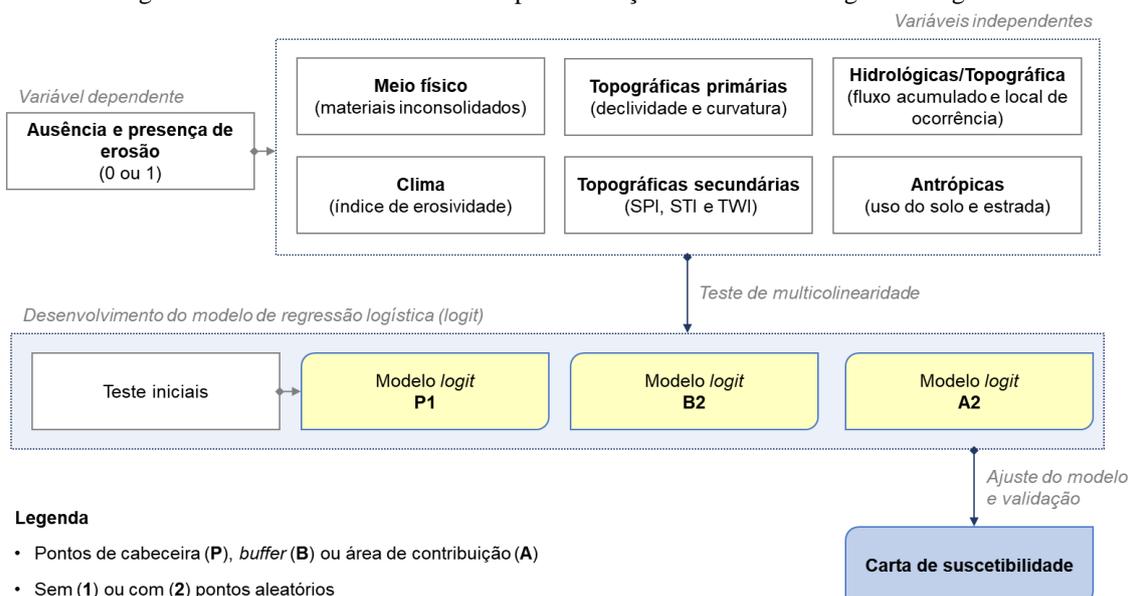
Inicialmente, foram obtidas as áreas com presença de erosão, ou seja, $Y = 1$. Para isso, considerou-se o mapa de inventário de 1960, 1972, 1988 e 2010. De maneira similar ao limiar topográfico, a referência foi o registro da cabeceira da erosão, entretanto, no modelo de regressão logística, foram incluídas as feições com estágio evoluído mais avançado, como as

voçorocas, pois nessa etapa o objetivo foi desenvolver um modelo para explicar os fatores condicionantes.

Como a variável dependente representa os locais com presença e ausência de erosão, sequencialmente foram gerados os pontos aleatórios, utilizando a ferramenta *Create random points*, para representar os locais sem erosão ($Y = 0$). O número de pontos aleatórios foi definido conforme o número de erosões identificadas em cada cenário. Dessa forma, a variável dependente foi composta por 50% de pontos com erosão ($Y = 1$) e 50% de pontos sem erosão ($Y = 0$), ou seja, uma amostra equilibrada. Esse critério foi adotado, pois, segundo Fávero et al. (2009), para modelos de regressão o ideal é utilizar uma amostra equilibrada.

Segundo Lucá et al. (2011), a amostragem por ponto tende a delinear melhor as áreas com erosão e, portanto, garante uma melhor resposta do modelo em relação a representação espacial das classes de suscetibilidade à erosão. Com base nesse pressuposto, adotou-se a amostragem por pontos, todavia, foram testados três tipos de configuração espacial, como mostra a Figura 44.

Figura 44. Procedimentos realizados para obtenção do modelo de regressão logística.

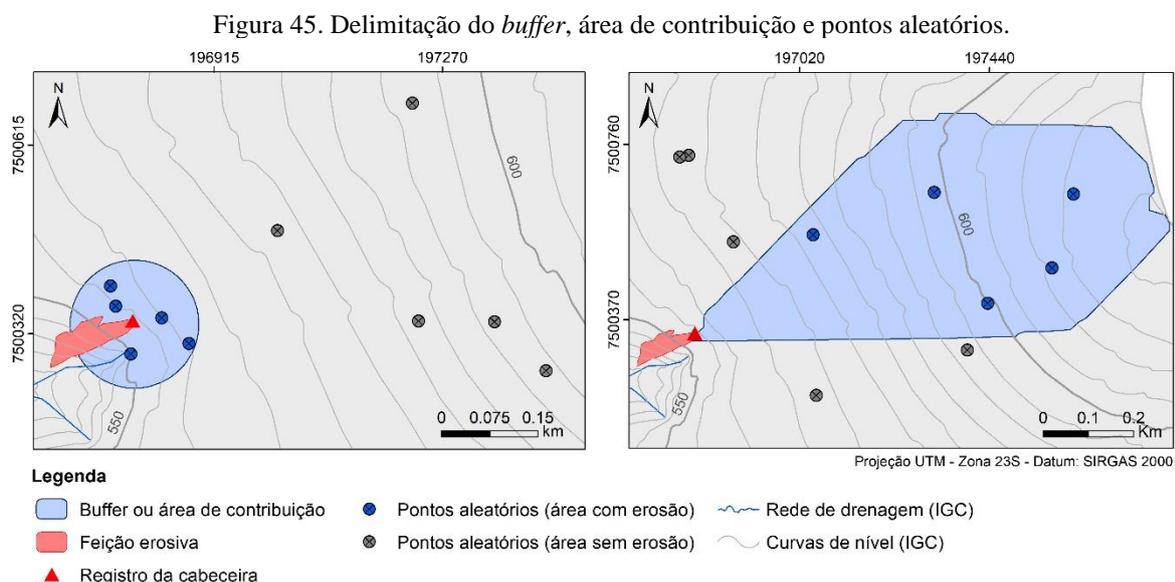


Fonte: A Autora.

No modelo de regressão logística (P), as informações foram extraídas considerando somente o ponto de cabeceira das erosões. Nos modelos B (*buffer*) e A (área de contribuição), as informações foram obtidas para os pontos distribuídos nessas regiões (Figura 45). Com relação ao *buffer*, considerou-se uma área de influência de 100 m, definida a partir do registro da cabeceira da erosão, de modo semelhante a Conoscenti et al. (2014) e Dewitte et al. (2015).

Ademais, a escolha da área de contribuição foi um critério adotado com base no método do limiar topográfico, para testar sua aplicação nos modelos de regressão logística.

Como mostra a Figura 45 os pontos aleatórios nos modelos B2 e A2 estão localizados na região de influência delimitada com base no registro de cabeceira. Essa opção foi adotada como uma alternativa para aumentar o tamanho da amostra, pois segundo Hair et al. (2014), a aplicação das técnicas de estatística multivariada requer uma base de dados grande e, normalmente, favorece a obtenção de variáveis com coeficientes de regressão estatisticamente significativos.



Fonte: A autora.

O número de pontos aleatórios foi definido com base no tamanho da amostra (n) e nível de confiança de 95%. Logo, considerando a relação entre tamanho da amostra e registros de erosão em cada cenário, conclui-se que o ideal seria adotar cinco pontos aleatórios distribuídos no *buffer* (100 m) ou área de contribuição (Figura 45). Para isso, utilizou-se a ferramenta *Create random points*.

Assim, os pontos localizados na área de influência (modelos de regressão logística B ou A) representam as áreas com presença de erosão ($Y = 1$). Do mesmo modo, para manter a amostra equilibrada aumentou-se também o número de pontos aleatórios nas áreas sem erosão ($Y = 0$). A Tabela 6 traz a descrição do conjunto de dados utilizado em cada um dos modelos.

Tabela 6. Características do conjunto de dados em relação a variável dependente.

Cenário	Nº de erosões	Y = 1 (50%) e Y = 0 (50%)	
		Modelo P1	Modelos B2 e A2
1960	86	172	860
1972	78	156	780
1988	78	156	780
2010	92	184	920
Todos os cenários	184	368	1840

4.5.1.2 Variáveis independentes

A seleção das variáveis independentes foi pautada em três critérios principais: disponibilidade de dados, influência na dinâmica dos processos erosivos e viabilidade em relação à aplicação da regressão logística. Para auxiliar nessa seleção considerou-se o conhecimento prévio decorrente de pesquisas desenvolvidas na área, como Gomes (2002); Araújo (2011); e Neves (2017), bem como o Relatório Técnico: Cadastramento de pontos de erosão e inundação do Estado de São Paulo (IPT, 2012).

Em síntese, as variáveis independentes foram divididas em seis grupos principais, conforme suas características: meio físico (materiais inconsolidados); chuva (índice de erosividade); morfométricas (declividade, perfil da curvatura, plano da curvatura e fluxo acumulado); topográficas secundárias (SPI, STI e TWI); local de ocorrência (encosta ou drenagem) e antrópicas (uso do solo e proximidade de estradas).

A escolha das variáveis materiais inconsolidados, chuva, relevo e uso do solo se devem a sua influência direta nos processos erosivos (ZUQUETTE, 1987; GUERRA, 1998; MORGAN, 2005; SOBREIRA; SOUZA, 2012). Segundo Sobreira e Souza (2012), os estudos relacionados à suscetibilidade devem contemplar informações básicas, como registros de ocorrência, aspectos pluviométricos, topográficos, morfométricos e material inconsolidado. Além do mais, Gomes (2002) mostrou que os materiais inconsolidados transportados, associados à Formação Pirambóia, declividade do terreno e uso do solo, são fatores preponderantes para avaliar a suscetibilidade à erosão na BHRM.

Além dessas variáveis foram incluídas mais duas variáveis como potenciais fatores condicionantes: local de ocorrência das erosões (drenagem ou encosta) e distância das estradas. Segundo Gomes (2002), na BHRM os processos erosivos normalmente se originam próximos às drenagens e tendem a evoluir para processos erosivos acelerados. Do mesmo modo, a

influência das estradas tanto no desencadeamento como na evolução das erosões foi constatada por Silva (2003), Almeida Filho et al. (2004) e IPT (2012).

Desse modo, para desenvolver o modelo de regressão logística, selecionou-se previamente doze variáveis, divididas em categóricas e contínuas (Quadro 13). Assim, as variáveis materiais inconsolidados, uso do solo, perfil da curvatura, plano da curvatura, local de ocorrência na encosta e estrada foram subdivididas em categorias. As demais variáveis declividade, fluxo acumulado, SPI, STI, TWI e índice de erosividade são do tipo contínuas.

Convém destacar que a variável unidade do terreno (GOMES, 2002) não foi incluída nessa análise devido ao número de unidades presentes na área de estudo (Tabela 3). Segundo Hair et al. (2014), normalmente, para construir um modelo de regressão são necessários dez casos para cada variável independente. Dessa maneira, ao analisar o tamanho da amostra em cada cenário e, considerando que cada categoria da variável independente representa uma variável, optou-se por remover unidades do terreno da base de dados. Todavia, para representar a influência do relevo, foram considerados o perfil da curvatura, plano da curvatura, declividade, fluxo acumulado, e índices topográficos secundários (SPI, STI e TWI).

Depois de selecionar as variáveis, procedeu-se com a obtenção dos valores e categorias. Para isso, realizou-se uma série de processamentos no ArcGIS. Para extrair a categoria das variáveis materiais inconsolidados, curvatura do perfil e curvatura do plano, utilizou-se a ferramenta *Spatial Join*. Para obter os valores médios das variáveis contínuas declividade, fluxo acumulado, SPI, STI, TWI e índice de erosividade utilizou-se a ferramenta *Zonal Statistics*.

As demais categorias das variáveis independentes foram definidas com base na fotointerpretação e nos documentos cartográficos. Desse modo, para obter as classes de uso do solo para cada um dos pontos realizou-se a fotointerpretação das fotografias aéreas e a inserção das informações na tabela de atributos. Da mesma forma, para caracterizar a localização da feição na encosta, foi feita a fotointerpretação e utilizou-se também, os mapas topográficos como apoio para interpretação do local de ocorrência da erosão.

Considerou-se que os pontos localizados próximo à drenagem são aqueles que ocorrem ao longo dos canais de primeira de ordem, nas cabeceiras das drenagens (GOMES, 2002). Por fim, para a variável proximidade com as estradas, considerou-se uma distância de 30 m em relação à borda. Esse valor foi atribuído, pois, ao interpretar as fotografias aéreas, observou-se que as feições identificadas nessas regiões ocorrem próximo dos taludes rodoviários.

Quadro 13. Características descritivas das variáveis dependente e independentes.

Tipo	Nome	Fonte	Categorias/Descrição Valor de atributo		
Dependente	Erosão	Fotointerpretação das fotografias aéreas	Presença de erosão (Y = 1)		
			Ausência de erosão (Y = 0)		
Independente	Materiais inconsolidados	Gomes (2002)	Sedimentos coluvionares		Resposta binária (0,1)
			Transportado associado à Formação Pirambóia		
			Residual associado à Formação Pirambóia		
			Sedimentos aluvionares		
	Uso do solo	Fotointerpretação das fotografias aéreas	Pastagem		
			Agrícola		
			Vegetação		
			Urbano		
			Eucalipto		
	Perfil da curvatura	MDE	Convexa		
			Retilínea		
			Côncava		
	Plano da curvatura		Convergente		
			Planar		
			Divergente		
	Local de ocorrência na encosta	Fotointerpretação das fotografias aéreas e carta topográfica	Drenagem		
			Encosta		
Estrada	Fotointerpretação das fotografias aéreas	Próximo ($d \leq 30m$)			
		Distante ($d \geq 30m$)			
Topográficas primárias	MDE	Declividade		Valor médio	
		Fluxo Acumulado			
Topográficas secundárias		SPI			
		STI			
		TWI			
Clima	DAEE	Índice de erosividade (EI_{30})			

Por fim, depois de obter os dados em ambiente SIG, procedeu-se com a importação para o Excel[®], para que os dados estivessem num formato compatível com seu uso no R[®]. As variáveis independentes categóricas foram codificadas considerando sua resposta binária (0 ou 1). Esses códigos representam o pertencimento ou não a determinada categoria. Ressalta-se que o critério também foi adotado por Conoscenti et al. (2014), e se justifica, pois garante a representação de todas as variáveis categóricas em uma mesma escala.

4.5.2 Desenvolvimento do modelo no R

Depois de preparar a base de dados procedeu-se com a aplicação da técnica de regressão logística. Para isso, utilizou-se o *software* R e pacotes específicos, como *caret*, *stats*, *faraway*, *desctools*, *resourceselection* e *visreg* (DALGAARD, 2008). O Apêndice A contém a descrição detalhada do código implementado no R.

Inicialmente, realizou-se uma análise estatística para avaliar a correlação entre as variáveis independentes numéricas. Utilizando a função *cor* (BECKER et al. 1988), obteve-se a matriz de correlação. Essa função considera a correlação de *Pearson* como método padrão para dados quantitativos. Dessa forma, ao analisar os resultados, as variáveis que retornaram um coeficiente de correlação > 0.5 foram removidas do banco de dados, a fim de evitar problemas na capacidade preditiva do modelo.

Após a análise preliminar da correlação, foram realizadas várias etapas sequenciais no R. Primeiramente, a base de dados foi dividida entre duas amostras, denominadas treino e teste. Para isso, utilizou-se o pacote *caret* e a função *CreateDataPartition*. Considerou-se uma divisão aleatória dos dados, de 70% para a amostra de treino e 30% para amostra de teste. Na literatura, as divisões mais utilizadas na literatura são 80:20 ou 70:20 (DEWITTE et al. 2015; GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al.2015; ARABAMERI et al. 2019). Nessa pesquisa, a escolha de 70:30, se justifica, pois os testes preliminares retornaram resultados melhores considerando essa divisão.

Sequencialmente, foi utilizado o pacote *stats* e a função *glm* para calibrar o modelo de regressão logística com uma função binária método padrão no R. O modelo gerado foi tomado como referência na análise estatística, pois foi calibrado com todas as variáveis independentes.

Desse modo, o modelo de regressão logística base foi analisado considerando algumas medidas de ajustamento, como AIC (Critério de Informação de *Akaike*) e desvio, obtidas por meio da função *summary*. Em seguida, utilizou-se o método *stepwise* e a função *step* para auxiliar na escolha do modelo com melhor ajuste e, portanto, calibrado com as variáveis mais importantes. Destaca-se que o método *stepwise* utiliza o AIC para indicar o modelo com melhor ajuste, ou seja, aquele que retornou o menor valor de AIC (BOZDANGAN, 1987).

Posteriormente, foram realizados os testes de multicolinearidade e outros para avaliar a qualidade do modelo, como *pseudo R²* e Teste de *Hosmer* e *Lemeshow*. Para o teste de multicolinearidade utilizou-se o pacote *faraway* e a função *vif*; para o *pseudo R²*, o pacote *DescTools*; para o Teste de *Hosmer* e *Lemeshow*, o pacote *ResourceSelection*. Convém destacar que, como a multicolinearidade pode afetar a capacidade preditiva do modelo, quando o

resultado do teste indicou $VIF > 10$, foi necessário retomar as etapas iniciais e calibrar os modelos novamente.

Sequencialmente, realizaram-se os testes de validação do modelo com base na curva ROC e matriz de confusão. A curva ROC foi obtida utilizando o pacote *pROC* e, para criar a matriz de confusão, utilizou-se o pacote *caret*. Com relação à matriz de confusão, destaca-se que é necessário criar uma regra de predição para prever se houve ou não acerto da probabilidade estimada pelo modelo. Conforme recomendado por Hosmer e Lemeshow (2000), utilizou-se valor de 0.5. Por último, para auxiliar a análise do ajuste dos modelos de regressão logística foram gerados os gráficos no R. Para isso, utilizou-se o pacote *visreg* (BREHENY; BURCHETT, 2013).

Depois de aplicar a técnica de regressão logística no R, pode-se comparar os modelos obtidos. Desse modo, procurou-se escolher os modelos de regressão logística com base nas seguintes características: variáveis com coeficientes de regressão estatisticamente significativos, bom ajuste aos dados e capacidade de discriminação aceitável.

4.5.3 Cartas de suscetibilidade

Nesta etapa, foram desenvolvidas as cartas de suscetibilidade à erosão, com base nos modelos de regressão logística obtidos na etapa anterior. Destaca-se que Akgün; Türk (2011), Lucá et al., (2011), Conoscenti et al. (2014) e Dewitte et al. (2015) também utilizaram a técnica referida para delimitar as áreas potenciais à erosão.

Dessa maneira, foram geradas quatro cartas de suscetibilidade para os cenários de 1960, 1972, 1988 e 2010. As cartas foram geradas para os quatro cenários com o objetivo de analisar as mudanças que ocorreram frente à predisposição do meio físico ao desenvolvimento de processos erosivos. Como forma de analisar o resultado obtido, comparou-se as áreas classificadas como suscetíveis com os registros de erosão identificados nas imagens do *Google Earth* de 2020.

Além dessas, também foi gerada a carta de suscetibilidade para o cenário de 2020, adotando como referência o modelo de regressão logística geral, desenvolvido com os registros de erosão identificados nas fotografias aéreas de 1960, 1972, 1988 e 2010. A carta para o cenário de 2020 foi elaborada com o objetivo de testar a capacidade do modelo delimitar as áreas propensas à erosão.

Assim, depois de selecionar o modelo que explicou melhor os fatores condicionantes das erosões para cada cenário, realizou-se uma sequência de procedimentos no ArcGIS. Convém

ressaltar que, na etapa anterior, as categorias das variáveis uso do solo, local de ocorrência na encosta e estrada foram interpretadas e inseridas na tabela de atributos. Desse modo, para representar espacialmente essas variáveis, considerou-se as ferramentas de geoprocessamento, e a base de mapas de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomias. Convém mencionar, que a base foi editada manualmente com base nas fotografias aéreas da área de estudo para garantir a compatibilidade com a escala de trabalho.

Em suma, para representar espacialmente a variável local de ocorrência na encosta, considerou-se o *buffer* da rede de drenagem (ICG, 1979), definido com base no valor médio da distância do ponto de cabeceira até os canais de drenagem. De maneira similar, para representar a variável estrada, considerou-se o *buffer* de 30 m em relação ao trecho da rodovia, delimitada manualmente com base nas fotografias aéreas.

Para representar as variáveis relacionadas ao uso do solo (pastagem, agrícola, urbano, vegetação e silvicultura), utilizou-se os mapas do projeto MapBiomias. Os dados no formato *GeoTiff* foram acessados por meio do *Google Earth Engine* e, posteriormente, foram editados manualmente com base nas fotografias aéreas. Esse processo foi realizado para corrigir os erros relacionados, principalmente, com as classes floresta \times silvicultura e cana \times pastagem.

Depois de preparar a base cartográfica, as cartas de suscetibilidade foram geradas utilizando a ferramenta *raster calculator*. Para implementar a equação do modelo de regressão logística no SIG, adotou-se as seguintes etapas: $step_1 = \text{atributo} \times \text{coeficiente de regressão}$; $step_2 = \text{intercepto} + step_1$; $step_3 = \exp(step_2)$; $step_4 = 1 + step_3$; $step_5 = step_3/step_4$. Por fim, foram realizados alguns testes em relação aos métodos de classificação e optou-se por utilizar o desvio padrão (*standard deviation*) para classificar a variação da suscetibilidade em cinco classes (muito pouco, pouco, moderadamente, suscetível e altamente suscetível). A escolha deste método se deve à melhor representação das classes, que se mostraram compatíveis com as condições analisadas na BHRM.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizadas as etapas de compilação, preparação da base cartográfica e análise dos dados em ambiente SIG, procedeu-se com a elaboração do inventário, análise do limiar topográfico e aplicação do modelo de regressão logística. Este capítulo apresenta os resultados da pesquisa, sintetizados em três subcapítulos principais, conforme o método aplicado: inventário, limiar topográfico e modelo de regressão logística. Em cada um dos subcapítulos, os resultados e discussões são fundamentados na avaliação da dinâmica dos processos erosivos entre o período de 1960 a 2010.

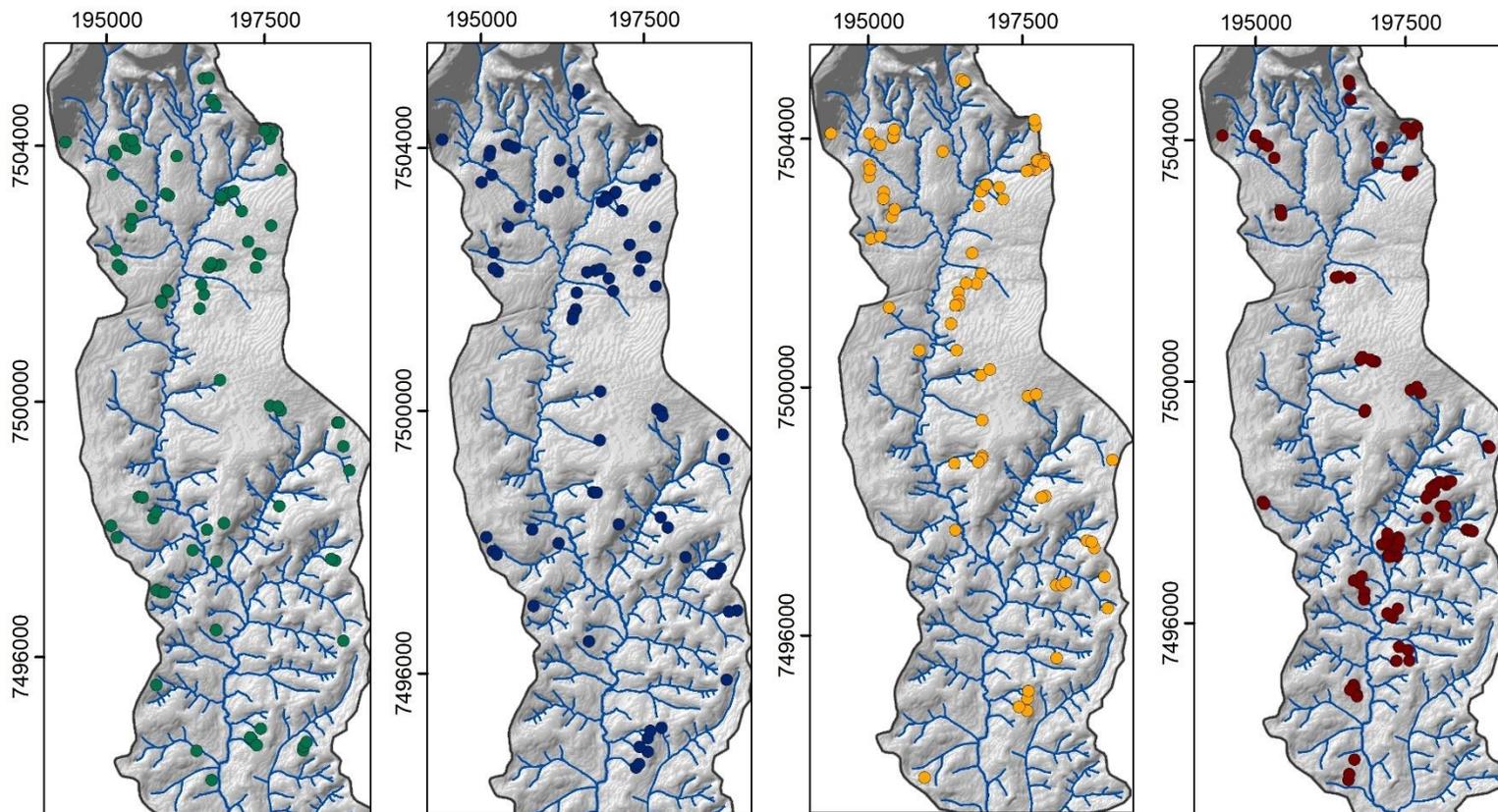
5.1 Inventário dos processos erosivos

Na fase de inventário, analisou-se a distribuição espacial e a evolução das erosões na BHRM. Para isso, considerou-se o número de registros identificados em cada cenário; o tipo de material inconsolidado; o uso do solo predominante; e a localização da erosão na encosta. Além das características do meio físico, é importante considerar os fatores antrópicos, pois as mudanças do uso do solo podem induzir a ocorrência de processos erosivos acelerados. Desse modo, a Figura 46 ilustra a distribuição espacial dos registros de erosão nos anos de 1960, 1972, 1988 e 2010.

A Tabela 7 apresenta uma síntese do cadastro de processos erosivos para os quatro cenários analisados. No geral, a maioria das erosões identificadas localizavam-se em regiões com presença de material transportado associado à Formação Pirambóia, uso do solo com predomínio de pastagem e próximo às cabeceiras de drenagem. Nos anos de 1960, 1972 e 1988, a maioria das erosões concentravam-se na porção norte, enquanto no ano de 2010, identificou-se feições na porção sul, localizadas predominantemente na encosta, ou seja, distante dos canais de drenagem. Em cada cenário, foram registradas 86, 78, 78 e 92 feições erosivas, respectivamente.

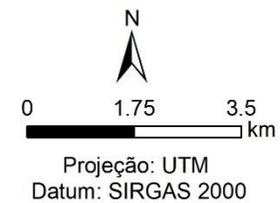
Mudanças significativas com relação ao uso do solo ocorreram ao longo do período analisado. Em 1960 e 1972, as erosões estavam localizadas em áreas com uso agrícola e pastagem (Figura 47a e Figura 47b); enquanto nos anos de 1988 e 2010, a presença de loteamentos residenciais, possivelmente, contribuiu com o desenvolvimento e evolução dos processos erosivos (Figura 47c e Figura 47d).

Figura 46. Inventário de feições erosivas da BHRM.



Inventário de Processos Erosivos

- Registros de erosão (1960)
- Registros de erosão (1972)
- Registros de erosão (1988)
- Registros de erosão (2010)
- ~ Limite da área de estudo (BHRM)
- ~ Rede de drenagem (IGC)



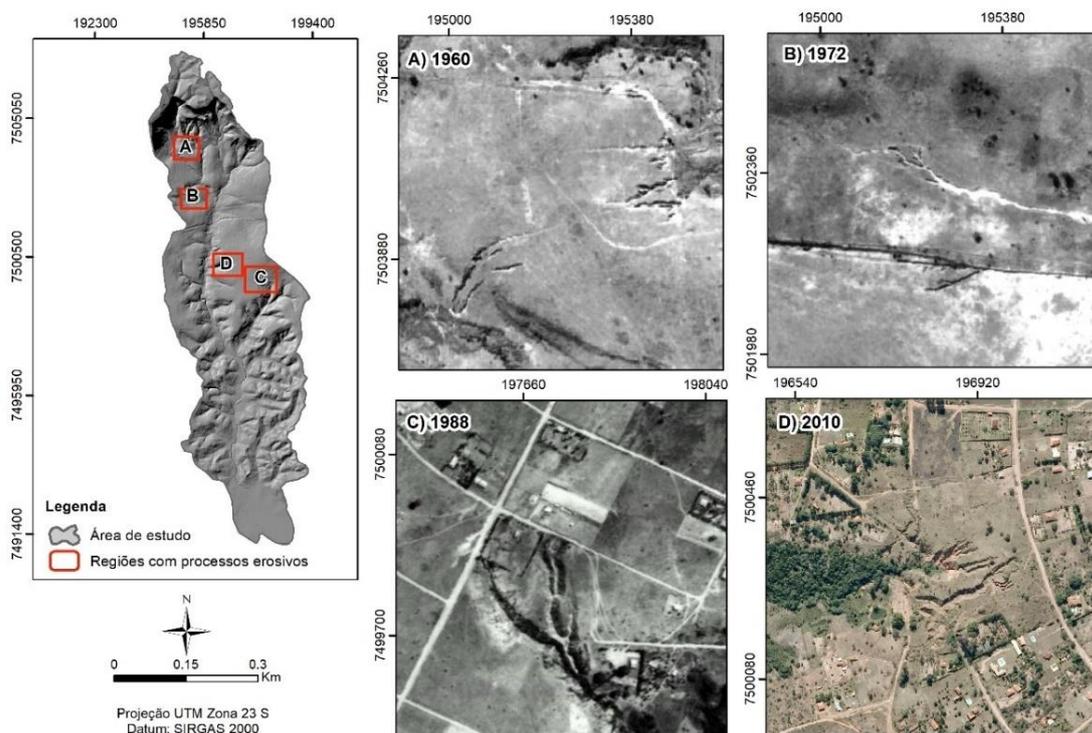
Fonte: A autora.

Tabela 7. Síntese do inventário de processos erosivos: percentual de ocorrência nas classes de material inconsolidado, uso do solo e local na encosta.

Atributo/Classes		Registro de processos erosivos (%)			
		1960	1972	1988	2010
Materiais inconsolidados	Transportado F.P.	81	89	90	62
	Residual F.P.	10	6	6	30
	S. Coluvionares	8	4	4	8
	S. Aluvionares	1	1	-	-
Uso do solo	Pastagem	95	95	62	70
	Agrícola	5	5	16	16
	Urbano	-	-	22	14
Local de ocorrência	Drenagem	60	55	68	39
	Encosta	40	45	32	61

Legenda: F.P. = Formação Pirambóia; S. = Sedimentos.

Figura 47. Fotografias aéreas destacando as regiões com processos erosivos mapeados em 1960, 1972, 1988 e 2010.

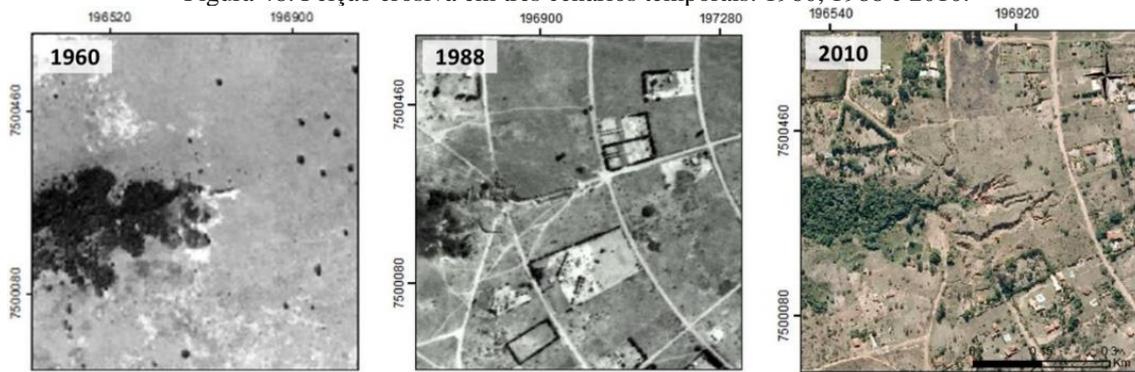


Fonte: A autora.

A Figura 48 mostra a evolução de uma feição erosiva entre 1960 e 2010, devido às mudanças de uso do solo e à transformação de pastagem para área urbanizada. Desse modo, na BHRM, a influência do uso e ocupação do solo foi um fator importante na aceleração dos

processos erosivos, condicionando feições em estágio avançado, como voçorocas, no cenário de 2010. Zuquette et al. (2007), ao estudarem a dinâmica das erosões em uma área adjacente à BHRM, concluíram que as atividades antrópicas ligadas às operações de loteamento atuaram na deflagração e aceleração dos processos erosivos.

Figura 48. Feição erosiva em três cenários temporais: 1960, 1988 e 2010.

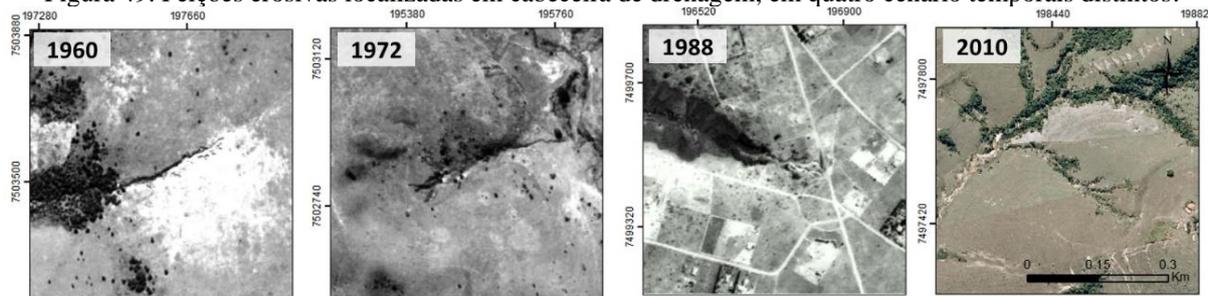


Fonte: A autora.

Com relação aos materiais inconsolidados, a maioria das erosões localizavam-se predominantemente na região dos materiais transportados associados à Formação Pirambóia, todavia, destaca-se a presença de erosões na região ocupada por materiais residuais associados à Formação Pirambóia no cenário de 2010. Ambos são materiais de textura arenosa, com baixa resistência à erosão, mas apresentam características geotécnicas distintas. Segundo Gomes (2002), os materiais inconsolidados transportados ou retrabalhados possuem estrutura porosa, sem cimentação e matéria orgânica, consistência muito baixa e, portanto, são altamente erodíveis. Os materiais inconsolidados residuais apresentam textura de areia fina, com estrutura maciça (topo) e estratificada (base), constituída com cimento, e tendem a ser mais erodíveis quando mais evoluídos, ou seja, nas camadas superiores.

Verificou-se, também, que a maioria das feições erosivas registradas nos cenários de 1960, 1972 e 1988 ocorria ao longo das cabeceiras de drenagem, como mostra a Figura 49. Pesquisas desenvolvidas na área corroboram com esses resultados. Segundo Gomes (2002), as áreas mais suscetíveis na BHRM ocorrem próximas às drenagens em terrenos com inclinação superior a 10%. Entretanto, no ano de 2010, o percentual de erosões próximo dos canais de drenagem foi menor, pois, neste cenário muitas erosões foram identificadas em encostas (61%).

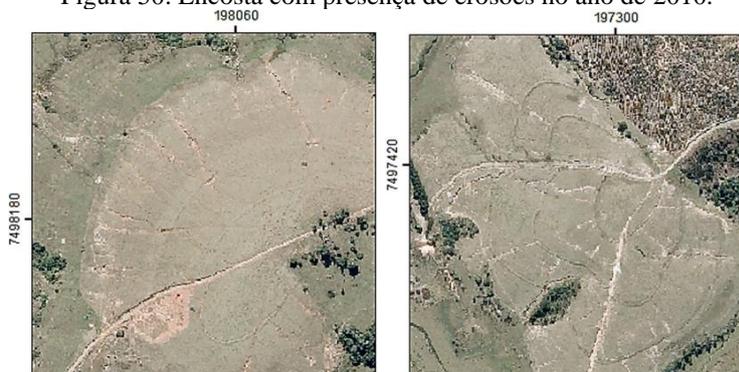
Figura 49. Feições erosivas localizadas em cabeceira de drenagem, em quatro cenários temporais distintos.



Fonte: A autora.

Por fim, destaca-se o aumento de processos erosivos em 2010, devido, principalmente às alterações no uso do solo e à substituição de áreas agrícolas por pastagem. Outro fator que pode ter condicionado o aparecimento dessas feições foi a ausência de práticas de manejo agrícola. Segundo Morgan (2005), se o período entre o preparo do solo e o crescimento da cultura coincidirem com chuvas intensas, aumenta-se a probabilidade de ocorrência de erosão. A Figura 50 mostra uma encosta com concentração dessas erosões e, no geral caracterizam-se por erosões efêmeras, com pequenas incisões na forma de sulcos.

Figura 50. Encosta com presença de erosões no ano de 2010.



Fonte: A autora.

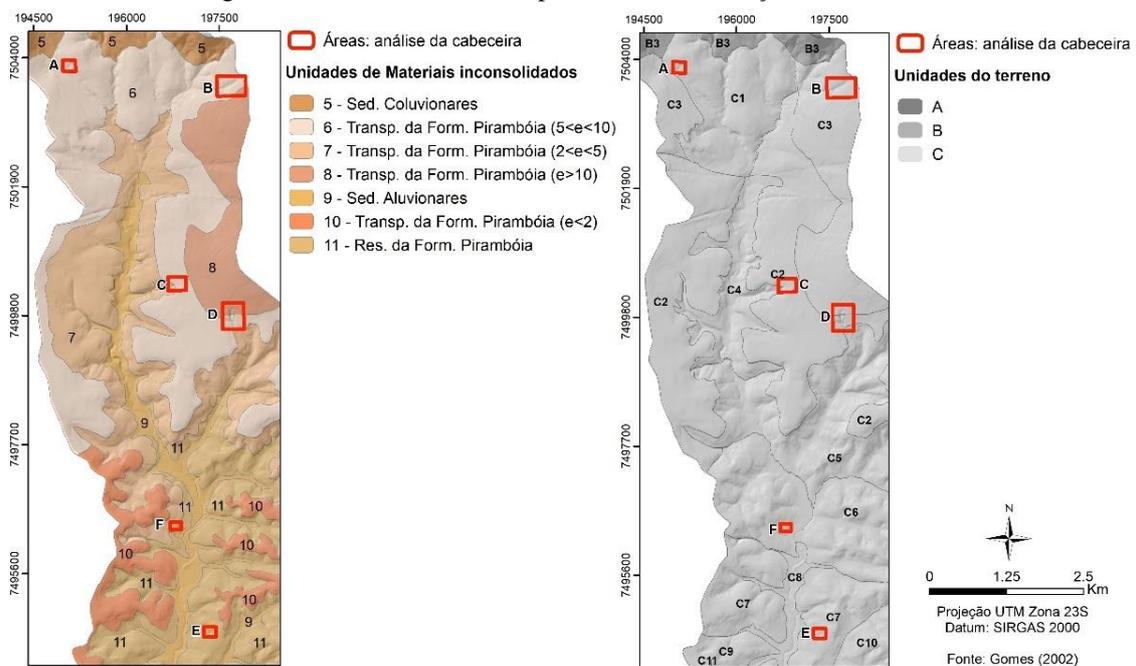
5.1.2 Avanço da cabeceira

Sequencialmente, analisou-se o avanço da cabeceira ao longo dos cenários temporais. Essa análise é importante, pois, segundo Poesen et al. (2002) e Gómez-Gutiérrez et al. (2009a), o avanço da cabeceira é um processo que faz parte da dinâmica de evolução das erosões e pode afetar as condições topográficas relacionadas com o desencadeamento dos processos erosivos.

No geral, as feições erosivas na BHRM surgiram na porção inferior das encostas e, à medida que o processo evoluiu, avançaram para as porções superiores. Tomando como exemplo cinco regiões da BHRM, observou-se que os avanços da cabeceira variaram de 23 a 136 m

(Figura 51). Convém destacar que as alterações do uso do solo modificaram a localização do ponto de cabeceira ao longo dos anos e por isso não foi possível analisar o avanço de todas as feições registradas. Desse modo, foram selecionadas quatro regiões na área dos materiais transportados associados à Formação Pirambóia (A, B, C, D e F) e outra no setor dos materiais residuais (E).

Figura 51. Locais selecionados para análise do avanço da cabeceira.



Fonte: A autora.

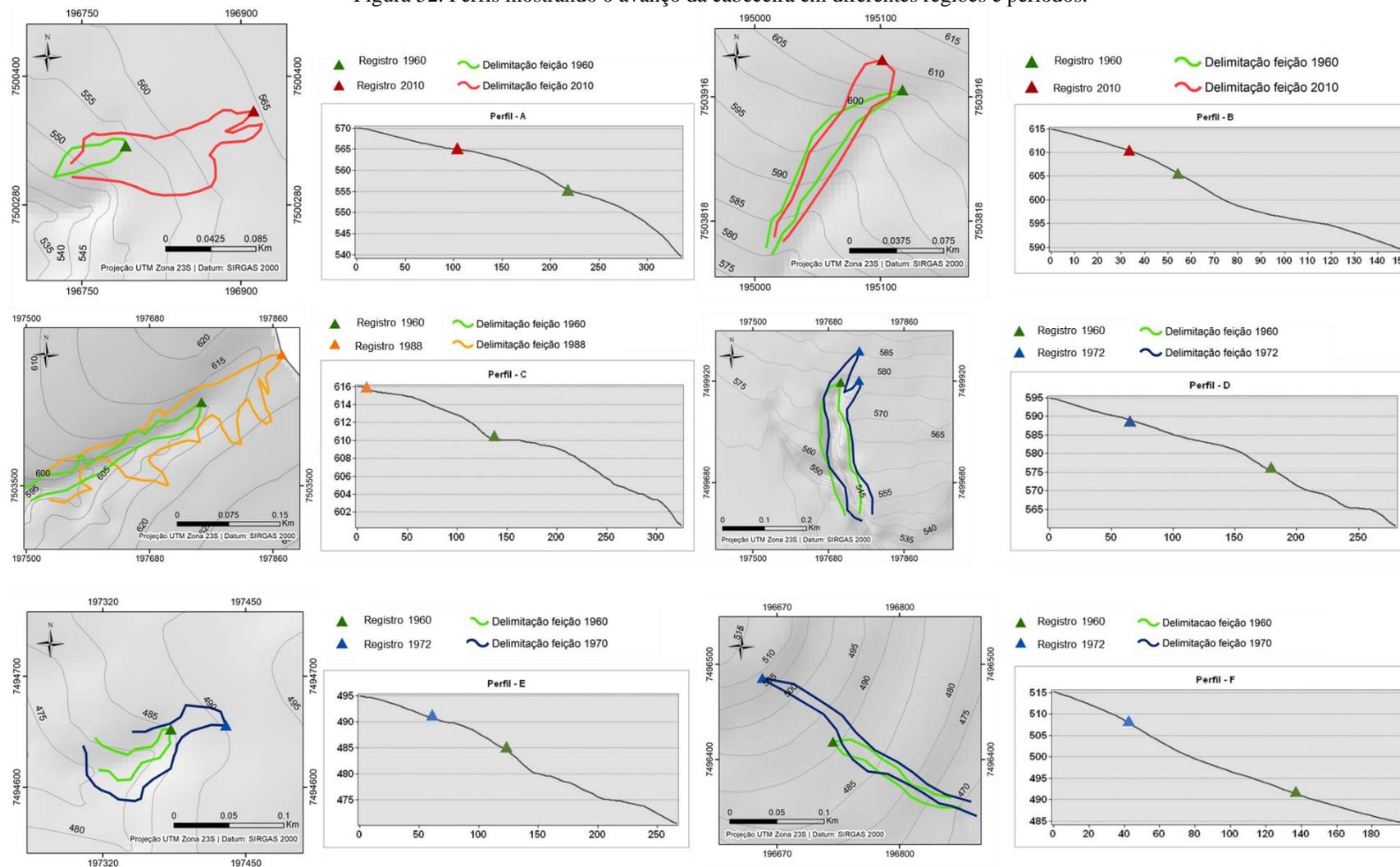
Os maiores avanços ocorreram nas regiões A e C (Figura 52). Essas erosões localizavam-se próximas às cabeceiras de drenagem, em encostas com perfis retilíneos a convexos (unidades do terreno C2 e C3). Destaca-se que, na região A, considerou-se o período de 1960 a 2010 e o avanço foi de 124 m; enquanto na região C, o período foi de 1960 a 1988 e o avanço de 136 m. A proximidade com os canais de drenagem pode ter sido um dos fatores que contribuíram com o processo de evolução dessas feições, visto que esse é um local com maior tendência à acumulação do fluxo.

Nos perfis D e F, o avanço da cabeceira foi 86 e 100 m, respectivamente. As erosões identificadas nos anos de 1960 e 1972 ocorriam em encostas com perfis retilíneos (Figura 52). Essas feições parecem ser do tipo sulcos e ravinas e não apresentaram evolução nos últimos cenários, pois não foram identificadas nos cenários de 1988 e 2010. Por outro lado, nota-se que, em 12 anos, ocorreu um avanço médio de 93 m, ou seja, uma mudança considerável.

As erosões analisadas nos perfis B e E também se localizavam próximas às cabeceiras das drenagens, todavia, esses terrenos possuem perfis convexos e topos arredondados (Figura 52). Com relação ao perfil B, analisado entre o período 1960 a 2010, houve um avanço de 23 m em relação ao registro mais antigo. Quanto ao perfil E, referente as erosões localizadas na região dos materiais residuais associados à Formação Pirambóia, houve um avanço de 50 m entre o período de 1960 a 1972.

Nesse sentido, o avanço médio para as quatro regiões analisadas foi de 87 m. Entretanto, esse valor variou bastante ao longo dos anos e pode estar relacionado com fatores antrópicos, geotécnicos, relevo, localização na encosta e tipo de feição erosiva. Por exemplo, as feições do tipo voçorocas, ilustradas nos perfis A e D, apresentaram um processo evolutivo significativo. O perfil A ilustra um avanço de 124 m para o período de 50 anos em uma região que passou por uma mudança de uso de pastagem para urbano. Por outro lado, entre 1960 e 1972 não houve uma mudança significativa do solo, mas a feição erosiva apresentou um avanço de 86 m, com presença de ramificações no ano de 1972. Esse fato pode estar relacionado com as características dos materiais transportados da Formação Pirambóia, proximidade com os canais de drenagem e encostas retilíneas.

Figura 52. Perfis mostrando o avanço da cabeceira em diferentes regiões e períodos.

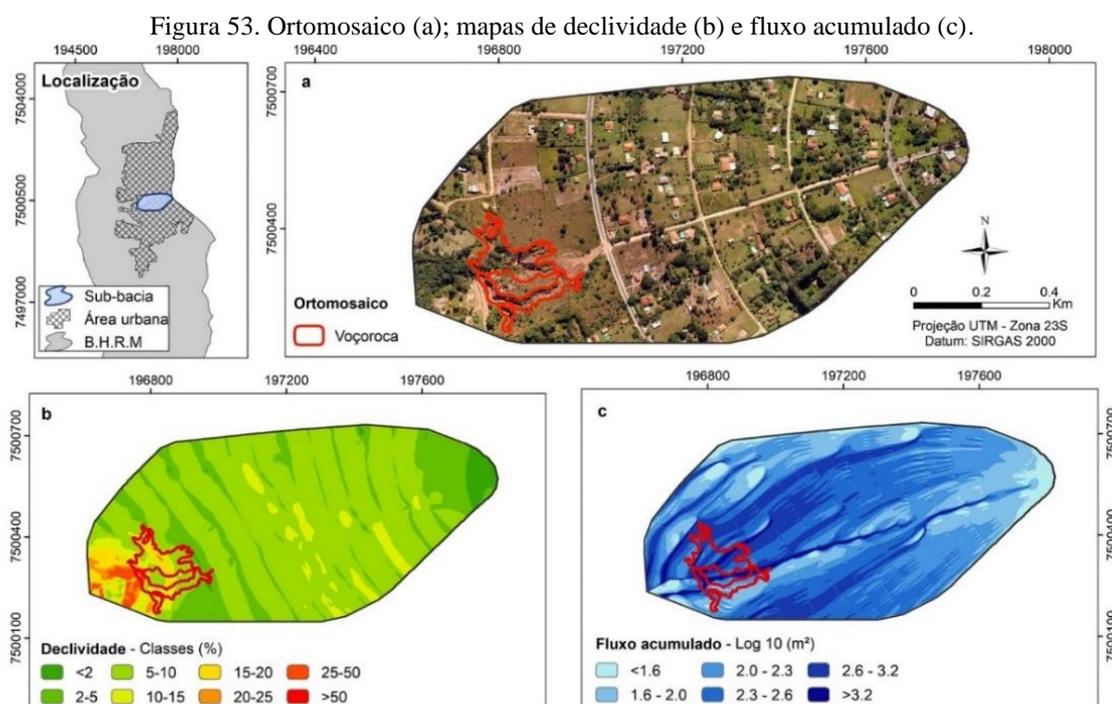


Fonte: A autora.

5.1.2 Investigação detalhada

Para compreender melhor o processo evolutivo das voçorocas, realizou-se um mapeamento detalhado em nível de sub-bacia hidrográfica, com o auxílio de *drone*. A Figura 53 mostra a ortofoto de 2019, de uma sub-bacia da BHRM, com presença de processo erosivo em estágio avançado. Convém destacar que o registro mais antigo dessa feição foi identificado na fotografia aérea de 1960 (Figura 48). No ano de 2019, a voçoroca localizava-se próxima à área urbanizada, denominada Bairro Alpes das Águas. Dessa forma, comparando às ortofotos de 2010 e 2019, observou-se que, entre esses períodos ocorreu o aterramento da cabeceira da erosão.

Com o objetivo de analisar as características morfométricas da voçoroca, foram elaborados os mapas de declividade e fluxo acumulado da sub-bacia (Figura 53). A classe de declividade predominante na região é de 5-10%, com percentual de ocorrência de 66% e, conforme o IG (1993), caracteriza-se por terrenos inclinados com escoamento superficial médio e rápido. Com relação ao fluxo acumulado, nota-se que as regiões com maior tendência ao acúmulo de água ocorrem na mesma direção da cabeceira da erosão. Destaca-se, a presença de outras regiões com acúmulo de água na porção norte da sub-bacia, onde se desenvolveram novas ramificações da voçoroca.



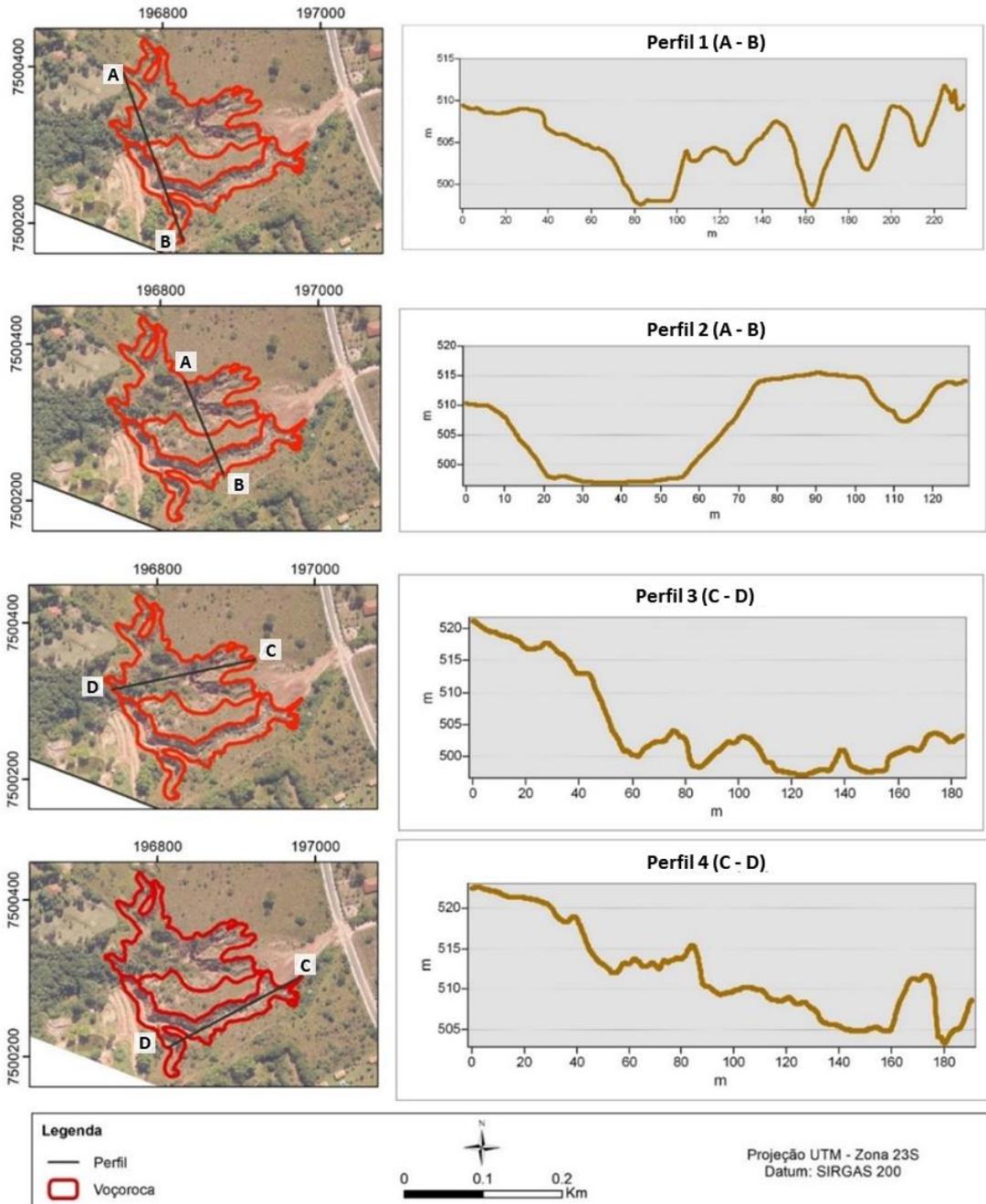
Fonte: A autora.

Analisando a ortofoto e os mapas (Figura 53), verifica-se, a presença de uma rua não pavimentada perpendicular à cabeceira da voçoroca. Desse modo, as características do relevo, do fluxo acumulado e um sistema de drenagem ineficiente podem ser considerados fatores condicionantes responsáveis tanto pela reativação como pela aceleração da feição erosiva. Considerando o aterramento da cabeceira, a reativação do processo também poderia causar a remoção e o transporte dos materiais para o canal de drenagem.

Os perfis 1 e 2 indicam a largura da feição em diferentes regiões, e os perfis 3 e 4, o comprimento da cabeceira até a base próxima ao canal de drenagem (Figura 54). Os perfis indicam que a profundidade da voçoroca varia de 15 a 21 m, nas direções N-S e O-L, respectivamente. Verifica-se, também, paredes muito inclinadas, com diferentes graus de declividade, e uma região estável entre as ramificações (Perfil 2). Ressalta-se que as irregularidades topográficas nos perfis 3 e 4 podem ser explicadas pela presença de vegetação no interior da feição.

Os valores máximos de comprimento, largura e profundidade foram 193.9 m, 222.4 m e 21 m, respectivamente. As dimensões e características topográficas evidenciam a complexidade dessa voçoroca e, conseqüentemente, os riscos associados para as moradias e obras públicas. Em função dessas dimensões, pode-se afirmar que uma grande quantidade de material foi erodida e transportada para os canais de drenagem ao longo dos anos, ocasionando o assoreamento e as alterações hidrológicas na sub-bacia.

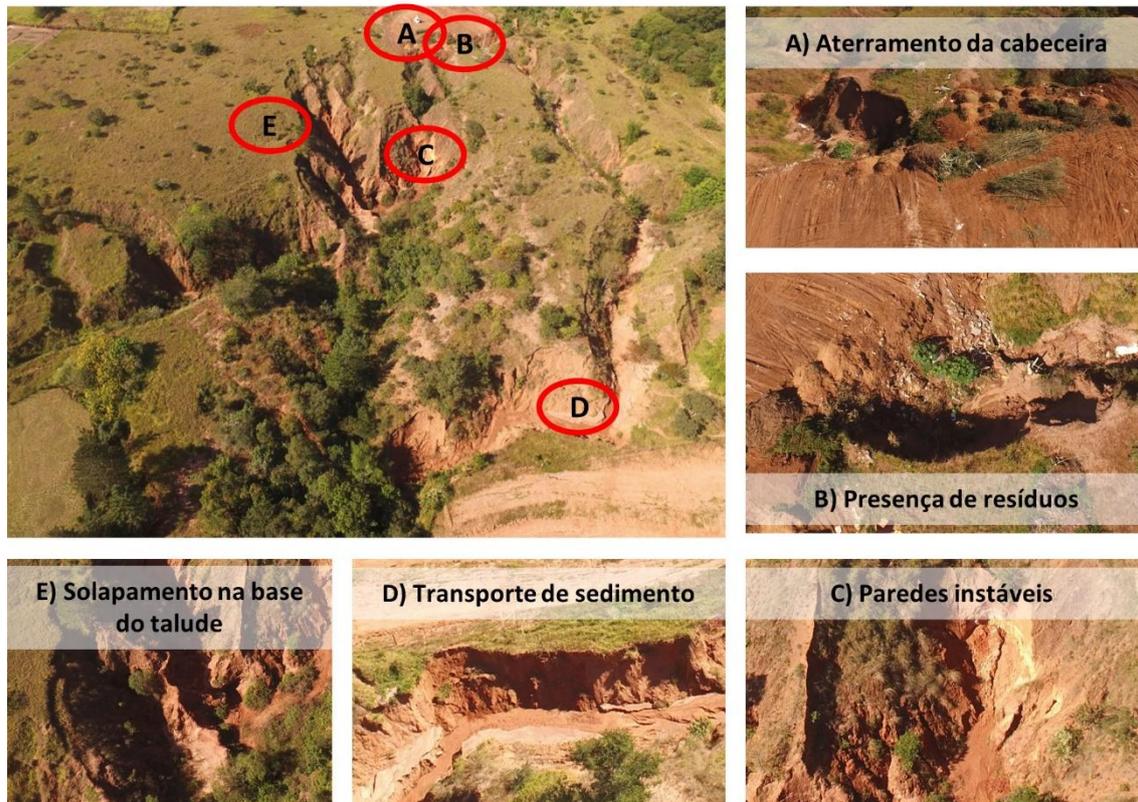
Figura 54. Ortomosaico e perfis topográficos.



Fonte: A autora.

A Figura 55 apresenta uma fotografia aérea oblíqua da voçoroca, destacando a situação da degradação ambiental e os indícios de instabilidade. Desse modo, verifica-se que na cabeceira da voçoroca ocorria o depósito de resíduos sólidos (A e B) e, possivelmente eram resíduos de poda e jardinagem (A) e construção civil (B), conforme constatado em campo. Além do mais, os taludes da voçoroca possuíam declividade acentuada e estavam sem proteção vegetal, por isso estão sujeitos aos processos de instabilidade (C) e ao solapamento na base (E), que, por sua vez, podem condicionar o transporte de sedimento para o interior da feição (D).

Figura 55. Características das voçorocas identificadas com fotos oblíquas de 2019.



Fonte: A autora.

Convém mencionar que, em campo, não foi possível identificar o lançamento concentrado de águas pluviais, como constatado em outros diagnósticos realizados no município de São Pedro (IPT, 2012). Entretanto, as características topográficas e o desenho da malha urbana evidenciam que o fluxo de água pluvial é direcionado para dentro da feição. Assim, ao analisar as características do meio físico, ocupação urbana e os processos recentes de degradação e instabilidade, pode-se concluir que a voçoroca é um processo erosivo ativo, e está sujeito à reativação e evolução da cabeceira.

5.1.3 Síntese

A sistemática de investigação espacial e temporal, realizada por meio do inventário, possibilitou a compreensão dos principais fatores condicionantes dos processos erosivos na BHRM. Os resultados obtidos com o inventário de 1960, 1972, 1988 e 2010 indicaram que os processos erosivos estão associados principalmente aos materiais inconsolidados litologicamente constituídos por arenitos da Formação Pirambóia, área de pastagem e proximidade com os canais de drenagem. Conforme constatado por outros autores, como Gomes (2002), Silva (2003), Zuquette et al. (2007) e Araújo (2011), as características do meio

físico, bem como materiais arenosos, representam um dos principais fatores condicionantes das erosões em São Pedro.

A combinação entre as características do meio físico e o uso do solo propiciou o desenvolvimento de feições do tipo sulcos, ravinas e voçorocas. Logo, os fatores antrópicos podem ser considerados responsáveis pela ativação e aceleração do processo erosivo (ZUQUETTE et al. 2007). Os resultados mostraram que as intervenções antrópicas que mais influenciaram na deflagração dos processos erosivos foram ausência de cobertura vegetal, uso do solo urbano e pastagem. As fotografias aéreas de 1982 mostraram um percentual considerável de erosões próximo ao loteamento residencial (22%) e a maioria dessas feições evoluíram e tornaram-se maiores no cenário de 2010.

O processo erosivo mais crítico caracteriza-se por uma voçoroca de grande porte, localizada em uma sub-bacia da BHRM. A investigação realizada em 2019 mostrou que existem processos de instabilidade que podem condicionar a reativação dessa feição. Em muitos casos, a reativação de feições de grande porte pode intensificar a degradação ambiental e ocasionar perdas sociais e econômicas. Além disso, a ocorrência de voçoroca em uma área urbanizada representa uma situação de risco, tanto para a população quanto para a infraestrutura urbana. Por outro lado, deve-se enfatizar que a expansão urbana ocorreu sem o devido planejamento ambiental, em uma região da BHRM que já se encontrava degradada (MATHIAS, 2016).

Por fim, o inventário mostrou que a dinâmica espacial das erosões está diretamente relacionada com as alterações do uso do solo e que transformações de área agrícola para pastagem condicionaram um aumento significativo de feições no cenário de 2010. O efeito combinado dessas variáveis como erosividade, erodibilidade e manejo agrícola inadequado influenciou no processo da erosão hídrica na BHRM. Desse modo, ressalta-se a importância das práticas de conservação e manejo do solo para promover o crescimento da cobertura vegetal, melhorar a estrutura do solo e, assim, tornar o solo mais resistente à erosão (ROTTA, 2012).

Por último, convém destacar a importância do inventário de erosão, pois constituem informações básicas para a elaboração das cartas geotécnicas, que buscam indicar as áreas mais propícias para os diversos usos e ocupações (SOBREIRA; SOUZA, 2012). Essas investigações são importantes, pois podem auxiliar a elaboração de instrumentos de planejamento e ordenamento territorial.

5.2 Limiar Topográfico

Esse subcapítulo apresenta os resultados referentes à aplicação do método do limiar topográfico, relação entre $S \times A$ na BHRM. Como descrito no subcapítulo 4.4, foram aplicadas as abordagens propostas por Patton e Schumm (1975), assim como Torri e Poesen (2014). Desse modo, avaliou-se a aplicação dessas abordagens na BHRM, bem como a dinâmica das condições morfométricas ao longo dos anos de 1960, 1972, 1988 e 2010.

Primeiramente são apresentados os valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros S e A obtidos para cada registro em função do uso do solo (Tabela 8). No geral, as menores áreas de drenagem correspondem às erosões localizadas em área agrícola, com o cultivo de cana-de-açúcar. Tal fato pode estar associado aos fatores condicionantes antrópicos, bem como às medidas de preparo do solo para o plantio agrícola. Por outro lado, para as erosões localizadas em parcelas urbanas, as áreas de drenagem foram significativamente maiores.

Tabela 8. Valores médios, mínimos e máximos dos parâmetros A e S em função do uso do solo para cada série temporal.

Data	Uso do solo	A - Área de drenagem (ha)			S - Declividade (m/m)		
	Classe	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo
1960	Pastagem	5.70	0.28	36.34	0.17	0.08	0.39
1972	Pastagem	4.80	0.09	25.71	0.16	0.08	0.33
	Agricultura	1.67	1.35	2.20	0.18	0.14	0.22
1988	Pastagem	5.36	0.33	24.53	0.14	0.06	0.34
	Agricultura	1.06	0.20	2.07	0.14	0.07	0.19
	Urbano	13.56	0.86	42.09	0.11	0.05	0.19
2010	Pastagem	1.72	0.14	13.82	0.15	0.06	0.32
	Agricultura	1.17	0.26	1.78	0.13	0.07	0.17
	Urbano	27.47	10.40	36.34	0.07	0.04	0.10

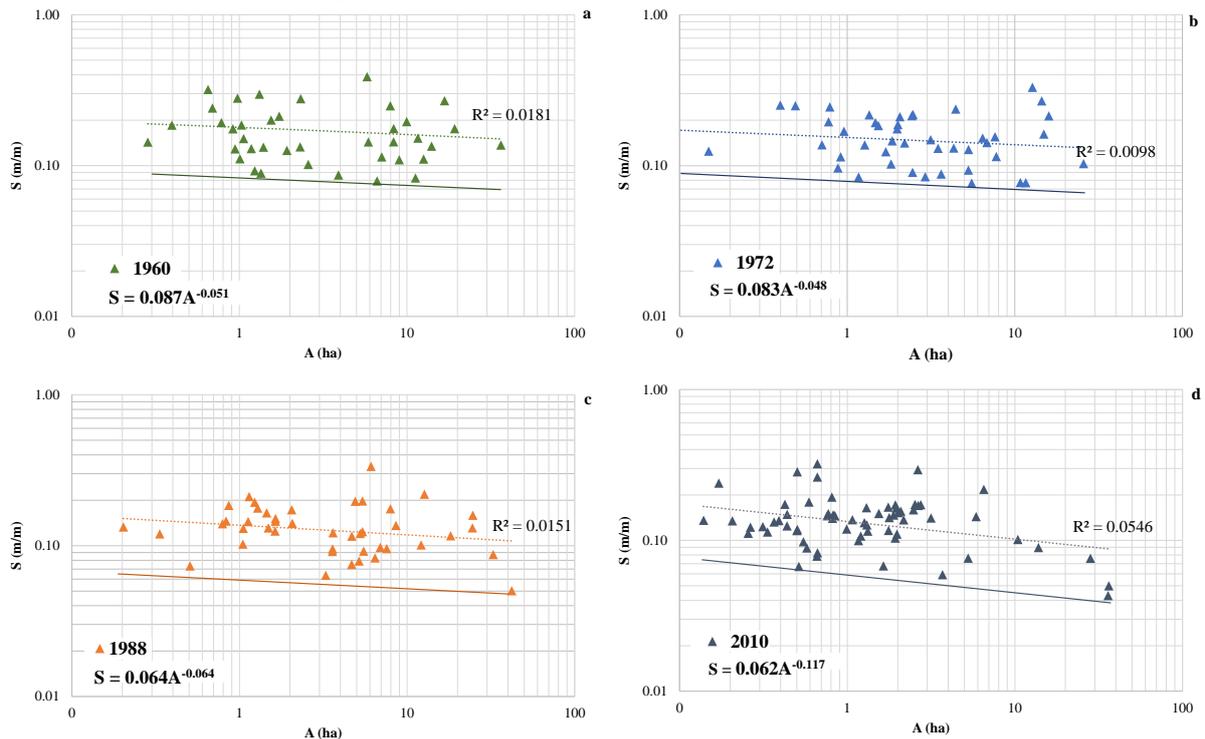
Segundo Rossi et al. (2015), as características associadas com o uso e a cobertura da terra podem afetar o tamanho da área de drenagem. Nessa pesquisa, essa influência se deu de maneira indireta, pois a delimitação da área de contribuição foi realizada de maneira automática, com base no MDE, elaborado a partir das cartas topográficas (APÊNDICE B). Entretanto, as mudanças do uso do solo modificaram a posição da cabeceira da erosão, que, por sua vez, também influenciaram nos valores das áreas de contribuição. Em síntese, como mostra a Tabela 8, os cenários com maior influência antrópica, ou seja, mudanças significativas no uso do solo em 1988 e 2010, foram aqueles que apresentaram os maiores valores para a área de contribuição.

Em suma, os valores obtidos estão dentro do limite considerado na literatura (TORRI; POESEN, 2014; HAYAS et al. 2017), sendo que, normalmente os problemas encontrados estão relacionados com áreas de contribuição maiores, pois podem subestimar o expoente b (ROSSI et al. 2015; TORRI; POESEN, 2014). Desse modo, convém destacar que os valores de área de contribuição maiores estão condizentes com as características das feições, pois são típicos de erosões localizadas próximas aos canais de drenagem.

A Figura 56 mostra os gráficos que representam o limiar topográfico para os quatro cenários analisados, na qual a equação foi obtida considerando os valores de k e b variáveis (PATTON; SCHUMM, 1975). As retas plotadas correspondem ao limite inferior dos dados, logo, representam as condições críticas de desencadeamento da erosão, ou seja, os valores mínimos de S e A necessários para condicionar o início do processo erosivo. Cabe ressaltar que a equação apresentada em cada gráfico foi ajustada considerando os pontos mais próximos do limite crítico.

Os valores do coeficiente k apresentaram uma variação ao longo dos anos, $k_{1960} = 0.087$, $k_{1972} = 0.083$, $k_{1988} = 0.064$ e $k_{2010} = 0.062$. Esses valores mostram que há uma diferença considerável entre o primeiro e último cenário. Desse modo, verifica-se que o coeficiente k parece refletir as condições de uso do solo ao longo do período analisado. Em 1960 e 1972, os valores obtidos para o coeficiente k foram bastante similares para condições de uso do solo semelhantes (pastagem e agricultura), além disso, os processos erosivos localizavam-se predominantemente na região dos materiais transportados. Os valores de k para 1988 e 2010 são menores e refletem, possivelmente, as mudanças do uso de solo, ou seja, novas erosões em áreas urbanizadas.

Figura 56. Gráficos SxA para os quatro cenários analisados: (a) 1960, (b) 1972, (c) 1988 e (d) 2010.



Ao analisar a inclinação da reta, observa-se uma posição similar para os cenários de 1960, 1972 e 1988. Segundo Montgomery e Dietrich (1994), a inclinação da reta reflete as mudanças no regime de fluxo, que, por sua vez, podem estar relacionadas com o uso do solo e com as características do meio físico. Nesse sentido, a diferença observada no gráfico, para o cenário de 2010, pode ser explicada pelo percentual significativo (30%) de erosões na região dos materiais residuais associados à Formação Pirambóia. Ademais, a localização da encosta também foi diferente nesse ano, uma vez que a maioria das erosões (61%) se localizavam em encostas com baixa densidade de canais de drenagem. Logo, as mudanças nas características ambientais que ocorreram principalmente de 1972 para 2010, podem ter condicionado uma alteração no regime de fluxo, e, conseqüentemente, nas condições de desencadeamento.

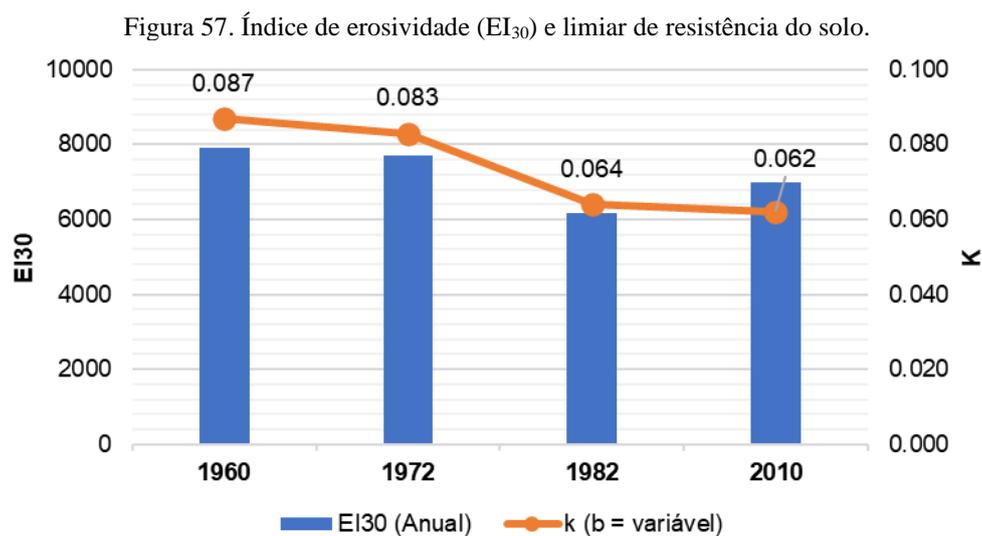
Com relação ao expoente b , os valores foram $b_{1960} = 0.051$, $b_{1972} = 0.048$, $b_{1988} = 0.064$ e $b_{2010} = 0.117$, estando abaixo do valor teoricamente previsto por Montgomery e Dietrich (1994), sendo $0.5 < b > 0.857$. Portanto, apenas com base nesses valores, não é possível inferir o tipo de fluxo dominante do processo.

Ainda com relação ao limite inferior dos dados, as condições de incisão do processo erosivo apresentaram pequenas mudanças entre o período de 1960 e 2010, podendo estar relacionadas à dinâmica do uso do solo. Com a introdução de uma nova classe do uso, isto é, presença de processos erosivos em uma área urbanizada em 1988, os valores de k foram

menores em comparação com os dois primeiros cenários. Desse modo, conforme os resultados obtidos, as alterações no uso do solo modificaram a dinâmica do escoamento superficial e as propriedades do solo, refletindo, também, no limiar de resistência do solo.

Além do uso do solo, outras características ambientais podem explicar as variações nos valores do limiar. Para Hayas et al. (2017), ao considerar o índice de chuva, foi possível entender melhor a variabilidade do limiar topográfico. Nesta pesquisa, a comparação foi realizada com base nos dados pluviométricos disponíveis na literatura para os cenários analisados, desse modo, considerou-se o índice de erosividade (APÊNDICE D).

O gráfico da Figura 57 mostra a comparação entre o EI_{30} e o coeficiente k , e observa-se que o índice de erosividade diminuiu ao longo dos anos, assim como os valores de k . Nesse sentido, os dados pluviométricos não podem explicar a variação do limiar de resistência ao longo dos anos. Logo, as mudanças no uso do solo e sua influência na resistência do solo à erosão parecem explicar melhor a variação do limiar topográfico.



Analisando as equações SxA , nota-se, também, uma redução das condições morfométricas críticas de desencadeamento ao longo do tempo. As declividades críticas para uma área de drenagem de 1 ha foram, respectivamente, 8.7%, 8.3%, 6.4% e 6.2% para 1960, 1972, 1988 e 2010. Segundo Morgan (2005), no início do processo, quando o canal é muito ativo, as declividades são maiores e, com o tempo, o processo de erosão tende a se estabilizar na paisagem, reduzindo a inclinação. Convém destacar que, ao realizar trabalhos de campo em 2019 foi possível identificar algumas erosões com indícios de estabilidade, inclusive com presença de vegetação. Todavia, investigações de campo mais detalhadas são necessárias para determinar se os processos nas encostas estão estáveis ou instáveis

No Brasil, especificamente na região de São Pedro e Bauru (SP), o método do limiar topográfico foi aplicado por outros autores, cujos resultados foram importantes na interpretação dos resultados obtidos nesta pesquisa. Araújo (2011) obteve valores de k entre 0.02 e 0.01; Stabile (2013) encontrou $k = 0.064$; e Neves (2017) obteve um valor geral igual a 0.060. Desse modo, nota-se que os coeficientes k encontrados para os cenários de 1988 e 2010 corroboram com Neves (2017) e Stabile (2013). Convém destacar que esses autores consideraram fotografias aéreas e imagens de satélite do ano de 2010. Com relação aos resultados de Araujo (2011), os valores não são compatíveis, pois os métodos usados para mensuração de S e A são diferentes.

Desse modo, nota-se que os coeficientes k obtidos para os anos de 1988 e 2010 são semelhantes a outras pesquisas desenvolvidas no Brasil (STABILE, 2013; NEVES, 2017). Esse coeficiente pode apresentar variações em função das condições ambientais como clima, solo e uso do solo, todavia, a semelhança entre esses resultados mostra que os valores obtidos estão condizentes com outras pesquisas, nas quais os processos erosivos estudados estão associados com clima tropical chuvoso, características litológicas e geomorfológicas.

Após obter o limiar topográfico com k e b variáveis (POESEN; SCHUMM, 1975), calculou-se o limiar de resistência considerando $b = 0.4$ (TORRI; POESEN, 2014). Essa abordagem é interessante, pois, segundo Torri e Poesen (2014), ao considerar um valor constante para o expoente b , assume-se que as erosões são desencadeadas pelo mesmo tipo de fluxo superficial. Desse modo, pode-se interpretar melhor a variabilidade nos valores do limiar de resistência k .

A Tabela 9 apresenta os valores de k obtidos para cada série temporal, calculados com o expoente b variável e $b = 0.4$. Independentemente do método, para o primeiro (1960) e último cenário (2010), os valores de k foram, respectivamente os maiores e menores. Adotando b como valor fixo, os coeficientes obtidos foram semelhantes para os cenários de 1972 e 1988, e parecem não refletir as mudanças no uso do solo, diferentemente do que foi observado com b variável. Ou seja, o $k_{1988} = 0.064$ obtido com o expoente b variável parece refletir melhor os registros de erosão em área urbana.

Tabela 9. Coeficientes k obtidos para cada série temporal com diferentes valores de b .

Ano	k ($b = \text{variável}$)	k ($b = 0.4$)
1960	0.087	0.092
1972	0.083	0.063
1988	0.064	0.062
2010	0.062	0.058

Convém ressaltar que os valores do expoente b , utilizados para calcular o coeficiente k , foram diferentes. Com relação a $b = 0.4$, Torri e Poesen (2014) definiram esse valor com base nos dados coletados na literatura e outras pesquisas (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; NACHTERGAELE et al. 2001; KNAPEN; POESEN, 2010). Logo, a simplificação adotada por Torri e Poesen (2014) pode auxiliar a interpretação do limiar topográfico, mas impõe a necessidade de uma interpretação criteriosa, considerando as especificidades da área de estudo. As condições de fluxo podem modificar o expoente b e, dependendo das características hidrológicas da área, adotar $b = 0.4$ pode não ser adequado.

Num primeiro momento, observa-se que os valores obtidos são relativamente semelhantes, com exceção dos valores obtidos para o cenário de 1972. Contudo, considerando a semelhança para os demais anos, as duas abordagens (função potência e critério do percentil) permitem calcular o limiar de resistência k . Alguns autores na literatura, como Araújo (2011), retrataram que não foi possível fazer o ajuste automático dos dados utilizando a função potência e, nesses casos, o critério do percentil pode ser uma alternativa bastante útil na definição dos limiares topográficos.

Em segundo lugar, para ambos os métodos (b variável e b fixo), o valor do coeficiente k tende a diminuir, ou seja, na BHRM, a resistência do solo à erosão diminuiu ao longo dos anos e essa redução provavelmente está relacionada com as alterações no uso do solo. Como descrito acima, no ano de 1960 as feições localizavam-se predominantemente em área de pastagem; enquanto em 2010 a presença de erosões em área agrícola e urbana modificou a dinâmica dos processos erosivos e, conseqüentemente, os parâmetros morfométricos A e S .

No geral, ao comparar as duas abordagens, verifica-se que, ao utilizar b como expoente variável, foi possível analisar melhor as mudanças no uso do solo. Esse fato se deve principalmente aos valores de k obtidos com o expoente b variável para os anos 1972 e 1988. Nesse período, constatou-se uma mudança de uso significativa, isto é, registros de processos erosivos em área urbana no cenário de 1988.

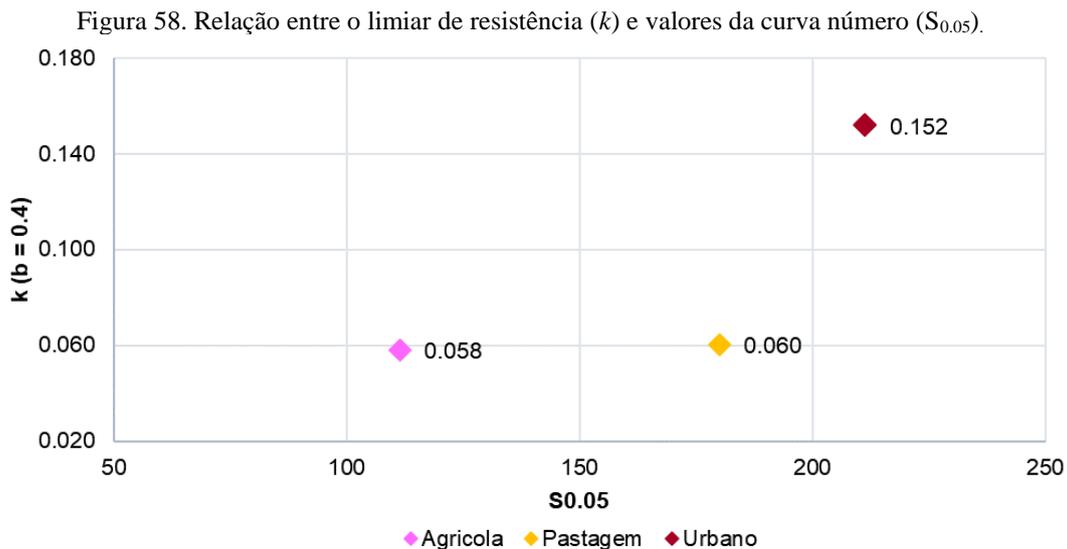
Por outro lado, ao adotar o expoente b variável, a principal limitação encontrada foi a divergência com relação aos valores teóricos propostos em função do fluxo superficial dominante. Hayas et al. (2017) também relataram que não foi possível interpretar os valores obtidos. Além do mais, ao estimar o expoente b , os resultados podem estar sujeitos a erros devido, principalmente, à mensuração da área de contribuição. Por isso, ao adotar essa abordagem exige-se uma escolha criteriosa do MDE e do método de delimitação automática das áreas de contribuição.

5.2.1 Efeitos gerais do uso do solo no limiar topográfico

Na sequência, conforme proposto por Torri e Poesen (2014), analisou-se o efeito do uso do solo sobre o desenvolvimento das erosões. A Figura 58 mostra os valores de k ($b = 0.4$) calculados em função do uso do solo predominante na cabeceira e sua relação com $S_{0.05}$ do método CN (Curva número). Convém ressaltar que os registros foram analisados e agrupados considerando o uso do solo e, posteriormente, os valores de k para cada registro foram calculados adotando o critério estatístico do percentil.

Como o gráfico da Figura 58, os valores do limiar de resistência adotando $b = 0.4$ apresentaram uma boa relação com o método CN. Antes de prosseguir com a análise e discussão, salienta-se que o número de registros para as classes agrícola (plantação de cana-de-açúcar) e urbano são relativamente menores e, portanto, outras investigações são necessárias para complementar essa análise.

Assim sendo, os resultados indicam que as áreas agrícolas com sistema de cultivo em linha reta ou curvas de nível são mais suscetíveis a ocorrências de erosões ($k = 0.058$). Essas erosões geralmente são efêmeras e surgem devido, principalmente, à ausência de práticas de manejo entre os períodos de preparo do solo e desenvolvimento da cultura (VANWALLEGUEM et al. 2005). Do mesmo modo, as áreas de pastagem também são mais suscetíveis, pois retornaram $k = 0.060$, o que se deve, essencialmente, à baixa densidade de cobertura vegetal, pastoreio e outras influências antrópicas.



Os valores de k para área de pastagem são semelhantes àqueles obtidos para os anos de 1972, 1988 e 2010 ($b = 0.4$) e isso ocorreu porque a maioria dos registros localizavam-se nessa classe. Contudo, para as erosões localizadas em área urbana, o valor do coeficiente foi relativamente maior ($k = 0.152$), o que se deve ao tipo de feição presente nesta classe, caracterizada por ravinas e voçorocas, com áreas de contribuição relativamente maiores (Tabela 8).

Com relação ao $S_{0.05}$, os menores índices de armazenamento correspondem aos locais com maior potencial ao escoamento superficial e, portanto, menor resistência do solo à erosão. A substituição de áreas de vegetação nativa por pastagem e cultivo de cana-de-açúcar pode ser considerada um dos fatores responsáveis pela mudança da dinâmica de escoamento na bacia e, conseqüentemente, baixos limiares de resistência do solo para área agrícola e pastagem. Segundo Samani et al. (2009), as mudanças de pastagem para agricultura podem aumentar duas vezes as áreas propensas à erosão.

Quanto à área urbana, na BHRM esse setor apresenta um baixo percentual de área impermeável (12 a 20%), pois caracteriza-se como área de chaceamento. Entretanto a compactação do solo, devido à implantação de loteamentos e estradas, pode diminuir a infiltração natural e aumentar o escoamento superficial. Desse modo, mesmo com um valor de k acima dos demais usos, esse valor ainda é baixo e pode favorecer tanto o desencadeamento como a aceleração dos processos erosivos.

Torri e Poesen (2014), ao investigar um vasto conjunto de limiares topográficos, obtiveram $k = 0.043$ para áreas com cultivo agrícola e $k = 0.154$ para área com pastagem. Ao comparar esses resultados, verifica-se uma semelhança entre os valores obtidos para áreas com cultivo agrícola, todavia, deve-se considerar que a BHRM passou por alterações significativas de uso do solo, principalmente entre as classes agrícola e pastagem, dificultando a comparação dos valores obtidos com outras pesquisas.

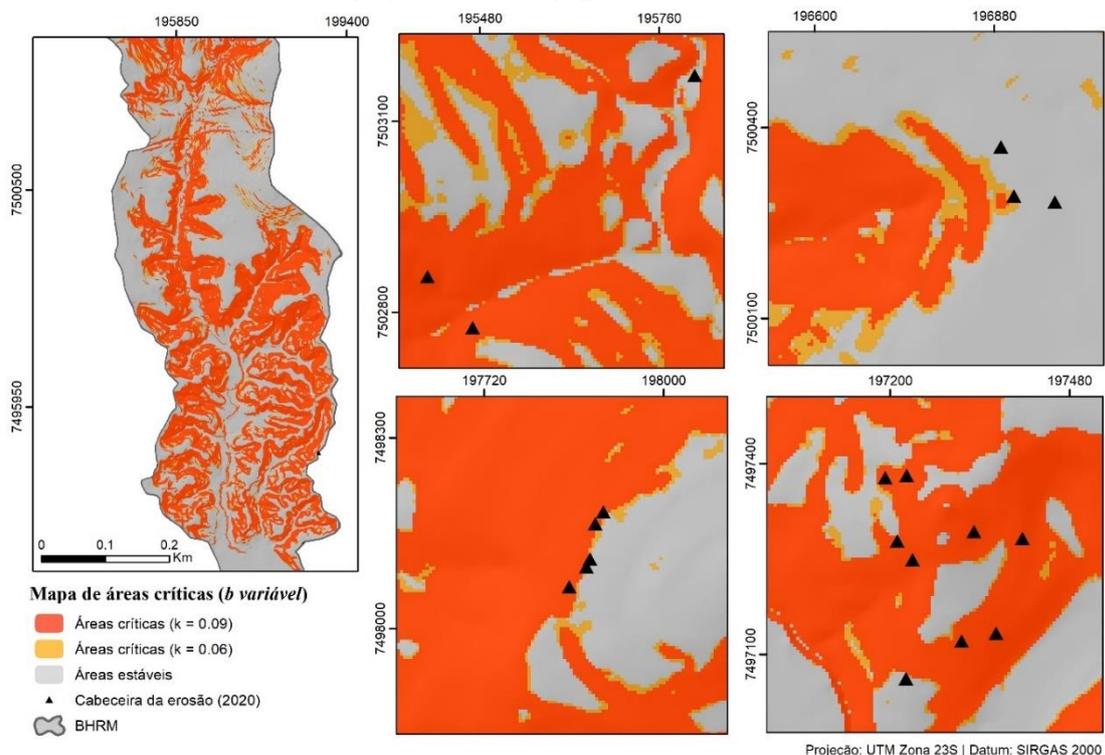
No geral, a comparação com o método CN mostrou uma pequena variação do coeficiente de resistência em função do uso do solo. Segundo Torri e Poesen (2014) e Torri et al. (2018), a caracterização com base nos valores da CN é eficiente para áreas sem dados hidrológicos detalhados. Por outro lado, investigações complementares com base em simulações hidrológicas podem melhorar a estimativa do coeficiente de resistência do solo e a identificação das áreas críticas em função dos diferentes usos do solo.

5.2.2 Mapa de áreas críticas

Para avaliar os locais de desenvolvimento de erosões na área de estudo, elaborou-se o mapa de áreas críticas, considerando os valores de k obtidos com base nos expoentes b variável (Figura 59) e b fixo (Figura 60). Os mapas representam os locais críticos e estáveis, bem como os pontos de cabeceira referentes aos registros de erosão identificados na imagem de satélite do *Google Earth* do ano de 2020. Optou-se por utilizar esse cenário nesta etapa, pois esses registros não foram utilizados para estabelecer a relação $S \times A$, logo, podem ser utilizados na avaliação dos mapas, indicando se as áreas classificadas como críticas conseguem prever o local de iniciação da erosão.

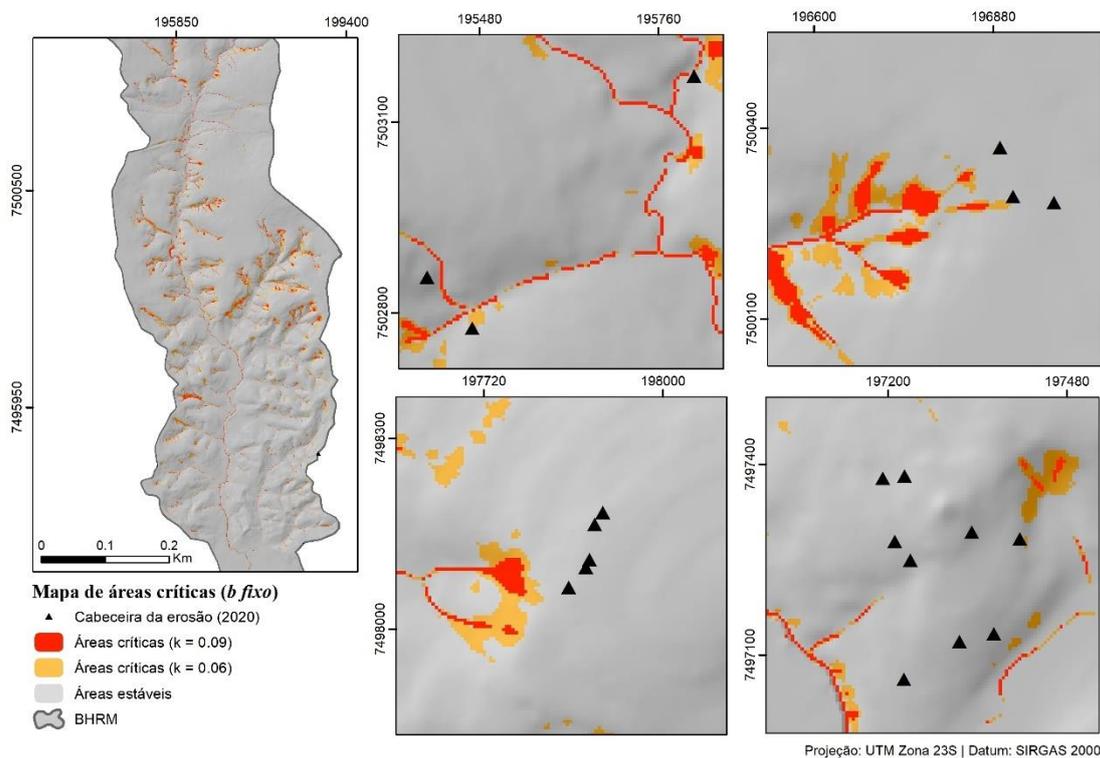
As áreas críticas foram classificadas como regiões susceptíveis em condições extraordinárias e ocorrência mais frequente. Para isso considerou-se a equação $S \times A$ do primeiro (1960) e último cenário (2010), que retornaram coeficientes k bem semelhantes para ambos os métodos. Esses critérios foram adaptados com base na proposta de Millares et al. (2012), na qual as regiões de incisão extraordinárias representam as áreas críticas que estão acima do limiar de resistência mais alto e as zonas de ocorrência mais frequente as áreas que estão acima do limiar mais baixo.

Figura 59. Mapa de áreas críticas indicando os possíveis locais de desenvolvimento de erosões elaborado com a equação do limiar topográfico e b estimado.



Fonte: A autora.

Figura 60. Mapa de áreas críticas indicando os possíveis locais de desenvolvimento de erosões elaborado com a equação do limiar topográfico e expoente b fixo.



Fonte: A autora.

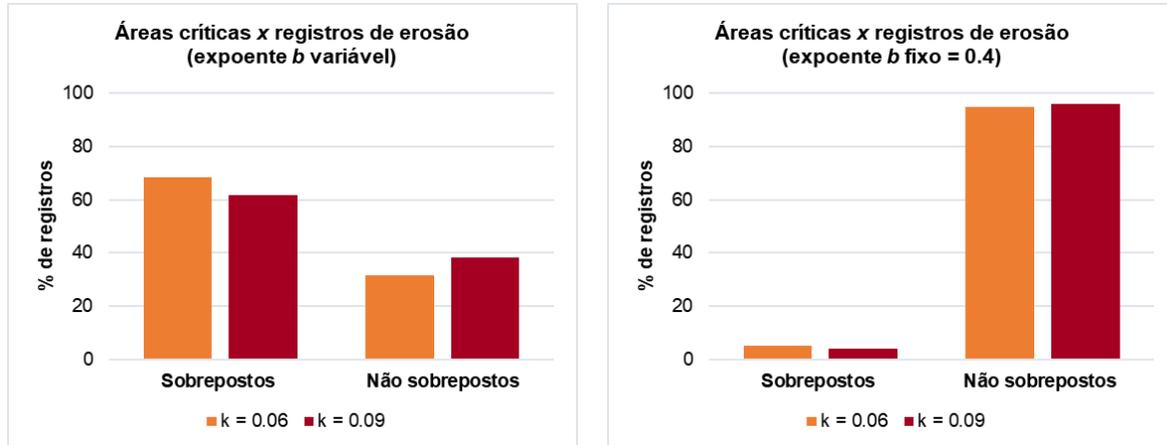
Convém ressaltar que, a classificação das áreas críticas foi realizada apenas na região das unidades do terreno C. Isto é, desconsiderou-se a região da Serra de Itaqueri, devido, principalmente, à presença de terrenos com alta declividade no sistema B. Segundo Gomes (2002), nesses locais há evidências de ocorrência de quedas de bloco e, portanto, difere do objetivo desta pesquisa.

Primeiramente, os mapas mostram que a classificação das áreas críticas é bem diferente em função do expoente b . O mapa elaborado com o expoente b variável é mais abrangente e classificou 46.3% da área da BHRM como crítica, ou seja, locais propícios para incisão de processos erosivos (Figura 59), enquanto o mapa elaborado com expoente b fixo classificou aproximadamente 2.7% de áreas críticas (Figura 60).

Comparando as áreas críticas com as erosões identificadas nas imagens de satélite do *Google Earth* de 2020, verifica-se que, aproximadamente 65% dos registros de cabeceira estão sobrepostos às áreas críticas classificadas com b variável; enquanto apenas 5% das erosões estão sobrepostas às áreas críticas para b fixo (Figura 61). Esse resultado indica que o limiar de resistência calculado com b variável conseguiu prever melhor o local de desencadeamento para o cenário de 2020. Destaca-se que esse resultado corrobora com Millares et al. (2012), que

obtiveram um percentual de correspondência de 65.3% no mapa de áreas potenciais para erosões.

Figura 61. Percentual de registros de erosão identificados na imagem de satélite de 2020 sobrepostos as áreas críticas.



Considerando que os coeficientes k obtidos foram semelhantes independentemente do valor adotado para b (Tabela 9), os mapas mostraram que o valor do expoente b interfere na representação espacial das áreas críticas. As áreas classificadas com $b = 0.4$ foram muito restritas e localizam-se ao longo dos canais de drenagem. No mapa mostrado na Figura 60, nota-se, ainda, que os pontos de cabeceira estão próximos às áreas críticas, mas não estão sobrepostos, por isso o percentual de acerto foi baixo (5%).

Em suma, esse resultado mostra que, ao calcular o limiar topográfico com expoente $b = 0.4$, o ideal é utilizar uma equação que englobe outros fatores, como o modelo desenvolvido por Torri et al. (2018). Esses autores desenvolveram um modelo incluindo outros parâmetros geotécnicos e uso do solo. Por outro lado, para a área de estudo, a classificação das áreas críticas com b variável mostrou-se favorável e, conseguiu prever de maneira satisfatória as erosões identificadas no cenário de 2020.

5.2.3 Síntese

Os resultados mostraram que os valores do coeficiente de resistência k foram relativamente iguais, ou seja, inicialmente, o valor do expoente b pareceu não afetar o valor de k , com exceção do cenário de 1972, que apresentou um resultado diferente, quando comparado com os demais cenários. Por outro lado, os mapas de áreas críticas mostraram que o valor do expoente b interfere significativamente na representação espacial.

Sendo assim, para a BHRM, a definição dos limiares topográficos com expoente b estimado se mostrou mais adequado. A proposta de Torri e Poesen (2014) pode ser adequada

para outros locais. Entretanto, para as condições da área de estudo com clima tropical e, conseqüentemente, padrões de chuva e materiais inconsolidados diferentes das condições avaliadas pelos autores, o ideal é desenvolver investigações complementares e, se possível propor um novo valor para o expoente b , de modo que este seja condizente com as características locais.

Logo, a proposição desse novo valor pode ter como base os valores obtidos nesta pesquisa, sendo $b_{1960} = 0.051$; $b_{1972} = 0.048$; $b_{1988} = 0.064$; e $b_{2010} = 0.117$, assim como os valores obtidos por outros autores no Brasil, isto é, Araújo (2011), $b = 0.376$ para canais profundos e $b = 0.443$ para canais rasos; Stabile (2013), $b = 0.084$; e Neves (2017), $b = 0.28$. Para isso, é fundamental levar em conta a escala temporal dos trabalhos e a base teórica que relaciona as características do fluxo com os valores do expoente b (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

Por fim, comparando as duas abordagens, b estimado (PATTON; SCHUMM, 1975) e b fixo (TORRI; POSEN, 2014), para a BHRM, a representação das condições mínimas de deflagração calculadas com b estimado se mostrou mais adequada, e tal fato, se fundamenta em quatro argumentos principais.

Primeiro, o MDE utilizado foi hidrologicamente consistente, compatível com a escala de aplicação do método e não apresentou muitos ruídos. Além disso, o método de delimitação da área de contribuição se mostrou eficiente e permitiu a representação conforme a superfície do terreno. Segundo, foi possível estimar k e b considerando uma linha de regressão (função potência) ajustada a partir do conjunto de dados $S \times A$. Logo, os valores obtidos para k corroboraram com outras pesquisas desenvolvidas no Brasil (STABILE, 2013; NEVES, 2017). Terceiro, ao representar espacialmente as áreas críticas considerando o método do limiar topográfico, os resultados se mostraram mais coerentes ao adotar o expoente b variável, pois foi possível representar as áreas potenciais à ocorrência da erosão.

5.3 Modelos de regressão logística

Este subcapítulo apresenta os resultados dos modelos de regressão logística P1, B2 e A2, analisados conforme os cenários de 1960, 1972, 1988 e 2010, bem como as medidas estatísticas de ajustamento e validação. Além dos modelos, este subcapítulo retrata os gráficos com os valores de probabilidade estimados pelo modelo e as cartas de suscetibilidade. Destaca-se que tanto os gráficos como os mapas foram elaborados considerando o modelo de regressão logística que apresentou o melhor desempenho estatístico.

5.3.1 Coeficientes de regressão, medidas de ajustamento e qualidade

5.3.1.1 Modelos de regressão logística (P1)

O modelo de regressão logística P1 foi desenvolvido considerando a extração de dados apenas para o ponto referente ao registro da cabeceira da erosão e sem a inclusão de pontos aleatórios no entorno dos processos erosivos. Lembrando, que, além do ponto de cabeceira, foram incluídos os pontos sem erosão ($Y = 0$), gerados de maneira aleatória em áreas consideradas estáveis, isto é, distantes dos processos erosivos. Além do mais, destaca-se que o último cenário representa o conjunto total de dados, isto é, os registros de erosão identificados nos quatro cenários, porém, nesse cenário esses registros não se repetem.

A Tabela 10 mostra a matriz de correlação apenas para as variáveis numéricas do conjunto de dados referente ao cenário de 1960. As variáveis declividade, fluxo acumulado, TWI, SPI e STI retornaram altos níveis de correlação (> 0.5) e tal fato se justifica, pois, essas variáveis são índices topográficos secundários derivados da declividade e fluxo acumulado. Nesse sentido, foi necessário remover essas variáveis do banco de dados para evitar problemas nos coeficientes de regressão.

Tabela 10. Matriz de correlação para o conjunto de dados P1 de 1960.

	Declividade	Fluxo acumulado	TWI	SPI	STI	EI₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo	-0.02	1.00				
TWI	-0.58	0.74	1.00			
SPI	0.63	0.64	0.03	1.00		
STI	0.29	0.84	0.38	0.91	1.00	
EI₃₀	0.28	0.13	-0.15	0.38	0.33	1.00

Depois de remover essas variáveis, realizou-se uma sequência de processamentos no R, para avaliar as medidas de ajustamento, como o teste de multicolinearidade. Nesse sentido, as variáveis pastagem, vegetação e sedimentos coluvionares retornaram $VIF > 10$, por isso não foram incluídas na calibração do modelo P1 (1960).

A Tabela 11 mostra os coeficientes estimados, as medidas de acurácia e previsão referente ao modelo de regressão logística P1 de 1960. Todos os coeficientes das variáveis são estatisticamente significativos, com exceção do coeficiente atribuído para a variável perfil da curvatura (côncava). Esse resultado indica que a variável em questão não tem nenhum efeito real na ocorrência da erosão, inclusive, na escala de importância, é a variável com menor valor.

Convém destacar que as variáveis foram apresentadas nas tabelas considerando a escala de importância, calculada pela função “*ImportantVariables*” no R, isto é, em nível crescente, conforme a importância.

Tabela 11. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística P1 de 1960.

Modelo de regressão logística P1 (1960)		β	P-valor	α
Intercepto		109.79	0.003	0.001
Local (encosta)		-1.56	0.000	0.000
EI ₃₀		8.87	0.003	0.001
Erosão ~ Local + EI ₃₀ + Perfil da curvatura (retilínea) + Estrada + Agrícola + Perfil da curvatura (côncava)	Perfil da curvatura (retilínea)	-2.29	0.050	0.100
	Estrada (distante)	-1.19	0.050	0.100
	Agrícola	0.01	0.070	0.100
	Perfil da curvatura (côncava)	-0.22	0.605	-
Pseudo R ² (Nagelkerke)		0.30		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)		0.23		
AUC (Área sob a curva ROC)		0.80		
Matriz de confusão: % de acerto	Treino	70%		
	Teste	70%		

As variáveis local (encosta) e índice de erosividade (EI₃₀) retornaram coeficientes altamente significativos. A variável local (encosta) obteve coeficiente β de -1.56 e, pelo fato de ser negativo indica que quando os processos erosivos ocorrem em encostas, ou seja, distante dos canais de drenagem de primeira ordem, diminui-se as probabilidades de ocorrência de erosão. De forma contrária, a variável EI₃₀ retornou um valor igual a 8.87 para o coeficiente de regressão e, pelo fato de ser positivo, indica que quando o índice de erosividade aumenta, elevam-se as probabilidades de ocorrência de $Y = 1$. Além disso, o valor do coeficiente β exponenciado para o EI₃₀ indica que essa variável tem forte impacto na ocorrência da erosão.

Considerando as medidas de ajustamento e qualidade, o modelo passou no teste de Hosmer e Lemeshow (p-valor > 0.05) e, portanto, está bem ajustado aos dados. A área sobre a curva (AUC) retornou um valor de 0.8, caracterizando o modelo com discriminação aceitável; e a taxa de acerto para as amostras de treino (70%) e teste (70%) são boas. Por fim, foi realizado o teste de multicolinearidade considerando todas as variáveis desse modelo (Tabela 12). Todas as variáveis retornaram um fator de inflação, $VIF < 10$, indicando que não existe alta correlação entre as variáveis do modelo de regressão logística P1 para o ano de 1960.

Tabela 12. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística P1 de 1960.

Variável	VIF
Estrada (distante)	5.30
Perfil da curvatura (côncava)	5.54
Local (encosta)	5.77
Agrícola	7.50
Perfil da curvatura (retilínea)	9.11
EI ₃₀	9.59

Em síntese, analisando os coeficientes de regressão e o modelo P1 (1960), as variáveis mais relevantes foram local e índice de erosividade (EI₃₀) e são condizentes com as características da BHRM, pois, nesse cenário, 60% dos pontos de erosão localizavam-se próximos aos canais de drenagem. Por outro lado, ao calibrar o modelo P1 (1960), foi necessário excluir as variáveis que representavam fatores condicionantes importantes, como pastagem, que se caracterizou como uso do solo predominante nesse ano, por conta da alta correlação com outras variáveis.

Na sequência, desenvolveu-se o modelo de regressão logística P1 para o cenário de 1972. A Tabela 13 apresenta a matriz de correlação para as variáveis independentes numéricas. De forma semelhante ao resultado obtido para o ano de 1960, excluiu-se as variáveis TWI, SPI e STI devido à alta correlação. Nesse caso, é importante ressaltar que se optou por remover essas variáveis e não a declividade e o fluxo acumulado, pois são variáveis comumente utilizadas nos modelos de predição, como o limiar topográfico.

Tabela 13. Matriz de correlação para o conjunto de dados P1 de 1972.

	Declividade	Fluxo acumulado	TWI	SPI	STI	EI ₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	0.02	1.00				
TWI	-0.57	0.74	1.00			
SPI	0.63	0.71	0.10	1.00		
STI	0.33	0.86	0.37	0.93	1.00	
EI ₃₀	0.21	0.26	-0.04	0.39	0.40	1.00

A Tabela 14 apresenta as variáveis independentes e seus respectivos coeficientes de regressão, bem com outras medidas de desempenho estatístico. Analisando as medidas de ajustamento, observa-se que o modelo está bem ajustado aos dados. A área sobre a curva (AUC) retornou um valor de 0.83 e, portanto, esse modelo é capaz de predizer com precisão a ocorrência de erosão. As taxas de acerto obtidas com a matriz de confusão são ótimas, sendo

77% para a amostra de treino e 70% para a amostra de teste. No geral, esse modelo apresentou melhor desempenho estatístico quando comparado com o modelo de regressão logística P1 para o ano de 1960.

Tabela 14. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística P1 de 1972.

Modelo de regressão logística P1 (1972)		β	P-valor	α
		Intercepto	-33.07	0.000
Erosão ~ EI ₃₀ + Transportado F.P. + Local		EI ₃₀	2.85	0.000
		Transportado F.P.	0.02	0.001
		Local (encosta)	-1.36	0.006
Pseudo R ² (Nagelkerke)			0.46	
Hosmer e Lemeshow (p-valor)			0.89	
AUC (Área sob a curva ROC)			0.83	
Matriz de confusão:	Treino		77%	
% de acerto	Teste		70%	

Com relação à significância dos coeficientes de regressão, nota-se que todos são estatisticamente significativos ao nível de 1%. Interpretando a direção dos coeficientes, a variável local (encosta) diminui a probabilidade de ocorrência de erosão, enquanto as variáveis EI₃₀ e material transportado associado à Formação Pirambóia aumentam a probabilidade de ocorrência da erosão. Esse resultado é coerente com o inventário, pois, nesse ano, a maioria das erosões foram identificadas na região dos materiais transportados (89%) e próximas aos canais de drenagem (55%).

De modo semelhante ao modelo P1 de 1960, a ausência de variáveis relacionadas com o uso do solo e relevo pode ser considerada um aspecto negativo, pois são fatores importantes na predição de processos erosivos. Convém mencionar, que essas variáveis foram removidas devido à alta correlação. Por fim, destaca-se que todas as variáveis independentes do modelo de regressão logística P1 de 1972 passaram no teste de multicolinearidade (Tabela 15).

Tabela 15. Teste de multicolinearidade para modelo de regressão logística P1 de 1972.

Variável	VIF
Local (Encosta)	6.79
Transportado F.P.	7.37
EI ₃₀	8.09

Após obter o modelo de regressão logística para o cenário de 1972, desenvolveu-se o modelo para o ano de 1988. De maneira similar aos cenários anteriores, foi necessário remover as variáveis TWI, SPI, STI devido à alta correlação com declividade e fluxo acumulado (Tabela 16). É importante ressaltar que, com base nos outros modelos, esse comportamento era esperado, porém, ao desenvolver os modelos foram incluídas todas as variáveis e a exclusão foi realizada apenas quando os resultados indicavam alta correlação e multicolinearidade ($VIF > 10$).

Tabela 16. Matriz de correlação para o conjunto de dados P1 de 1988.

	Declividade	Fluxo acumulado	TWI	SPI	STI	EI₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	0.05	1.00				
TWI	-0.62	0.73	1.00			
SPI	0.61	0.72	0.10	1.00		
STI	0.30	0.90	0.35	0.92	1.00	
EI₃₀	0.1	0.2	-0.1	0.3	0.3	1.0

O modelo de regressão logística P1 para o ano de 1988 que apresentou melhor resposta foi calibrado com as variáveis local, declividade e EI₃₀ (Tabela 17). Inicialmente, verifica-se a semelhança com o modelo P1 de 1988 em termos de efeito positivo da variável EI₃₀ na probabilidade de ocorrência de erosão, assim como o efeito negativo relacionado com a variável local (encosta). Além disso, destaca-se a importância estatística do coeficiente de regressão atribuído à variável declividade, bem como o forte impacto relacionado com essa variável na ocorrência da erosão.

Analisando as medidas de ajuste, conclui-se que o modelo está bem ajustado, conforme indica o p-valor do teste de Hosmer e Lemeshow. Além do mais, o modelo de regressão logística P1 de 1988 possui um poder de discriminação excelente ($AUC > 0.8$) e um bom percentual de acerto para a amostra de treinamento (72%). Todavia, o percentual de acerto para a amostra de validação foi relativamente baixo quando comparado com os demais modelos (61%). Por fim, destaca-se que as variáveis independentes do modelo apresentaram $VIF < 10$ (Tabela 18).

Tabela 17. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística P1 de 1988.

Modelo de regressão logística P1 (1988)		β	P-valor	α
	Intercepto	-59.03	0.00	0.000
Erosão ~ EI ₃₀ + Local + Declividade	EI ₃₀	6.38	0.00	0.000
	Local (encosta)	-1.52	0.00	0.001
	Declividade	10.01	0.04	0.050
Pseudo R ² (Nagelkerke)		0.48		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)		0.29		
AUC (Área sob a curva ROC)		0.83		
Matriz de confusão: % de acerto	Treino	72%		
	Teste	61%		

Tabela 18. Teste de multicolinearidade para modelo de regressão logística P1 de 1988.

Variável	VIF
Local (Encosta)	6.84
EI ₃₀	8.99
Declividade	9.52

Por último, foi desenvolvido o modelo de regressão logística para o ano de 2010. A matriz de correlação é apresentada na Tabela 19 e, diferentemente dos demais cenários, foram excluídas as variáveis declividade, fluxo acumulado e SPI. Essa escolha se justifica, pois, as medidas de ajustamento, como o p-valor do teste de Hosmer e Lemeshow indicaram que, para obter um bom ajuste do modelo, o melhor era manter as variáveis TWI e SPI.

Tabela 19. Matriz de correlação para o conjunto de dados P1 de 2010.

	Declividade	Fluxo acumulado	TWI	SPI	STI	EI₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	0.00	1.00				
TWI	-0.65	0.62	1.00			
SPI	0.60	0.72	0.03	1.00		
STI	0.31	0.86	0.27	0.93	1.00	
EI₃₀	0.33	0.20	-0.14	0.39	0.34	1.00

Os coeficientes de regressão, medidas de ajustamento e qualidade, referentes ao modelo de regressão logística de 2010, são apresentados na Tabela 20. Comparando com os demais modelos, foi possível incluir três novas variáveis: pastagem, urbano e material consolidado residual da Formação Pirambóia, todas com coeficiente de regressão com significância

estatística. De acordo com o Teste de Hosmer e Lemeshow, o modelo está bem ajustado aos dados (p-valor = 0.17) e possui um poder de discriminação aceitável (AUC = 0.78). A matriz de confusão retornou taxas de acerto acima de 70% e, portanto, o modelo pode ser considerado aceitável.

Analisando a direção dos coeficientes de regressão, observa-se que todas as variáveis possuem coeficientes positivos e, portanto, contribuem com o aumento da probabilidade de ocorrência da erosão. Com relação à importância das variáveis, a pastagem caracteriza-se como a mais relevante para esse cenário e essa característica possivelmente está relacionada com a predominância de erosões nessa classe do uso do solo no ano de 2010 (70%).

Tabela 20. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística P1 de 2010.

Modelo de regressão logística P1 (2010)		β	P-valor	α	
		Intercepto	-2.62	0.00	0.001
		Pastagem	0.02	0.00	0.001
Erosão ~ Pastagem + SPI + Urbano + Residual F.P.		SPI	2.25	0.00	0.010
		Urbano	0.02	0.01	0.010
		Residual F.P.	0.01	0.03	0.050
Pseudo R ² (Nagelkerke)			0.30		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)			0.17		
AUC (Área sob a curva ROC)			0.78		
Matriz de confusão: % de acerto	Treino	73%			
	Teste	74%			

Por fim, a Tabela 21 mostra os resultados do teste de multicolinearidade para as variáveis independentes do modelo de regressão logística P1 de 2010, no qual todas apresentaram VIF < 10. Desse modo, destaca-se que, apesar da necessidade de exclusão das variáveis, esse modelo apresentou um resultado satisfatório, pois contemplou variáveis relacionadas com o uso do solo, relevo e material consolidado.

Tabela 21. Teste de multicolinearidade para modelo de regressão logística P1 de 2010.

Variável	VIF
Residual FP	6.87
SPI	6.99
Urbano	7.18
Pastagem	7.89

Além dos modelos de regressão logística P1 para os cenários de 1960, 1972, 1988 e 2010, elaborou-se o modelo de regressão logística P1 geral. Considerando apenas o registro mais antigo da erosão, logo, o conjunto de dados nesse cenário foi composto por 184 erosões e 184 pontos aleatórios. De modo semelhante aos demais cenários, as variáveis com alta correlação foram removidas do conjunto de dados (Tabela 22). Nesse caso, foram excluídas as variáveis SPI, STI e TWI.

Tabela 22. Matriz de correlação para o conjunto de dados P1 geral.

	Declividade	Fluxo acumulado	TWI	SPI	STI	EI ₃₀
Declividade	1.02					
Fluxo acumulado	0.06	1.09				
TWI	-0.52	0.61	1.10			
SPI	0.51	0.62	0.20	1.02		
STI	0.35	0.71	0.44	0.92	1.05	
EI ₃₀	0.07	0.22	0.12	0.23	0.24	1.04

A Tabela 23 apresenta os coeficientes de regressão β , medidas de ajustamento e qualidade do modelo de regressão logística P1 geral. Analisando o nível de significância dos coeficientes e a importância das variáveis, conclui-se que as variáveis urbano e plano de curvatura não são relevantes para a ocorrência da erosão, pois possuem coeficientes de regressão não significativos.

Tabela 23. Coeficientes, significância atribuída às variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística P1 geral.

Modelo de regressão logística P1 (Geral)	β	P-valor	α	
	Intercepto	-1.66	0.001	0.000
	Pastagem	0.01	0.000	0.000
Erosão ~ Pastagem + Plano da curvatura (planar) + Declividade + Transportado F. P. + Urbano + Plano da curvatura (divergente)	Plano da curvatura (planar)	-1.13	0.002	0.001
	Declividade	5.22	0.009	0.001
	Transportado F. P.	0.01	0.032	0.050
	Urbano	0.01	0.139	-
	Plano da curvatura (divergente)	-0.44	0.170	-
Pseudo R ² (Nagelkerke)		0.20		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)		0.51		
AUC (Área sob a curva ROC)		0.73		
Matriz de confusão: % de acerto	Treino	68%		
	Teste	71%		

Com relação às demais variáveis, o coeficiente de regressão atribuído à pastagem, declividade e material transportado associado à Formação Pirambóia são estatisticamente significativos e mostram que essas variáveis foram relevantes para o modelo de regressão. Além do mais, pelo fato de os coeficientes serem positivos, essas variáveis aumentam a probabilidade de ocorrência de erosão.

Analisando as medidas de ajustamento e qualidade, pode-se concluir que o modelo de regressão logística P1 geral apresentou um bom ajuste aos dados. O valor da área sob a curva ROC (AUC = 0.73) indica que o modelo possui capacidade de discriminação aceitável. O percentual de acerto para a amostra de treino (68%) foi menor quando comparado com os demais modelos P1; enquanto o percentual de acerto para a amostra de validação (71%) está dentro do esperado. Enfim, a Tabela 24 mostra o resultado do teste de multicolinearidade e todas as variáveis apresentaram valores dentro do limite esperado.

Tabela 24. Teste de multicolinearidade para modelo de regressão logística P1 geral.

Variável	VIF
Transportado FP	5.14
Urbano	5.38
Declividade	5.71
Pastagem	6.06
Plano de curvatura (Divergente)	6.40
Plano de curvatura (Planar)	6.95

Em síntese, a Tabela 25 mostra os modelos de regressão logística P1 obtidos para todos os cenários. De maneira geral, as variáveis, local e EI₃₀ foram importantes para calibrar os modelos de 1960, 1972 e 1988; enquanto as variáveis associadas ao uso do solo (pastagem e urbano) e materiais inconsolidados (residual e transportado) foram incluídas na calibração dos modelos de regressão logística de 1972, 2010 e geral.

Destaca-se que os resultados para AUC, bem como o percentual de acerto para as amostras de treino e teste foram relevantes. Todavia, considerando o banco de dados inicial, variáveis importantes para o contexto da BHRM foram removidas na etapa de calibração por conta da alta correlação e/ou multicolinearidade.

Quanto ao R², convém destacar que, comparando com o modelo de regressão linear, o *pseudo* R² do modelo de regressão logística é relativamente menor e explica parcialmente a variação da variável dependente. Sendo assim, essa medida foi utilizada apenas como critério

de comparação entre os modelos; e para os cenários de 1972 e 1988, o valor do *pseudo R²* indica que as variáveis conseguiram explicar melhor a variação em Y (erosão).

Por fim, a presença de variáveis com coeficiente de regressão não significativo, nos modelos P1 de 1960 e geral, caracteriza-se como um aspecto negativo e esse fato pode estar associado com o número de observações relativamente pequeno para a aplicação da técnica de análise estatística multivariada (Tabela 6). Desse modo, em virtude dos resultados obtidos para o modelo de regressão logística P1, optou-se pela inclusão de pontos aleatórios nos modelos B2 e A2, tanto para áreas com erosão como áreas estáveis. Segundo Kennedy (2005), ao aumentar o número de observações, pode-se minimizar os problemas relacionados à multicolinearidade.

Tabela 25. Síntese dos modelos de regressão logística P1.

Cenário	Modelos de regressão logística P1	Pseudo R ²	AUC	% de acerto	
				Treino	Teste
1960	Erosão ~ Local + EI ₃₀ + Perfil da curvatura (retilínea) + Estrada + Agrícola + Perfil da curvatura (côncava)*	0.30	0.80	70	70
1972	Erosão ~ EI ₃₀ + Transportado F.P. + Local	0.46	0.83	77	70
1988	Erosão ~ EI ₃₀ + Local + Declividade	0.48	0.83	72	61
2010	Erosão ~ Pastagem + SPI + Urbano + Residual F.P.	0.30	0.78	73	74
Geral	Erosão ~ Pastagem + Plano da curvatura (planar) + Declividade + Transportado F. P. + Urbano* + Plano da curvatura (divergente)*	0.20	0.73	68	71

(*) coeficiente de regressão não significativo ao nível de 0.05

5.3.1.2 Modelos de regressão logística (B2)

Os modelos de regressão logística B2 foram desenvolvidos considerando a extração das variáveis independentes por pontos distribuídos na região do *buffer* (área de influência no entorno do registro da cabeceira) e pontos aleatórios fora dessa região. Assim como os resultados apresentados para o modelo P1, este subcapítulo descreve as características gerais dos modelos de regressão.

A Tabela 26 apresenta a matriz de correlação para o conjunto de dados B2 do ano de 1960. Conforme previsto, altos níveis de correlação foram obtidos entre variáveis SPI, STI, TWI, declividade e fluxo acumulado. De modo semelhante aos modelos P1, optou-se por remover as variáveis SPI, STI e TWI. Além disso, as variáveis que apresentam VIF > 10 também foram removidas, como plano da curvatura, material aluvionar e material coluvionar.

Tabela 26. Matriz de correlação para o conjunto de dados B2 de 1960.

	Declividade	Fluxo acumulado	SPI	STI	TWI	EI ₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	0.00	1.00				
SPI	0.40	0.78	1.00			
STI	0.13	0.86	0.94	1.00		
TWI	-0.48	0.81	0.42	0.62	1.00	
EI ₃₀	0.20	0.06	0.18	0.12	-0.10	1.00

Os coeficientes, nível de significância, medidas de ajustamento e previsão, referentes ao modelo de regressão logística B2 para o cenário de 1960, são apresentados na Tabela 27. Analisando as variáveis independentes e comparando com o modelo de regressão logística P1 (1960), destaca-se a inclusão das variáveis vegetação, declividade e fluxo acumulado, ambas com coeficientes de regressão estatisticamente mais significativos.

Tabela 27. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística B2 de 1960.

Modelo de regressão logística B2 (1960)	β	P-valor	α	
Erosão ~ Vegetação + EI ₃₀ + Local + Estrada + Fluxo acumulado + Declividade	Intercepto	-70.85	0.000	0.000
	Vegetação	-2.21	0.000	0.000
	EI ₃₀	5.48	0.000	0.000
	Local (encosta)	-0.99	0.000	0.000
	Estrada (distante)	-1.27	0.000	0.000
	Fluxo acumulado	0.56	0.006	0.001
	Declividade	1.90	0.038	0.010
Pseudo R ² (Nagelkerke)		0.30		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)		0.20		
AUC (Área sob a curva ROC)		0.80		
Matriz de confusão:	Treino	70%		
% de acerto	Teste	73%		

Pelo fato de retornarem coeficientes de regressão positivos, as variáveis declividade, fluxo acumulado e EI₃₀ aumentam a probabilidade de ocorrência da erosão, enquanto as variáveis vegetação, local (encosta) e estrada (distante) reduzem a probabilidade de ocorrência. Destaca-se, ainda, que todas as variáveis possuem importância estatística no modelo de regressão logística.

Com relação as medidas de ajustamento *pseudo* R², área sob a curva e matriz de confusão, os resultados são semelhantes àqueles obtidos para o modelo P1 (1960), com exceção

do percentual de acerto para a amostra de validação. O valor obtido para o modelo B2 foi maior (73%) e indica maiores acertos na predição de valores positivos, isto é, $Y = 1$. Por último, destaca-se que todas as variáveis independentes retornaram $VIF < 10$ (Tabela 28).

Tabela 28. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística B2 de 1960.

Variável	VIF
Fluxo acumulado	5.38
Local (encosta)	5.75
EI ₃₀	5.76
Estrada (distante)	6.05
Declividade	6.28
Vegetação	8.55

Comparando os modelos P1 e B2 para o cenário de 1960, o principal ganho consistiu na inclusão de variáveis com coeficientes de regressão estatisticamente significativos. Nesse contexto, a inclusão das variáveis vegetação, declividade e fluxo acumulado representa um resultado satisfatório. Além do mais, a escala de importância das variáveis mostrou que a vegetação representa o fator condicionante mais relevante para o modelo de regressão logística B2.

Sequencialmente, procedeu-se com as análises para o modelo de regressão logística B2 de 1972. Para esse cenário, observa-se o mesmo padrão no que se refere ao nível de correlação entre as variáveis declividade, fluxo acumulado, SPI, STI e TWI (Tabela 29). Além dessas variáveis, sedimento aluvionar, material inconsolidado residual associado à Formação Pirambóia e estrada foram removidas, pois o teste de multicolinearidade indicou altos níveis de correlação.

Tabela 29. Matriz de correlação para o conjunto de dados B2 de 1972.

	Declividade	Fluxo acumulado	STI	SPI	TWI	EI ₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	-0.04	1.00				
STI	0.06	0.89	1.00			
SPI	0.30	0.82	0.96	1.00		
TWI	-0.47	0.86	0.71	0.55	1.00	
EI ₃₀	0.13	0.16	0.22	0.23	0.02	1.00

As medidas de ajustamento e previsão do modelo de regressão logística B2 para o cenário de 1972 são apresentadas na Tabela 30. Comparando com o modelo P1 (1972), a

inclusão das variáveis plano da curvatura e fluxo acumulado representa um ganho positivo. Além disso, todas as variáveis retornaram coeficientes de regressão estatisticamente significativos (p -valor < 0.05). Assim, aumentam a probabilidade de ocorrência de erosão as seguintes variáveis: material transportado associado à Formação Pirambóia, plano da curvatura, fluxo acumulado e EI_{30} ; enquanto a variável local (encosta) reduz a probabilidade do evento.

Tabela 30. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística B2 para o cenário de 1972.

Modelo de regressão logística B2 (1972)	β	P-valor	α	
	Intercepto	-16.96	0.000	0.000
	Local (encosta)	-1.52	0.000	0.000
Erosão ~ Local + Transportado F.P. + EI_{30} + Plano da curvatura + Fluxo acumulado	Transportado F. P.	1.53	0.000	0.000
	EI_{30}	1.54	0.000	0.000
	Plano da curvatura (divergente)	0.66	0.003	0.001
	Fluxo acumulado	0.50	0.016	0.050
Pseudo R^2 (Nagelkerke)		0.33		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)		0.11		
AUC (Área sob a curva ROC)		0.80		
Matriz de confusão: % de acerto	Treino	73%		
	Teste	73%		

Analisando as medidas de ajustamento e comparando com o modelo P1 (1972), os valores do *pseudo* R^2 e AUC foram relativamente menores, entretanto, o valor obtido para a AUC ainda se enquadra na categoria discriminação aceitável (HOSMER; LEMESHOW, 2000). Todavia, as diferenças encontradas não reduzem a qualidade do modelo de regressão logística B2 (1972). Destaca-se, ainda, que o percentual de acerto para a amostra de validação foi maior: de 70% (P1) para 73% (B2). Por fim, destaca-se que os resultados obtidos para o teste de multicolinearidade se enquadram nos valores recomendados (Tabela 31).

Tabela 31. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística B2 de 1972.

Variável	VIF
Plano da curvatura (divergente)	6.38
Local (encosta)	6.49
Transportado FP	7.14
Fluxo acumulado	7.68
EI_{30}	8.27

Em suma, as variáveis mais importantes para o modelo de regressão B2 (1972) foram local (encosta) e material inconsolidado transportado associado à Formação Pirambóia; por outro lado, as menos importantes foram plano da curvatura (divergente) e fluxo acumulado. Esse resultado é relevante para interpretar a dinâmica dos processos erosivos na BHRM, pois ressalta a importância de duas variáveis associadas com a ocorrência das erosões: material inconsolidado e proximidade com os canais de drenagem (GOMES, 2002).

Na sequência, realizaram-se as análises para o conjunto de dados de 1988. A Tabela 32 mostra a matriz de correlação para as variáveis numéricas e, por conta do alto nível de correlação, as variáveis SPI, STI e TWI foram removidas do banco de dados. De modo semelhante, as variáveis EI₃₀, sedimento coluvionar e sedimento aluvionar foram removidas, pois retornaram VIF > 10.

Tabela 32. Matriz de correlação para o conjunto de dados B2 de 1988.

	Declividade	Fluxo acumulado	STI	SPI	TWI	EI₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	-0.02	1.00				
STI	0.06	0.67	1.00			
SPI	0.30	0.82	0.67	1.00		
TWI	-0.47	0.80	0.48	0.56	1.00	
EI₃₀	-0.02	0.00	-0.01	-0.01	0.00	1.00

Os resultados do modelo de regressão logística B2 para o cenário de 1988 são apresentados na Tabela 33. Primeiramente, o modelo B2 (1988) retornou valores menores para o *pseudo* R² e AUC, quando comparados com o modelo P1 (1988). Todavia, a capacidade de discriminação do modelo é aceitável. Além do mais, o percentual de acerto para a amostra de validação foi consideravelmente maior: 61% (modelo P1) para 73% (modelo B2). Por fim, verifica-se que todas as variáveis apresentaram VIF < 10 (Tabela 34).

De modo similar aos modelos anteriores, ao considerar um conjunto com maior número de observações, foi possível incluir três variáveis no modelo B2. As variáveis vegetação, plano da curvatura e fluxo acumulado foram incluídas no modelo com coeficientes de regressão estatisticamente significativo. Verifica-se, ainda, que as variáveis vegetação, local e declividade representam as mais relevantes para o modelo de regressão logística.

Tabela 33. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística B2 para o cenário de 1988.

Modelo de regressão logística B2 (1988)		β	P-valor	α	
		Intercepto	-2.65	0.00	0.000
		Vegetação	-2.23	0.00	0.000
Erosão ~ Vegetação + Local + Declividade + Fluxo acumulado + Plano da curvatura		Local (encosta)	-0.92	0.00	0.000
		Declividade	3.73	0.00	0.001
		Fluxo acumulado	0.41	0.03	0.000
		Plano da curvatura (convergente)	0.37	0.08	0.100
Pseudo R ² (Nagelkerke)			0.20		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)			0.63		
AUC (Área sob a curva ROC)			0.72		
Matriz de confusão: % de acerto	Treino		70%		
	Teste		73%		

Tabela 34. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística B2 de 1988.

Variável	VIF
Local (encosta)	4.75
Declividade	5.10
Convergente	5.28
Fluxo acumulado	5.99
Vegetação	9.15

Os valores estimados para as variáveis vegetação e local (encosta), expressos no formato logaritmo, mostram que as duas variáveis possuem efeito negativo para determinar a probabilidade de ocorrência de erosão; por outro lado, as variáveis declividade, fluxo acumulado e plano da curvatura aumentam a probabilidade de erosão. Para entender melhor o efeito dessas variáveis, pode-se considerar o valor do coeficiente β exponenciado. Sendo assim para cada mudança na unidade da declividade, aumenta-se 42.04 a probabilidade de erosão. Do mesmo modo, para cada mudança na unidade do fluxo acumulado, aumenta-se 1.51 a probabilidade de ocorrer erosão. Assim, verifica-se que o impacto causado pela variável declividade na probabilidade é consideravelmente grande.

Os próximos parágrafos descrevem os resultados do modelo de regressão logística B2 para o ano de 2010. De forma semelhante ao modelo P1 (2010), ao analisar os níveis de correlação e medidas estatísticas, optou-se por manter as variáveis SPI e TWI, bem como remover a variável fluxo acumulado (Tabela 35). Além dessa variável, por conta da multicolinearidade, foram removidas do banco de dados as variáveis STI, silvicultura, sedimento aluvionar e sedimento coluvionar.

Tabela 35. Matriz de correlação para o conjunto de dados B2 de 2010.

	Declividade	Fluxo acumulado	STI	SPI	TWI	EI₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	0.04	1.00				
STI	0.14	0.34	1.00			
SPI	0.28	0.79	0.41	1.00		
TWI	-0.35	0.74	0.15	0.40	1.00	
EI₃₀	0.19	0.14	0.12	0.24	-0.07	1.00

Quanto aos resultados do modelo de regressão logística B2 (2010), nota-se que as medidas de ajustamento e qualidade (*pseudo R²* e AUC) foram semelhantes e que esse modelo possui poder de discriminação aceitável (HOSMER; LEMESHOW, 2000). Por outro lado, os resultados de classificação para as amostras de treino e teste foram inferiores, entretanto, os valores alcançados pelo modelo B2 (2010) ainda são satisfatórios (Tabela 36).

Tabela 36. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística B2 para o cenário de 2010.

Modelo de regressão logística B2 (2010)	β	P-valor	α	
	Intercepto	-9.633	0.03	0.05
	Residual F.P.	0.982	0.00	0.001
	Pastagem	1.600	0.00	0.001
Erosão ~ Residual F.P. + Pastagem + SPI + Urbano + EI ₃₀ + Plano da curvatura (retilínea) + TWI + Plano da curvatura (divergente)	SPI	0.712	0.00	0.001
	Urbano	1.382	0.00	0.001
	EI ₃₀	2.398	0.00	0.01
	Perfil da curvatura (retilínea)	-1.003	0.01	0.01
	TWI	-0.196	0.01	0.01
	Plano da curvatura (divergente)	- 0.297	0.11	-
Pseudo R ² (Nagelkerke)		0.30		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)		0.09		
AUC (Área sob a curva ROC)		0.75		
Matriz de confusão: % de acerto	Treino	70%		
	Teste	70%		

Conforme esperado, o modelo B2 foi calibrado com outras variáveis além daquelas incluídas no modelo P1, sendo perfil da curvatura, TWI, EI₃₀ e plano da curvatura, por isso pode ser considerado mais completo. Contudo, o coeficiente atribuído à variável plano da curvatura não atingiu o nível de significância de 0.05 e, portanto, seu efeito na probabilidade não pode ser interpretado (HAIR et al. 2014). Convém destacar que, apesar de não ser

significativo, manteve-se esse coeficiente, pois ao removê-lo, o modelo não apresentou um bom ajuste aos dados.

Analisando a escala de importância das variáveis, nota-se que material residual associado à Formação Pirambóia, pastagem, SPI, urbano e EI₃₀ são as mais relevantes para o modelo B2. Além disso, as variáveis pastagem, urbano e residual associado à Formação Pirambóia possuem um efeito positivo na determinação da probabilidade de ocorrência de erosão. Esse resultado é importante, pois reflete as características encontradas para o cenário de 2010, como mostrou o inventário. Logo, é relevante mostrar que todas as variáveis independentes desse modelo alcançaram VIF < 10 (Tabela 37).

Tabela 37. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística B2 de 2010.

Variável	VIF
Divergente	5.42
Urbano	5.98
EI ₃₀	6.23
Residual F.P.	6.25
Pastagem	6.63
Retilínea	7.62
SPI	7.64
TWI	8.41

Por fim, o coeficiente de regressão da variável TWI, indica seu efeito negativo para a determinação da probabilidade da variável dependente ser igual a 1, isto é, ocorrência de erosão. O Apêndice C mostra as áreas com tendência ao acúmulo de água na BHRM e, portanto, altos valores de TWI. Todavia, deve-se destacar que a ocorrência de áreas úmidas depende também de outros fatores, como solos, clima e outras características relacionadas com o relevo (MATTIVI et al. 2019).

Para completar as análises referentes ao modelo de regressão logística B2 desenvolveu-se o modelo considerando a base de dados geral. Tendo em vista o alto nível de correlação, as variáveis SPI, STI e TWI foram removidas (Tabela 38). Além disso, por alcançarem VIF > 10, as variáveis vegetação, silvicultura, sedimento aluvionar e EI₃₀ também foram removidas. Cabe mencionar, que a escolha de remoção das variáveis teve como base as medidas de desempenho estatístico e a comparação entre modelos. Desta forma, foram selecionados os modelos com maior capacidade preditiva.

Tabela 38. Matriz de correlação para o conjunto de dados B2 geral.

	Declividade	Fluxo acumulado	SPI	STI	TWI	EI ₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	0.02	1.00				
SPI	0.27	0.67	1.00			
STI	0.20	0.83	0.76	1.00		
TWI	-0.45	0.78	0.39	0.55	1.00	
EI ₃₀	0.04	0.02	0.13	0.02	-0.02	1.00

Os resultados obtidos para o modelo de regressão logística B2 (geral) são apresentados na Tabela 39. No geral, os valores do *pseudo R²* e AUC são semelhantes, quando comparados com o modelo P1 (geral). Com relação aos resultados da matriz de confusão, para a amostra de treino, os valores são maiores, de 68 para 70%; entretanto, para a amostra de teste, os valores são menores, de 71 para 61%.

Tabela 39. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística B2 geral.

Modelo de regressão logística B2 (Geral)	β	P-valor	α	
	Intercepto	-2.61	0.000	0.000
	Sed. Coluvionar	-1.51	0.000	0.000
	Pastagem	1.01	0.000	0.000
Erosão ~ Sed. Coluvionar + Pastagem	Perfil da curvatura (retilínea)	-0.96	0.000	0.000
+ Perfil da curvatura (retilínea) + Urbano + Declividade + Fluxo acumulado + Transportado F. P. + Local + Perfil da curvatura (convexa)	Urbano	1.07	0.000	0.010
	Declividade	4.51	0.000	0.000
	Fluxo acumulado	0.55	0.000	0.000
	Transportado F.P.	0.33	0.020	0.050
	Local (encosta)	-0.24	0.060	0.100
	Perfil da curvatura (convexa)	-0.26	0.030	0.050
Pseudo R ² (Nagelkerke)		0.2		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)		0.75		
AUC (Área sob a curva ROC)		0.71		
Matriz de confusão	Treino	70%		
% de acerto	Teste	61%		

Assim como nos modelos anteriores, foram incluídas quatro variáveis no modelo de regressão logística B2 (geral), sendo: sedimento coluvionar, local, declividade e fluxo acumulado. A escala de importância das variáveis, bem como o nível de significância, mostra

que as variáveis pastagem, urbano, declividade e fluxo acumulado são muito relevantes para esse cenário, assim como sedimento coluvionar e perfil da curvatura.

Analisando a direção dos coeficientes β , pode-se concluir que pastagem, urbano, material transportado associado à Formação Pirambóia, declividade e fluxo acumulado impactam positivamente as probabilidades de ocorrer erosão. Considerando os coeficientes β exponenciados e o percentual de chance (*odds*) para a variável declividade, obtém-se um aumento expressivo na probabilidade de ocorrência de erosão (acima de 100%); enquanto para o fluxo acumulado, esse aumento corresponde a 75%. Esses valores indicam que os efeitos dessas variáveis no modelo de regressão B2 (geral) são grandes.

Por fim, a Tabela 40 mostra o resultado do teste de multicolinearidade para as variáveis do modelo de regressão logística B2 (geral). Assim, evidencia-se que não existem altos níveis de correlação entre as variáveis independentes do modelo, pois os valores encontrados para o VIF estão dentro do esperado (< 10).

Tabela 40. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística B2 geral.

Variável	VIF
Local (encosta)	4.98
Urbano	5.14
Perfil da curvatura (convexa)	5.15
Fluxo acumulado	5.24
Pastagem	5.48
Transportado F.P.	5.64
Perfil da curvatura (retilínea)	6.22
Sed. Coluvionar	7.33
Declividade	7.35

A Tabela 41 apresenta uma síntese com a descrição dos modelos de regressão logística B2. De forma geral, a calibração com o conjunto de dados B2, incluindo pontos aleatórios, favoreceu a inclusão de variáveis preditoras importantes para a BHRM, como vegetação, pastagem, urbano e fluxo acumulado.

Nesse sentido, pode-se afirmar que os modelos de regressão logística B2 são mais completos, quando comparados com os modelos P1, uma vez que foram calibrados com variáveis relacionadas ao uso do solo, material inconsolidado e relevo. Além do mais, esses resultados indicam que a dinâmica dos processos erosivos está relacionada com um conjunto de fatores condicionantes e que estes podem variar ao longo do tempo.

Outro aspecto importante consiste na inclusão da variável fluxo acumulado nos modelos B2 (1960, 1972, 1988 e geral), e todos os coeficientes obtidos indicam significativo impacto na probabilidade de ocorrência de erosão. Esse resultado corrobora com outros modelos de predição, como o limiar topográfico, e mostra a importância de considerar os efeitos do escoamento superficial na avaliação da suscetibilidade à erosão.

Tabela 41. Síntese dos modelos de regressão logística B2.

Cenário	Modelos de regressão logística B2	Pseudo R ²	AUC	% de acerto	
				Treino	Teste
1960	Erosão ~ Vegetação + EI ₃₀ + Local + Estrada + Fluxo acumulado + Declividade	0.30	0.80	70	73
1972	Erosão ~ Local + Transportado F.P. + EI ₃₀ + Plano da curvatura + Fluxo acumulado	0.33	0.80	73	73
1988	Erosão ~ Vegetação + Local + Declividade + Fluxo acumulado + Plano da curvatura	0.20	0.72	70	73
2010	Erosão ~ Residual F.P. + Pastagem + SPI + Urbano + EI ₃₀ + Plano da curvatura (retilínea) + TWI + Plano da curvatura (divergente)*	0.30	0.75	70	70
Geral	Erosão ~ Sed. Coluvionar + Pastagem + Perfil da curvatura (retilínea) + Urbano + Declividade + Fluxo acumulado + Transportado F. P. + Local + Perfil da curvatura (convexa)*	0.20	0.71	70	61

(*) coeficiente de regressão não significativo ao nível de 0.05

Destaca-se, também, a inclusão de outras variáveis relevantes, como vegetação, nos modelos B2 (1960 e 1988), mostrando que a presença de cobertura vegetal reduz a probabilidade de obter $Y = 1$ (erosão). Sendo assim, o resultado do modelo confirma a função da cobertura vegetal na proteção do solo, haja vista que reduz os efeitos da energia cinética da chuva e confere estabilidade aos agregados dos solos (GUERRA, 1998).

Com relação à inclusão das variáveis plano da curvatura nos modelos B2 (1972 e 1988) e perfil da curvatura B2 (2010 e geral), é fundamental considerar que no mesmo trecho podem ocorrer diferentes combinações de formas, condicionando sistemas complexos de escoamento superficial. Além do mais, seu efeito na erosão deve ser analisado em conjunto com outras características, como declividade e comprimento da encosta, pois atuam em conjunto entre si e com outros fatores condicionantes, como erosividade e propriedades do solo (LOLLO, 1991; GUERRA, 1998).

Contudo, considerando a resposta do modelo B2 (1988), verifica-se que as formas convergentes aumentam a probabilidade de ocorrência da erosão, pois favorecem fluxos concentrados. Por outro lado, os coeficientes de regressão alcançados pelo modelo B2 (2010 e geral) mostrou que as encostas retilíneas têm menor influência na ocorrência da erosão, pois normalmente representam áreas mais planas e suaves. De modo semelhante, ao aplicar a técnica

de regressão de logística, Bergonse e Reis (2015) constataram que a morfologia das vertentes tem significativo impacto na determinação do local de iniciação dos processos erosivos.

Convém destacar que as variáveis independentes dos modelos B2 retornaram coeficientes de regressão estatisticamente significativos ao nível de 0.05, com exceção da variável plano da curvatura para o modelo B2 (2010). Todavia, optou-se por manter essa variável para garantir um bom ajuste aos dados. Além disso, é importante ressaltar que, no geral, ao aumentar o número de observações foi possível corrigir os problemas relacionados à significância dos coeficientes e, principalmente, incluir outras variáveis preditoras.

Com relação ao poder de discriminação do modelo (AUC), os valores obtidos são semelhantes e, no geral, os modelos apresentaram um desempenho satisfatório. Por fim, para os modelos B2 (1960, 1972, 1988 e 2010), foram obtidos excelentes resultados de classificação, tanto para as amostras de treino (>70%) quanto para as de teste (>70%). Contudo, para o modelo B2 (geral), o resultado obtido para a amostra de validação foi relativamente baixo, quando comparado com os demais.

5.3.1.3 Modelos de regressão logística (A2)

Os modelos de regressão logística A2 representam a terceira configuração analisada para a aplicação da técnica de análise multivariada. Os modelos A2 foram desenvolvidos com o objetivo de testar a inclusão da área de contribuição como campo de extração das variáveis independentes. De modo semelhante ao modelo de regressão logística B2, foram incluídos os pontos aleatórios tanto na área de contribuição como na região sem presença de processos erosivos.

Posto isso, a Tabela 42 mostra a matriz de correlação para o conjunto de dados A2, referente ao cenário de 1960. Conforme esperado, as variáveis SPI, STI, TWI e fluxo acumulado apresentaram altos níveis de correlação, por isso foram retiradas do banco de dados. Além disso, foi necessário remover outras variáveis por conta da multicolinearidade (estrada, material transportado associado à Formação Pirambóia, sedimento aluvionar, vegetação, plano da curvatura e perfil da curvatura). Logo, a configuração adotada com a área de contribuição, exigiu a retirada de mais variáveis, quando comparada com as configurações P1 e B2.

Na sequência, foram desenvolvidos os modelos de regressão logística A2 para o cenário de 1960 (Tabela 43). Inicialmente, comparando com os modelos P1 e B2, contata-se uma diferença relevante em relação ao número de variáveis independentes que compõem o modelo A2. Quanto às medidas estatísticas, cabe destacar que o Teste de Hosmer e Lemeshow indica

que existem diferenças significativas entre a classificação observada e prevista. Assim, o modelo A2 não apresentou um ajuste aceitável. Além disso, os resultados alcançados pela matriz de confusão para as amostras de treino e teste foram menores (<70%). Por fim, apesar do modelo apresentar medidas estatísticas inferiores, as variáveis retornaram VIF < 10 (Tabela 44).

Tabela 42. Matriz de correlação para o conjunto de dados A2 de 1960.

	Declividade	Fluxo acumulado	SPI	STI	TWI	EI₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	0.00	1.00				
SPI	0.40	0.78	1.00			
STI	0.13	0.86	0.94	1.00		
TWI	-0.48	0.81	0.42	0.62	1.00	
EI₃₀	0.20	0.06	0.18	0.12	-0.10	1.00

Tabela 43. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística A2 de 1960.

Modelo de regressão logística A2 (1960)	β	P-valor	α	
	Intercepto	-74.45	0.000	0.000
	Local (encosta)	-0.81	0.000	0.000
Erosão ~ Local + EI ₃₀ + Declividade + Pastagem	EI ₃₀	5.93	0.000	0.000
	Declividade	1.69	0.020	0.050
	Pastagem	0.42	0.070	0.100
Pseudo R ² (Nagelkerke)		0.16		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)		0.00		
AUC (Área sob a curva ROC)		0.70		
Matriz de confusão: % de acerto	Treino	64%		
	Teste	68%		

Tabela 44. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística A2 de 1960.

Variável	Local (encosta)	Pastagem	Declividade	EI ₃₀
VIF	4.62	5.39	5.40	5.45

Para manter a coerência com o desenvolvimento dos modelos de regressão logística e a título de confirmação dos resultados, procedeu-se com as análises para os modelos A2 (1972, 1988, 2010 e geral). Assim sendo, a Tabela 45 apresenta a matriz de correlação para o conjunto de dados de 1972. De modo semelhante ao modelo anterior, muitas variáveis foram removidas por conta dos altos de níveis de correlação, bem como pelos valores de VIF > 10.

Tabela 45. Matriz de correlação para o conjunto de dados A2 de 1972.

	Declividade	Fluxo acumulado	STI	SPI	TWI	EI ₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	0.16	1.00				
STI	0.35	0.66	1.00			
SPI	0.52	0.59	0.94	1.00		
TWI	-0.51	0.59	0.25	0.11	1.00	
EI ₃₀	0.17	0.30	0.25	0.26	0.14	1.00

A Tabela 46 mostra os coeficientes de regressão β e medidas estatísticas para o modelo de regressão logística A2 (1972). Primeiramente, apesar de incluir um número interessante de variáveis independentes e retornar boas medidas estatísticas (*pseudo R²* e AUC), o modelo A2 (1972) também não apresentou um bom ajuste; e pode-se afirmar que existe uma diferença significativa entre os valores observados e previstos. Além do mais, a classificação obtida para as amostras de treino e teste foram menores.

Tabela 46. Coeficientes, significância atribuída às variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística A2 de 1972.

Modelo de regressão logística A2 (1972)	β	P-valor	α	
	Intercepto	-38.37	0.000	0.000
	Vegetação	-2.09	0.000	0.000
Erosão ~ Vegetação + Sed. Coluvionares + Local + EI ₃₀ + Plano da curvatura	Sed. Coluvionares	2.73	0.000	0.000
	Local (encosta)	-1.45	0.000	0.000
	EI ₃₀	3.10	0.000	0.000
	Plano da curvatura (convergente)	0.74	0.010	0.010
Pseudo R ² (Nagelkerke)		0.34		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)		0.04		
AUC (Área sob a curva ROC)		0.80		
Matriz de confusão: % de acerto	Treino	72%		
	Teste	69%		

Destaca-se que, possivelmente por conta da exclusão das variáveis materiais transportados e residuais associados à Formação Pirambóia, a calibração do modelo A2 (1972) resultou na inclusão da variável sedimentos coluvionares. O inventário mostrou que existem poucos processos erosivos nessa região (4%), logo, para o contexto da BHRM, essa variável não é tão relevante para a análise de suscetibilidade, pois os modelos P1 (1972) e modelo B3 (1972) foram calibrados com a variável material inconsolidado transportado associado à

Formação Pirambóia. Por último, apesar de apresentar algumas limitações, as variáveis independentes retornaram valores de VIF adequados, conforme recomendado na literatura (Tabela 47).

Tabela 47. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística A2 de 1972.

Variável	Convergente	Local (encosta)	Sed. Coluvionares	Vegetação	EI ₃₀
VIF	6.16	6.70	6.82	7.03	8.24

Sequencialmente, foram realizadas as análises para o conjunto de dados A2 (1988), como mostra a Tabela 48. As variáveis declividade, fluxo acumulado, STI, SPI e TWI apresentaram altos níveis de correlação e, portanto, foram removidas. Além do mais, conforme esperado, outras variáveis foram removidas, pois apresentaram valores para o $VIF > 10$ (pastagem, agrícola, silvicultura, vegetação, material residual associado à Formação Pirambóia, material transportado associado à Formação Pirambóia e declividade). Ou seja, os principais fatores condicionantes para o contexto a BHRM foram excluídos da etapa de calibração do modelo A2 (1988).

Tabela 48. Matriz de correlação para o conjunto de dados A2 de 1988.

	Declividade	Fluxo acumulado	STI	SPI	TWI	EI ₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	0.18	1.00				
STI	0.31	0.66	1.00			
SPI	0.68	0.52	0.87	1.00		
TWI	-0.50	0.57	0.27	-0.02	1.00	
EI ₃₀	0.13	0.28	0.19	0.17	0.13	1.00

Os coeficientes e as medidas estatísticas para o modelo de regressão logística A2 (1988) são apresentados na Tabela 49. Como descrito no parágrafo anterior, a calibração não contemplou variáveis importantes para o contexto da BHRM, como vegetação, declividade e fluxo acumulado. Apesar de apresentar um bom desempenho com relação às medidas estatísticas, o ajuste do modelo não é aceitável (Teste de Hosmer e Lemeshow), resultado esperado e condizente com os modelos A2 (1960 e 1972). Por fim, a Tabela 50 mostra o resultado obtido para o teste de multicolinearidade.

Tabela 49. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística A2 de 1988.

Modelo de regressão logística A2 (1988)		β	P-valor	α	
		Intercepto	-44.70	0.000	0.000
		Local (encosta)	-0.72	0.000	0.000
Erosão ~ Local + EI ₃₀ + Perfil da curvatura (convergente) + Perfil da curvatura + Plano da curvatura (planar)		EI ₃₀	5.03	0.000	0.000
		Plano da curvatura (convergente)	0.81	0.000	0.010
		Perfil da curvatura (convexa)	0.46	0.020	0.050
		Plano da curvatura (planar)	0.43	0.050	0.050
Pseudo R ² (Nagelkerke)			0.29		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)			0.04		
AUC (Área sob a curva ROC)			0.77		
Matriz de confusão: % de acerto	Treino	70%			
	Teste	69%			

Tabela 50. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística A2 de 1988.

Variável	Local (encosta)	Perfil da curvatura (convexa)	Plano da curvatura (planar)	Plano da curvatura (convergente)	EI ₃₀
VIF	5.28	5.47	6.20	6.03	6.52

A Tabela 51 mostra a matriz de correlação para o conjunto de dados A2, referente ao cenário de 2010. Devido aos altos níveis de correlação, foi necessário remover algumas variáveis. Além disso, o teste de multicolinearidade mostrou que outras variáveis independentes apresentaram alta correlação entre si, exigindo sua remoção do banco de dados. Assim, um número considerável de variáveis foi removido, entre elas: material transportado associado à Formação Pirambóia, material residual associado à Formação Pirambóia e declividade.

Tabela 51. Matriz de correlação para o conjunto de dados A2 de 2010.

	Declividade	Fluxo acumulado	STI	SPI	TWI	EI ₃₀
Declividade	1.00					
Fluxo acumulado	0.10	1.00				
STI	0.42	0.60	1.00			
SPI	0.25	0.64	0.88	1.00		
TWI	-0.51	0.66	0.25	0.35	1.00	
EI ₃₀	0.21	0.11	0.19	0.16	-0.03	1.00

Na sequência, a Tabela 52 mostra os coeficientes de regressão β , medidas de ajustamento e qualidade para o modelo de regressão logística A2 (2010). Apesar de incluir as

variáveis pastagem e EI₃₀, importantes para esse cenário, a calibração adotando essa configuração não possibilitou a inclusão das variáveis urbano e material residual associado à Formação Pirambóia, previstas nos modelos P1 (2010) e B2 (2010) como variáveis significativas para o ano de 2010.

Tabela 52. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística A2 de 2010.

Modelo de regressão logística A2 (2010)		β	P-valor	α	
		Intercepto	-15.72	0.000	0.000
		Pastagem	1.13	0.000	0.000
Erosão ~ Pastagem + Fluxo acumulado + EI ₃₀ + Plano da curvatura + Perfil da curvatura		Fluxo acumulado	0.88	0.000	0.000
		EI ₃₀	2.62	0.000	0.000
		Plano da curvatura (planar)	-0.74	0.000	0.000
		Perfil da curvatura (retilínea)	-0.95	0.002	0.010
Pseudo R ² (Nagelkerke)			0.20		
Hosmer e Lemeshow (p-valor)			0.00		
AUC (Área sob a curva ROC)			0.73		
Matriz de confusão: % de acerto	Treino		69%		
	Teste		61%		

Com relação às medidas de desempenho estatístico, de modo semelhante aos demais modelos, não foi possível obter um bom ajuste para o modelo A2 (2010). O teste Hosmer e Lemeshow indica que existem diferenças significativas entre os valores observados e previstos. Além disso, os resultados alcançados com a matriz de confusão não foram satisfatórios, pois o percentual de acerto tanto para a amostra de treino quanto de validação foi menor em relação aos modelos P1 e B2 (2010). Por fim, apesar dos problemas apresentados, as variáveis independentes retornaram valores de VIF < 10 (Tabela 53).

Tabela 53. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística A2 de 2010.

Variável	Pastagem	EI ₃₀	Plano da curvatura (planar)	Perfil da curvatura (retilínea)	Fluxo acumulado
VIF	4.91	4.95	5.65	6.06	6.19

Concluindo as análises referentes ao modelo de regressão logística A2, aplicou-se a técnica para o conjunto de dados geral, seguindo os mesmos critérios propostos para o modelo B2, com exceção da extração de dados para a área de contribuição. A Tabela 54 mostra os resultados da matriz de correlação para o conjunto de dados A2 (geral) e, também foi necessário remover as variáveis que apresentaram altos níveis de correlação. Do mesmo modo, variáveis

independentes, associadas ao uso do solo (pastagem e agrícola), material consolidado (transportado F.P. e residual F. P.), foram removidas por conta dos valores de VIF.

Tabela 54. Matriz de correlação para o conjunto de dados A2 geral.

	Declividade	Fluxo acumulado	SPI	STI	TWI	EI₃₀
Declividade	1					
Fluxo acumulado	0.178	1				
SPI	0.537	0.567	1			
STI	0.272	0.64	0.887	1		
TWI	-0.503	0.595	0.13	0.312	1	
EI₃₀	0.041	0.089	0.097	0.071	0.067	1

A Tabela 55 mostra os coeficientes de regressão β e as medidas estatísticas para o modelo de regressão logística A2 (geral). Inicialmente, nota-se que a calibração com o método *step model* resultou na inclusão de um número considerável de variáveis independentes, incluindo declividade e fluxo acumulado. Por outro lado, comparando com os modelos P1 e B2 para esse cenário, variáveis importantes como material transportado associado à Formação Pirambóia e uso do solo urbano não foram incluídas, podendo prejudicar a capacidade preditiva do modelo. Isso porque, no contexto da BHRM, tanto os materiais arenosos da Formação Pirambóia como o processo de ocupação urbana constituem atributos importantes na análise da suscetibilidade.

No que se refere às medidas estatísticas, o p-valor do Teste de Hosmer e Lemeshow indica que o ajuste do modelo é aceitável, porém, ao interpretar o valor da AUC verifica-se que a capacidade de discriminação do modelo em relação à curva ROC é pobre (HOSMER; LEMESHOW, 2000), isto é, o modelo não foi capaz de prever com precisão o valor da variável resposta. O percentual de acerto tanto para a amostra de treino como teste resultante da matriz de confusão foi muito baixo (58 e 60%). Além disso, comparando com os modelos P1 e B2 (*pseudo R*² = 0.20), o valor do *pseudo R*² para o modelo A2 foi expressivamente menor, confirmando que a qualidade do ajuste desse modelo é menor. Por fim, a Tabela 56 mostra o resultado do teste de multicolinearidade para as variáveis independentes do modelo A2 (geral).

Tabela 55. Coeficientes, significância atribuída as variáveis e medidas de ajustamento do modelo de regressão logística A2 geral.

Modelo de regressão logística A2 (Geral)		β	P-valor	α
	Intercepto	-4.25	0.000	0.000
	Vegetação	-0.97	0.001	0.000
	Declividade	2.447	0.000	0.000
Erosão ~ Vegetação + Declividade + Sed. Coluvionar + Silvicultura + Local (encosta) + Fluxo acumulado + Perfil da curvatura (retilínea) + Estrada (distante) + Plano da curvatura	Sed. Coluvionar	-1.79	0.000	0.000
	Silvicultura	-0.78	0.049	0.050
	Local (encosta)	-0.30	0.011	0.050
	Fluxo acumulado	0.333	0.027	0.050
	Perfil da curvatura (retilínea)	-0.53	0.016	0.050
	Estrada (distante)	-0.248	0.089	0.100
	Plano da curvatura (planar)	-0.25	0.072	0.100
	Plano da curvatura (convergente)	0.26	0.155	-
	Pseudo R ² (Nagelkerke)		0.09	
Hosmer e Lemeshow (p-valor)		0.43		
AUC (Área sob a curva ROC)		0.65		
Matriz de confusão % de acerto	Treino	58%		
	Teste	60%		

Tabela 56. Teste de multicolinearidade para o modelo de regressão logística A2 geral

Variável	VIF
Estrada (distante)	4.449
Local (encosta)	4.529
Silvicultura	4.938
Perfil da curvatura (retilínea)	5.194
Plano da curvatura (convergente)	5.310
Fluxo acumulado	5.429
Planar	5.724
Vegetação	6.175
Sed. Coluvionar	6.773
Declividade	7.795

A Tabela 57 sintetiza os modelos de regressão logística A2. De maneira geral, o principal problema identificado ao adotar a área de contribuição como campo para extração das variáveis independentes consistiu na dificuldade de obter modelos com ajuste aceitável. O teste de Hosmer e Lemeshow mostrou que, para os modelos A2 (1960, 1972, 1988 e 2010), existem diferenças significativas entre os valores observados e previstos e, portanto, não foi possível

obter um bom ajuste. Além do mais, o valor da AUC para o modelo A2 (geral) indicou que a capacidade preditiva desse modelo é pobre.

Ao analisar os modelos de regressão logística, é fundamental considerar outras medidas que explicam o ajuste geral do modelo. Essas medidas, juntamente com os coeficientes de regressão e seus respectivos níveis de significância, amparam a escolha do modelo e espera-se que esse modelo atinja ótimos níveis de qualidade. Nesse contexto, ao analisar as medidas estatísticas do modelo A2, bem como o conjunto de variáveis independentes em cada cenário, verifica-se que os níveis de qualidade são inferiores, principalmente quando são comparados ao do modelo B2.

Tabela 57. Síntese dos modelos de regressão logística A2.

Cenário	Modelos de regressão logística A2	Pseudo R ²	AUC	% de acerto	
				Treino	Teste
1960	Erosão ~ Local + EI ₃₀ + Declividade + Pastagem	0.16	0.70	64	68
1972	Erosão ~ Vegetação + Sed. Coluvionares + Local + EI ₃₀ + Plano da curvatura	0.34	0.80	72	69
1988	Erosão ~ Local + EI ₃₀ + Perfil da curvatura (convergente) + Perfil da curvatura + Plano da curvatura (planar)	0.29	0.77	70	69
2010	Erosão ~ Pastagem + Fluxo acumulado + EI ₃₀ + Plano da curvatura + Perfil da curvatura	0.20	0.73	69	61
Geral	Erosão ~ Vegetação + Declividade + Sed. Coluvionar + Silvicultura + Local (encosta) + Fluxo acumulado + Perfil da curvatura (retilínea) + Estrada (distante) + Plano da curvatura (planar) + Plano da curvatura (convergente)*	0.09	0.65	58	60

(*) coeficiente de regressão não significativo ao nível de 0.05

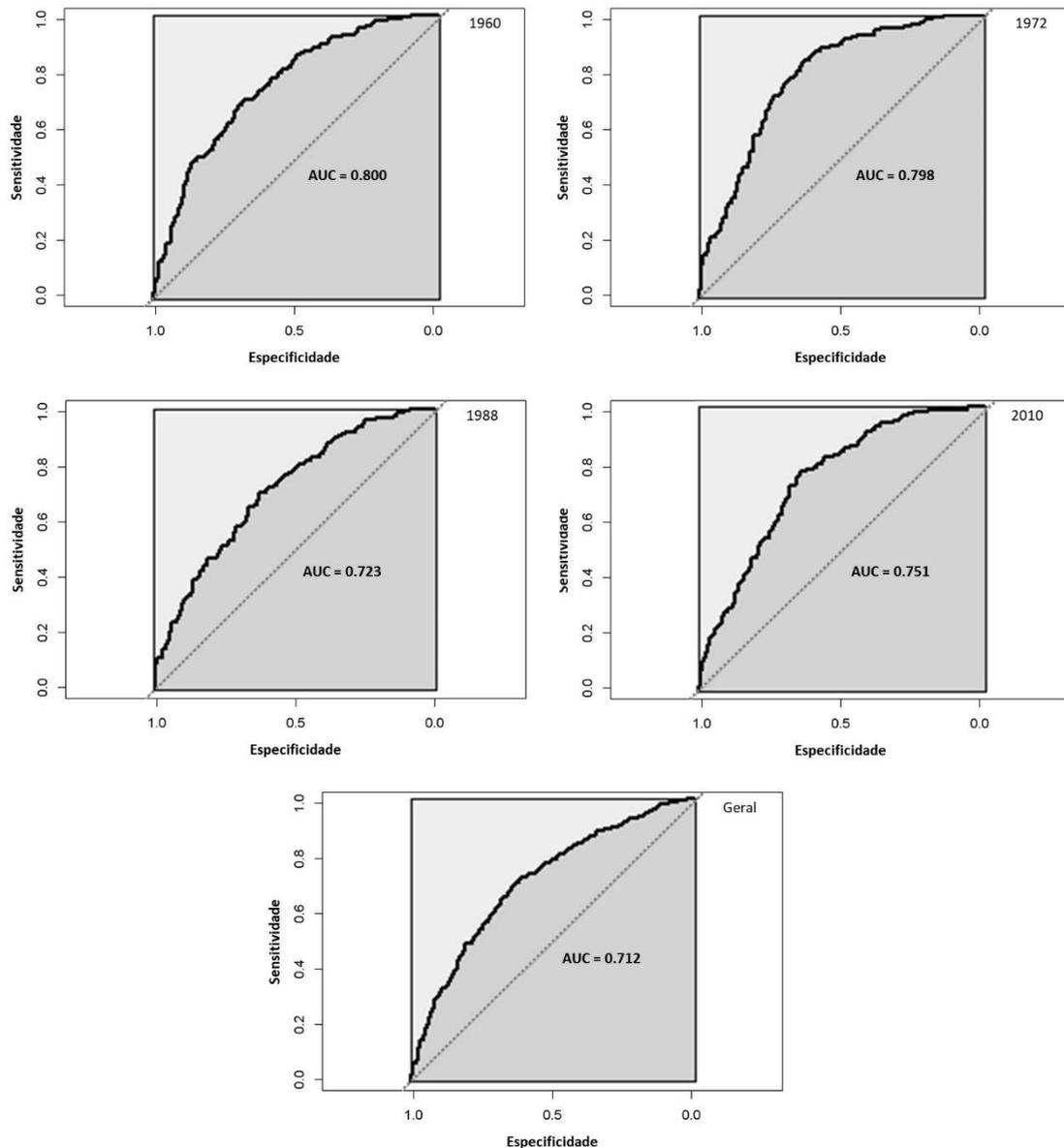
Uma possível explicação para as diferenças entre valores observados e previstos, que interferiram no ajuste do modelo A2, é a distribuição espacial dos pontos aleatórios. No *buffer* (modelo B2), os pontos estão concentrados em uma área com raio de 100 m; por outro lado, na área de contribuição (modelo A2), que apresenta uma extensão maior e muito variável, os pontos aleatórios estão localizados em porções diferentes do relevo, uso do solo e material inconsolidado, aumentando, portanto, a variabilidade das variáveis independentes (Figura 45). Dessa maneira, não foi possível ajustar a curva logística, pois o conjunto de variáveis independentes não foi capaz de maximizar a probabilidade de ocorrência do evento ($Y = 1$).

5.3.2 Análise dos modelos: variáveis independentes e probabilidade de ocorrência de erosão

Analisando os resultados dos modelos de regressão logística P1, B2 e A2, incluindo medidas de desempenho estatístico e variáveis preditoras, concluiu-se que o modelo B2

representou melhor as condições da BHRM e, além do mais, esses modelos apresentaram ajustes satisfatórios, poder de discriminação aceitável (Figura 62) e bons resultados para a classificação das amostras de treino e teste. Como mostra a Figura 62, existem pequenas diferenças entre os modelos B2, todavia, todos as performances são aceitáveis (HOSMER; LEMESHOW, 2000).

Figura 62. Curva ROC para os modelos de regressão logística B2.

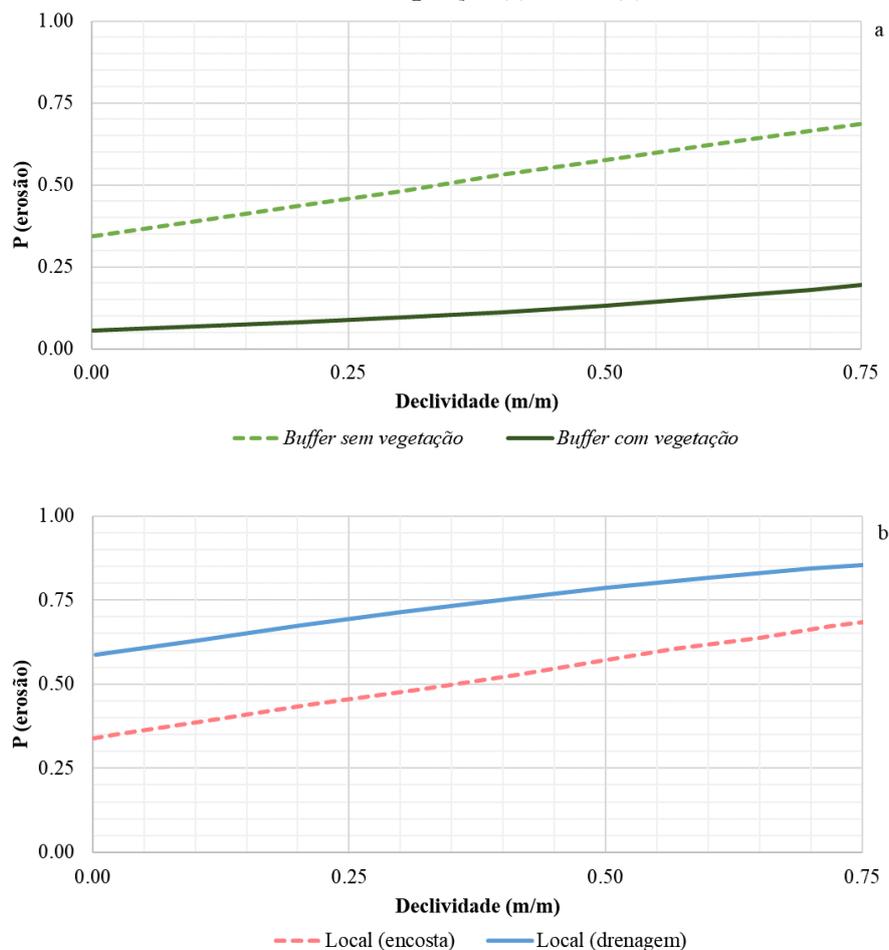


Dessa maneira, esse subcapítulo traz uma análise complementar com as variáveis independentes que tiveram maior influência na ocorrência da erosão, bem como aquelas que são relevantes para o contexto da BHRM. Sendo assim, para auxiliar na interpretação dos resultados do modelo de regressão logística B2 foram elaborados os gráficos que relacionam

essas variáveis com uma escala de probabilidade ($P_{\text{erosão}}$). De forma semelhante aos modelos de regressão logística, o texto foi elaborado considerando os cenários de 1960, 1972, 1988, 2010 e geral.

Para o ano de 1960, o modelo de regressão logística B2 mostrou que as variáveis mais influentes foram vegetação e local de ocorrência do processo erosivo (canais em encosta ou drenagem). Desse modo, a Figura 63 mostra as probabilidades calculadas em função das variáveis declividade *versus* vegetação (a) e local (b). Inicialmente, nota-se que a probabilidade de ocorrência de erosão é muito maior para as áreas sem cobertura vegetal, ou seja, áreas com solo exposto, além disso, essa probabilidade aumenta conforme a inclinação do terreno. Convém destacar que as áreas com vegetação são aquelas com vegetação arbórea ou rasteira (IBGE, 2015).

Figura 63. Valores de probabilidade estimados pelo modelo de regressão logística B2 (1960) em função da declividade \times vegetação (a) e local (b).



Logo, o modelo de regressão logística confirmou o papel da cobertura vegetal na proteção do solo contra à erosão, uma vez que reduz a quantidade de energia que chega ao solo

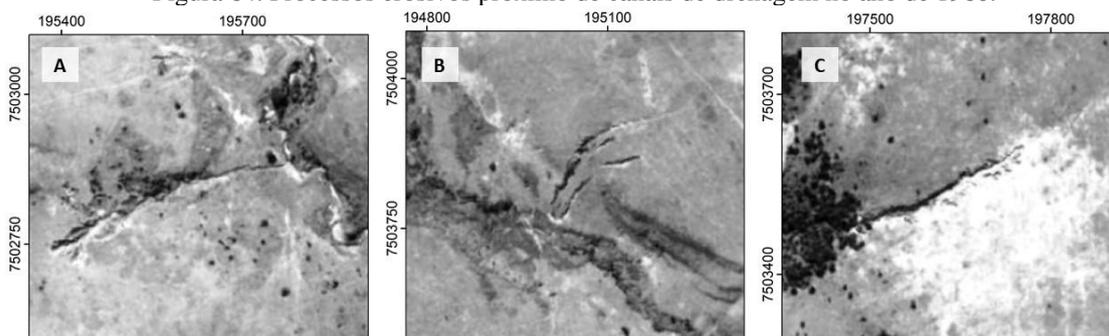
e melhora a estabilidade e teor de agregados (GUERRA, 1998). Destaca-se que Debanshi; Pal (2019), obtiveram resultados semelhantes ao aplicar a técnica de regressão logística, confirmando que a presença de vegetação pode reduzir a probabilidade de ocorrência de erosão.

Com relação ao local de ocorrência dos processos erosivos, a probabilidade é maior para feições localizadas próximas aos canais de primeira ordem. Todavia, a probabilidade para feições em encostas é mais baixa, porém, tende a aumentar conforme a inclinação do terreno e, nesse caso, convém ressaltar que o uso do solo pode influenciar tanto no desencadeamento quanto na evolução das erosões.

No que se refere à proximidade com a drenagem, os resultados obtidos corroboram com Gomes (2002). Segundo a autora citada, as áreas suscetíveis à erosão na BHRM ocorrem próximas às drenagens em terrenos com grau de inclinação superior a 10%, além do mais, as atividades antrópicas frequentemente aceleram o processo com práticas inadequadas. Assim, o gráfico da Figura 63b mostra que, para um terreno com declividade de 10% aumenta-se aproximadamente 60% a probabilidade de ocorrer erosão.

Para auxiliar na compreensão desses fatores condicionantes, as fotografias aéreas de 1960 mostram a presença de processos erosivos próximos aos canais de drenagem de primeira ordem (Figura 64). Além disso, é importante chamar a atenção para a Figura 64c, que mostra um processo erosivo próximo à drenagem, em uma região sem cobertura vegetal. A propósito, Gomes (2002) constatou que a criticidade dos processos erosivos na BHRM está relacionada com materiais arenosos, grau de inclinação dos terrenos e atividades de desmatamento.

Figura 64. Processos erosivos próximo de canais de drenagem no ano de 1960.

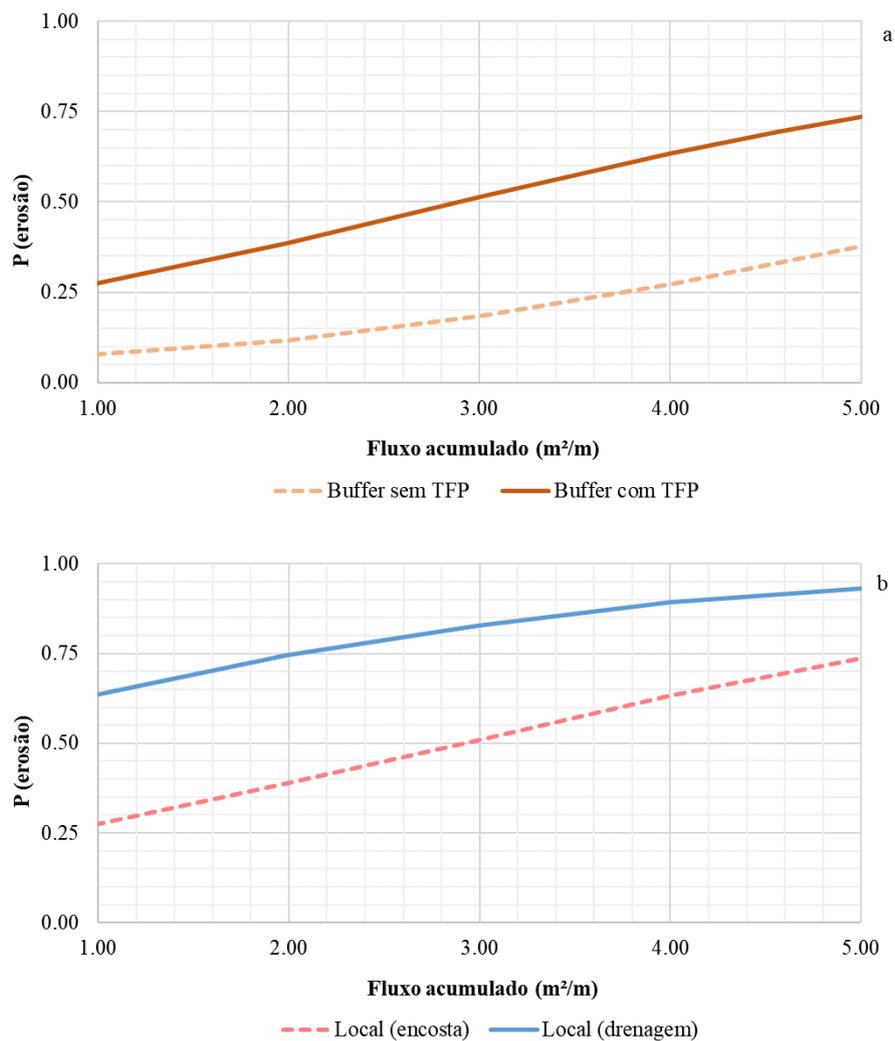


Fonte: A autora.

Para o cenário de 1972, a análise dos valores de probabilidade foi realizada considerando fluxo acumulado *versus* material inconsolidado transportado associado à Formação Pirambóia e localização da feição (Figura 65). É importante destacar que os valores do fluxo acumulado são expressos em área por unidade de contorno (*D-Infinity Contributing Area*). Desse modo, a

probabilidade de ocorrer erosão varia de 25 a 75% para os terrenos com maior concentração de fluxo e material inconsolidado transportado associado à Formação Pirambóia. Próximo dos locais onde foram registrados à cabeceira dos processos erosivos, observou-se que o fluxo acumulado é maior e, portanto, nesses locais a probabilidade de ocorrer erosão é cerca de 50% para terrenos com material inconsolidado transportado, enquanto para outros materiais inconsolidados esse valor é aproximadamente igual a 18%.

Figura 65. Valores de probabilidade estimados pelo modelo de regressão logística B2 (1972) em função do fluxo acumulado x material transportado associado à Formação Pirambóia (a) e local (b).



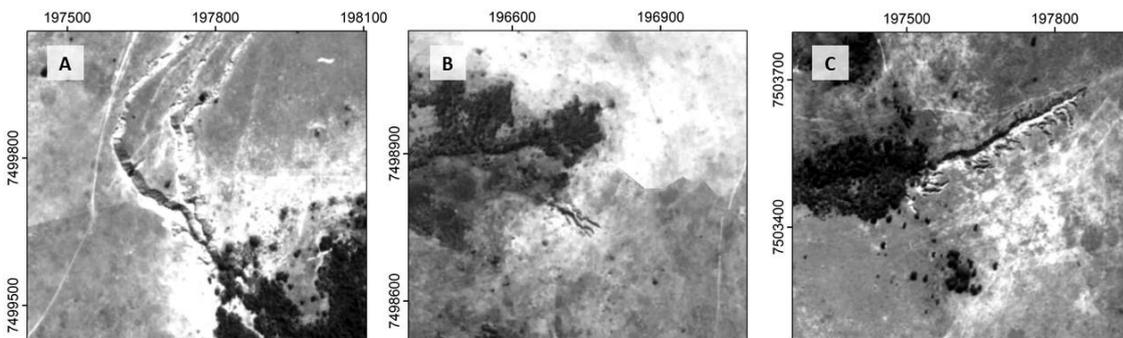
Legenda: TPF - Transportado associado à Formação Pirambóia.

Com relação ao local de ocorrência (encosta), a probabilidade é maior para erosões próximas às drenagens. Esse resultado era esperado, pois os *pixels* com os maiores valores representam as regiões com alta concentração de fluxo acumulado que, por sua vez, estão localizadas ao longo dos canais de drenagem (APÊNDICE B). Convém lembrar que os

resultados do modelo de regressão logística auxiliam na compreensão dos fatores condicionantes da BHRM e corroboram com outras pesquisas (GOMES, 2002). Por outro lado, para uma estimativa mais completa, é fundamental que sejam realizados ensaios de caracterização das propriedades hidráulicas dos materiais inconsolidados.

Por fim, a Figura 66 mostra processos erosivos nos terrenos com presença de materiais transportados associados à Formação Pirambóia e próximos aos canais de drenagem de primeira ordem. É interessante destacar que a erosão mostrada na Figura 66c corresponde à mesma feição da Figura 64c, entretanto, com um grau de evolução maior, o que se deve possivelmente às características dos materiais inconsolidados, declividade, fluxo acumulado e ausência de cobertura vegetal.

Figura 66. Processos erosivos na região dos materiais transportados associados à Formação Pirambóia no ano de 1972.



Fonte: A autora.

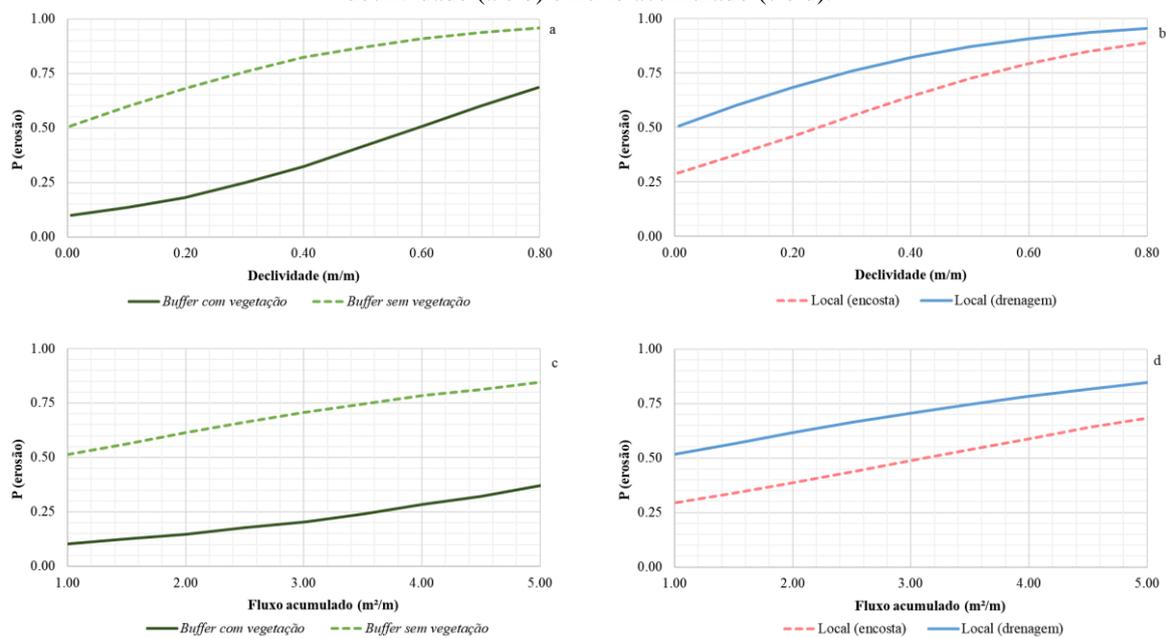
Para o cenário de 1988, a análise foi realizada considerando duas variáveis numéricas (declividade e fluxo acumulado) e duas variáveis categóricas (vegetação e local), como mostra a Figura 67. De modo semelhante ao cenário de 1960, o modelo B2 (1988) confirmou a importância da cobertura vegetal como proteção do solo contra a erosão. Conforme a Figura 67a, para terrenos com grau de inclinação de 10%, sem vegetação, a probabilidade de ocorrer erosão é de 60% e aumenta conforme a inclinação do terreno. Com relação ao fluxo acumulado, observa-se o mesmo comportamento, bem como para regiões próximas aos canais de drenagem, ou seja, com alta concentração de fluxo, a probabilidade de ocorrer erosão em terrenos sem vegetação é de 70% (Figura 67c).

Os gráficos das Figura 67b e Figura 67d, mostram a influência do local de ocorrência do processo erosivo em função da declividade e fluxo acumulado. Os valores na escala de probabilidade são maiores para as feições localizadas próximas aos canais de drenagem.

Terrenos com declividade maiores que 10% aumentam as probabilidades de erosão em canais de drenagem em 60%.

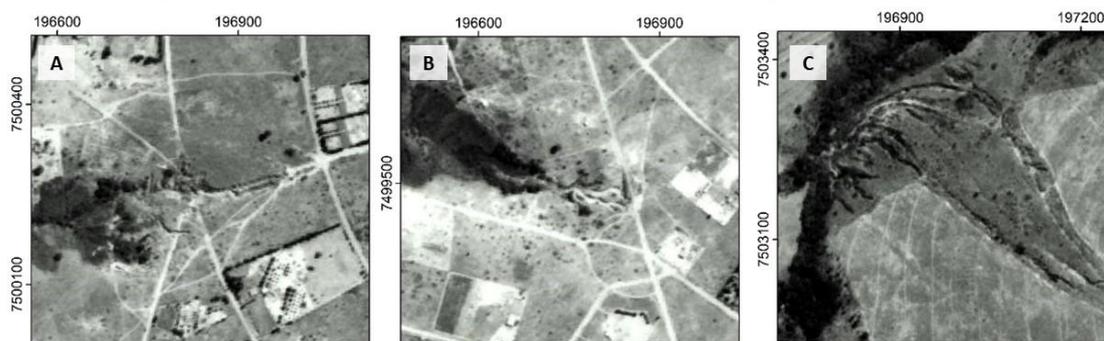
Os valores na escala de probabilidade, no que se refere às erosões localizadas em encostas nesse cenário, foram maiores e se aproximam dos valores para erosões em drenagem (Figura 67b e c). Esse fato merece atenção, pois, em 1988, 16% das erosões localizavam-se em áreas agrícolas e 22% em área urbana (Tabela 7). Desse modo, pode-se concluir que as atividades antrópicas podem ter condicionado uma mudança na dinâmica dos processos erosivos, pois aumentaram as estimativas de probabilidades para feições localizadas em encostas.

Figura 67. Valores de probabilidade estimados pelo modelo de regressão logística B2 (1988) em função da declividade (a e b) e fluxo acumulado (c e d).



Por fim, a Figura 68 mostra os processos erosivos próximos aos canais de drenagem de primeira ordem, em terrenos com inclinação entre 6 e 15%. As feições da Figura 68a e b ocorriam em locais com uso do solo urbano e, nesse caso, as práticas antrópicas inadequadas, como ausência de sistema de drenagem, podem ter condicionado a aceleração desses processos erosivos. Segundo Gomes (2002), na BHRM, as atividades antrópicas condicionaram a evolução de ravinas para voçorocas.

Figura 68. Processos erosivos próximo dos canais de drenagem no ano de 1988.



Fonte: A autora.

Para o cenário de 2010, os valores de probabilidade foram estimados considerando a variável SPI (adimensional) *versus* pastagem (Figura 69a), material inconsolidado residual associado à Formação Pirambóia (Figura 69b) e área urbana (Figura 69c). Convém destacar que os maiores valores para o SPI (APÊNDICE C) representam as áreas com declividade alta e acumulação de fluxo e, portanto, são áreas com maior potencial para o escoamento (MOORE et al., 1991).

Assim, adotando um valor médio para o SPI, para os locais com presença de pastagem, a probabilidade de ocorrer erosão aumenta em 85% (Figura 69a); para áreas com material residual associado à Formação Pirambóia, aumenta-se cerca de 70% (Figura 69b); e para áreas com uso do solo urbano, aumenta-se aproximadamente 80% (Figura 69c). Ressalta-se que esses condicionantes podem atuar em conjunto com outras características da BHRM, todavia, os valores auxiliam na compreensão dos efeitos dessas variáveis na ocorrência da erosão.

Segundo Gomes (2002), os materiais residuais associados à Formação Pirambóia são arenosos, com textura fina, e podem ser caracterizados como residual jovem (saprólito) e residual maduro (saprólítico). Essa caracterização é importante, pois, segundo a autora, o residual jovem possui baixo potencial à erosão, enquanto o residual maduro tende a ser erodível quando mais evoluídos, ou seja, no topo das camadas. Essas características, explicam a mudança na dinâmica para o cenário de 2010, pois, conforme os resultados do inventário, 30% dos processos erosivos identificados estavam localizados na região desses materiais (Figura 70c).

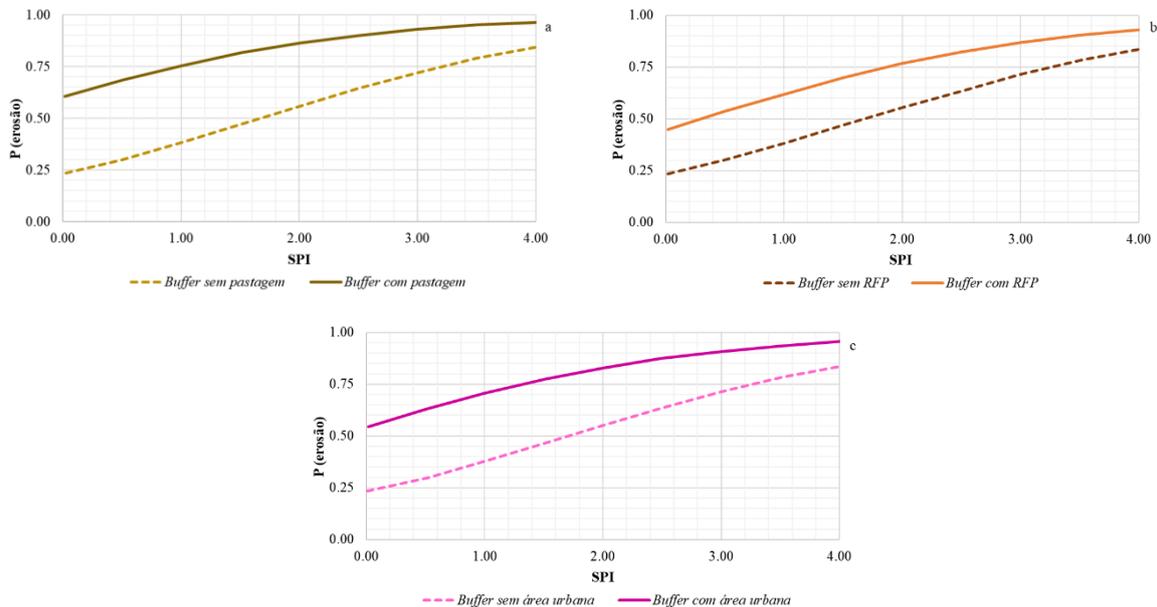
Por último, é importante destacar a influência do processo de urbanização nesse cenário.

A

Figura 70 ilustra dois processos erosivos localizados na zona urbana, fora da sede do município, denominada Alpes das Águas (PMSP, 2013). São erosões de grande porte, com alto grau de evolução. Dessa forma, pode-se concluir que o modelo de regressão logística conseguiu

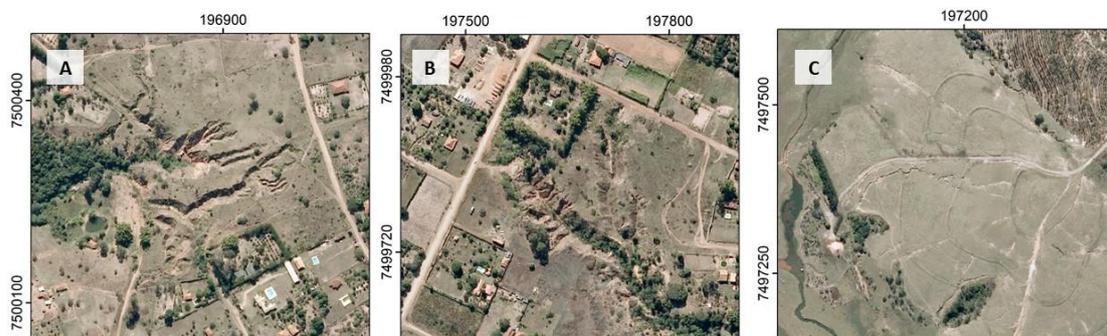
explicar tanto os fatores que condicionaram o desencadeamento como aqueles que contribuíram com a evolução dos processos erosivos.

Figura 69. Valores de probabilidade estimados pelo modelo de regressão logística B2 (2010) em função do SPI x pastagem (a), material inconsolidado residual associado à Formação Pirambóia (b) e área urbana (c).



Legenda: RFP - residual associado à Formação Pirambóia.

Figura 70. Processos erosivos identificados nas fotografias aéreas de 2010.

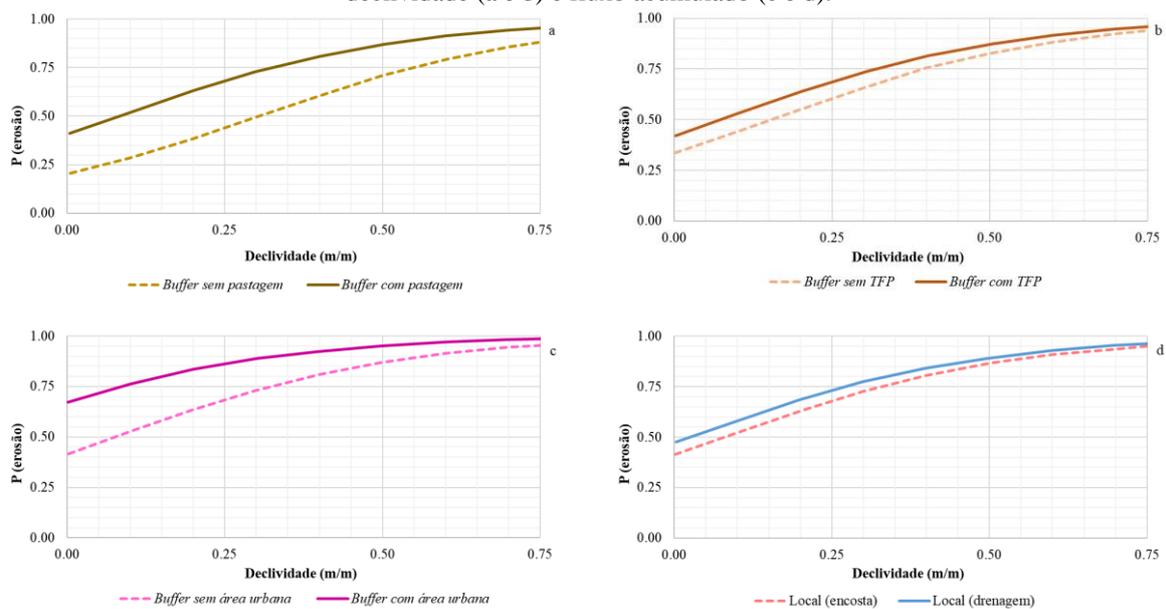


Fonte: A autora.

A Figura 71 mostra os gráficos de probabilidade, fundamentados no modelo de regressão logística B2 (geral). No geral, a diferença entre os valores na escala de probabilidade para cada categoria das variáveis independentes é pequena. A inclusão de todos os registros da BHRM nesse cenário pode explicar a diferença em relação aos demais gráficos. Dessa forma, concluiu-se, que ao incluir erosões identificadas em todos os cenários temporais (1960, 1972, 1988 e 2010), observa-se um menor efeito das categorias das variáveis independentes nos valores de probabilidade. Lembrando que, as categorias referem-se a presença ou não de determinada variável na área de influência, ou seja, *buffer*.

De modo geral, para uma região com presença de pastagem e terreno com inclinação de 10%, a probabilidade de ocorrer erosão aumenta em 50%. Considerando a mesma inclinação, entretanto, para uma região com material inconsolidado transportado aumenta-se as probabilidades em 53%, aproximadamente. Com relação à proximidade de canais de drenagem, aumenta-se a probabilidade em 58% e, por último para uso do solo urbano, espera-se um aumento de 76% na probabilidade de $Y = 1$ (erosão).

Figura 71. Valores de probabilidade estimados pelo modelo de regressão logística B2 (1988) em função da declividade (a e b) e fluxo acumulado (c e d).



Legenda: TFP - Transportado associado à Formação Pirambóia.

Assim, ao interpretar a probabilidade de erosão em função das variáveis numéricas (declividade, fluxo acumulado e SPI) e variáveis categóricas (vegetação, pastagem, urbano, local, material transportado associado à Formação Pirambóia e material residual associado à Formação Pirambóia), foi possível compreender o efeito dos fatores condicionantes na erosão. Essa análise é importante, uma vez que a dinâmica de desencadeamento e evolução depende da atuação conjunta desses fatores.

Além disso, os resultados indicaram que as ações antrópicas, como mudanças significativas no uso do solo, podem promover um desequilíbrio na dinâmica natural que, por sua vez, pode afetar, também, a capacidade preditiva dos modelos.

Em suma, os modelos de regressão logística auxiliaram na compreensão dos fatores condicionantes, principalmente nos cenários de 1960 e 1972, bem como dos fatores

relacionados com a evolução das erosões nos cenários de 1988 e 2010, pois, como mostraram as fotografias aéreas, nesses anos foram identificadas erosões de grande porte.

Os resultados obtidos corroboram com outras pesquisas realizadas na área, como Gomes (2002), e confirmam a influência do uso do solo (vegetação, pastagem e urbano), material inconsolidado (residual e transportado), local de ocorrência (principalmente proximidade aos canais de drenagem) e fatores morfométricos (declividade e fluxo acumulado) na dinâmica dos processos erosivos da BHRM.

5.3.3 Cartas de suscetibilidade à erosão

As cartas de suscetibilidade para a BHRM foram geradas com o objetivo de avaliar as mudanças que ocorreram frente à disposição dos terrenos de desenvolver processos erosivos ao longo dos quatro cenários estudados. Dessa forma, considerando os modelos de regressão logística B2, foram geradas as cartas mostradas na Figura 72. De modo geral, é possível notar diferenças com relação à variação das classes de suscetibilidade à erosão. Tal resultado se deve a quatro fatores principais: mudança na localização dos registros de erosão, valor do intercepto, coeficientes de regressão e variáveis independentes incluídas nos modelos de regressão logística.

Assim, as cartas de suscetibilidade mostram uma mudança considerável no comportamento dos terrenos diante do seu potencial de desenvolver erosão. Considerando apenas as áreas classificadas como altamente suscetíveis, nota-se uma redução significativa ao longo dos anos, 43% em 1960, 39% em 1972, 33% em 1988 e 31% em 2010 (Figura 73). Do mesmo modo, as áreas classificadas como suscetíveis também mudaram ao longo dos anos, 30% em 1960, 44% em 1972, 45% em 1988 e 53% em 2010. Convém destacar que, no geral a classificação com o método desvio padrão se mostrou adequada, pois representou bem os setores da BHRM.

Como descrito, a variação das classes de suscetibilidade nos quatro cenários se deve à mudança na dinâmica espacial dos registros, bem como às características condicionantes, relacionadas com os aspectos do meio físico e antrópico. Isto é, a classificação das áreas altamente suscetíveis na porção norte da BHRM, na carta de 1960 (Figura 72a), se deve, essencialmente, aos valores altos do índice de erosividade anual obtidos para essa região (APÊNDICE D).

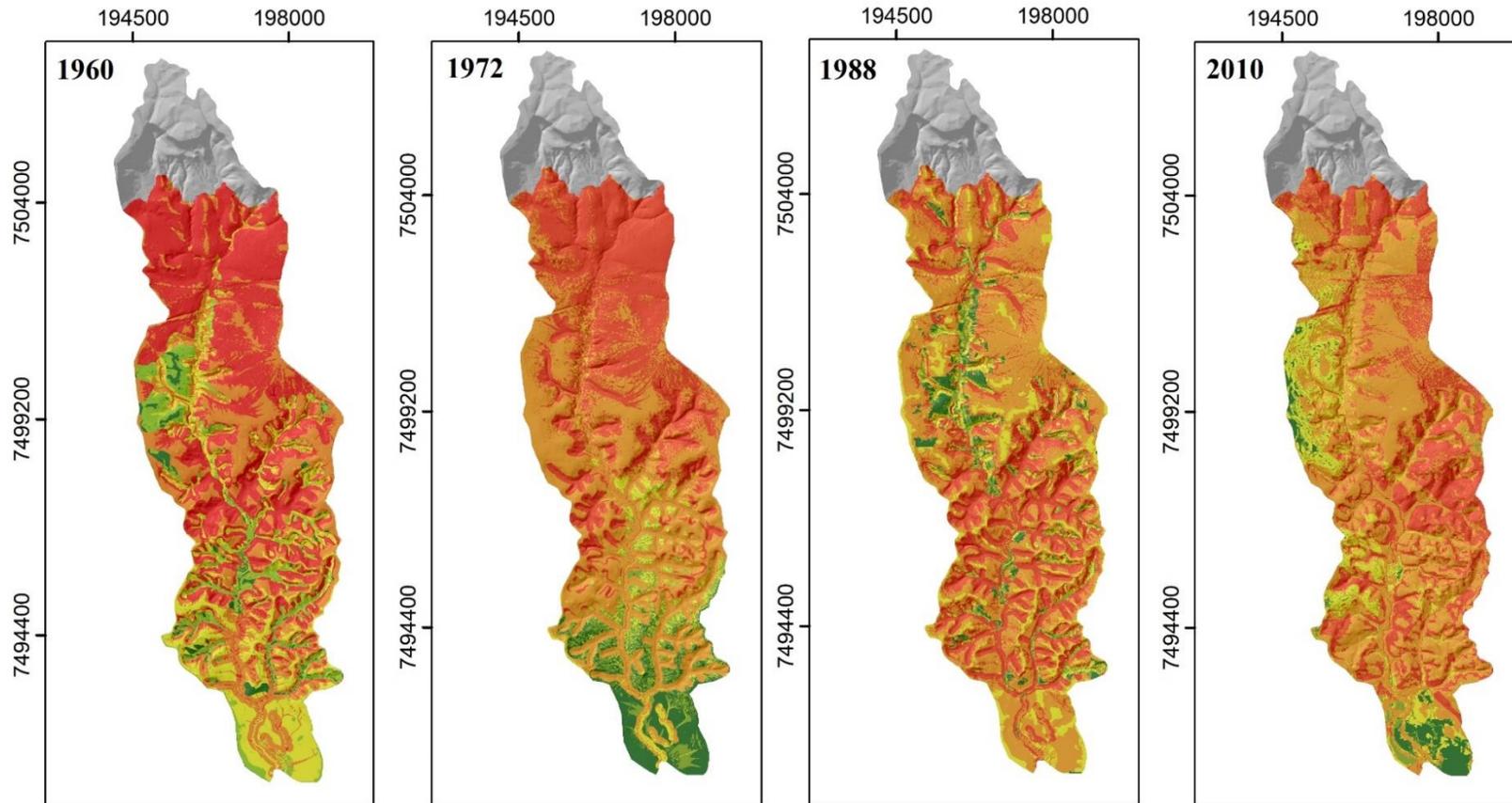
Com relação à carta de suscetibilidade (1972), ilustrada na Figura 72b, as regiões altamente suscetíveis estão relacionadas principalmente com a presença de materiais

transportados associados à Formação Pirambóia, bem como os altos valores do EI₃₀ na porção norte. A presença de áreas classificadas como altamente suscetíveis na porção sul da carta de suscetibilidade para o cenário de 1988 (Figura 72c) se deve aos coeficientes de regressão atribuídos à declividade e ao fluxo acumulado e, por isso, concentram-se nos fundos de vale. Por último, áreas altamente suscetíveis no cenário de 2010 (Figura 72d) relacionam-se principalmente com as variáveis EI₃₀, pastagem e urbano. A propósito, por conta disso, nota-se uma melhor distribuição entre as classes suscetível e altamente suscetível.

Convém destacar que as cartas foram elaboradas considerando todas as variáveis independentes dos modelos de regressão logística B2 (Tabela 41). Contudo, tal como as técnicas de ponderação de atributos, alguns fatores têm maior influência no resultado das cartas, e, no caso desta pesquisa, essa importância está relacionada com os coeficientes de regressão do modelo de regressão logística. Inclusive, nas cartas de 1960, 1972 e 1988, os canais de drenagem foram classificados como “suscetível” ou “altamente suscetível”, pois todos os modelos foram calibrados com as variáveis fluxo acumulado e local (drenagem).

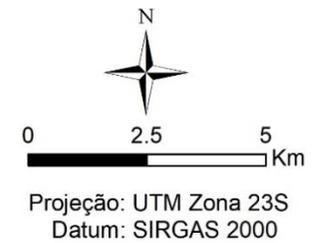
Ao comparar as cartas de suscetibilidade com os registros de erosão, obteve-se um resultado satisfatório (Figura 74) e, apesar de não ser considerado um método de validação, os resultados mostram que os modelos de regressão logística podem auxiliar na identificação dos setores da paisagem mais suscetíveis à erosão. Em todos os cenários, mais de 90% dos registros de erosão estão sobrepostos às classes suscetível e altamente suscetível.

Figura 72. Cartas de suscetibilidade à erosão elaboradas com base nos modelos de regressão logística B2.



Cartas de suscetibilidade à erosão | Modelos de regressão logística B2

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| ■ Serra de São Pedro | ■ Moderadamente suscetível |
| ■ Classes | ■ Suscetível |
| ■ Muito pouco suscetível | ■ Altamente suscetível |
| ■ Pouco suscetível | |



Fonte: A Autora.

Figura 73. Percentual de ocorrência das classes de suscetibilidade à erosão para as cartas de 1960 (a), 1972 (b), 1988 (c) e 2010 (d).

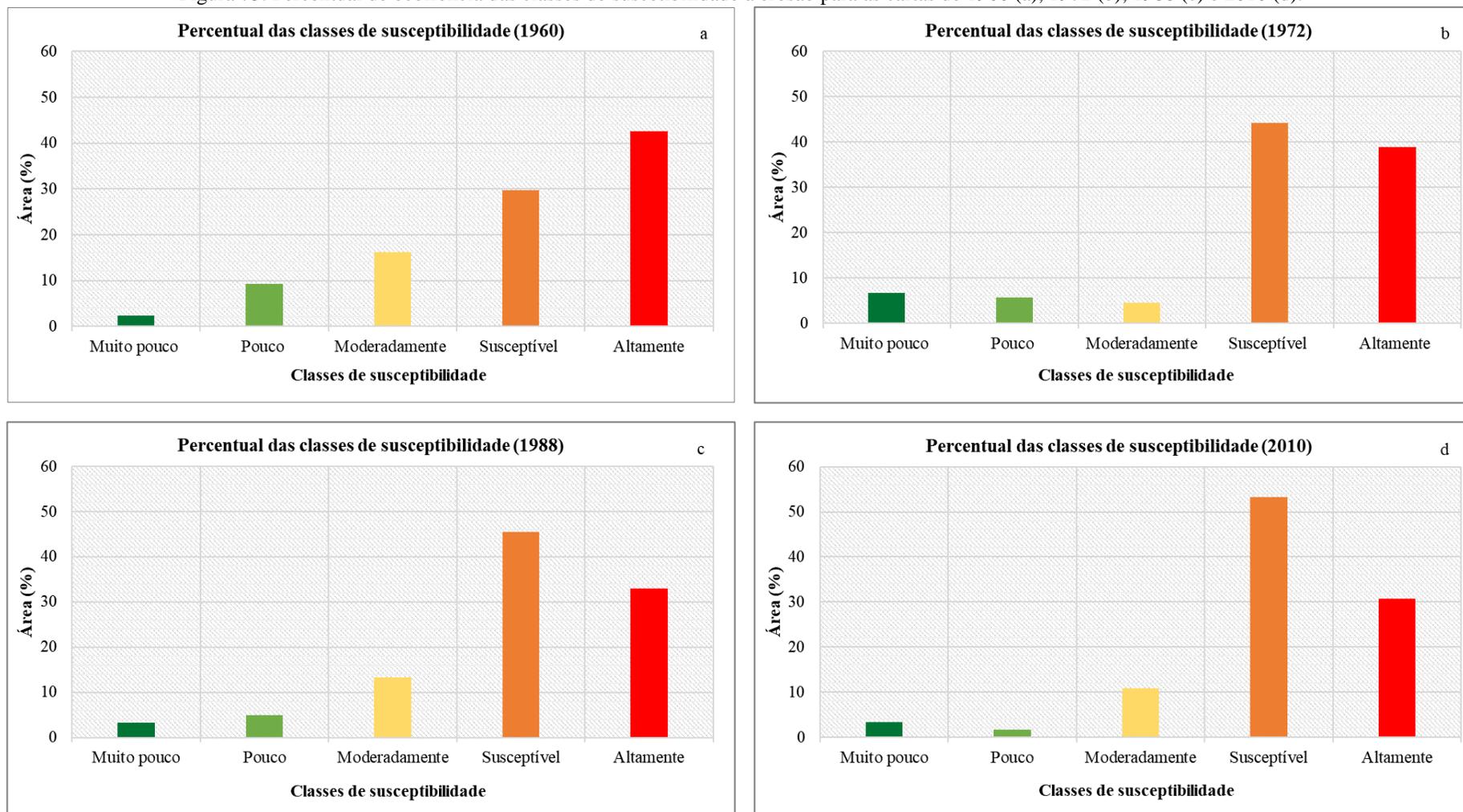
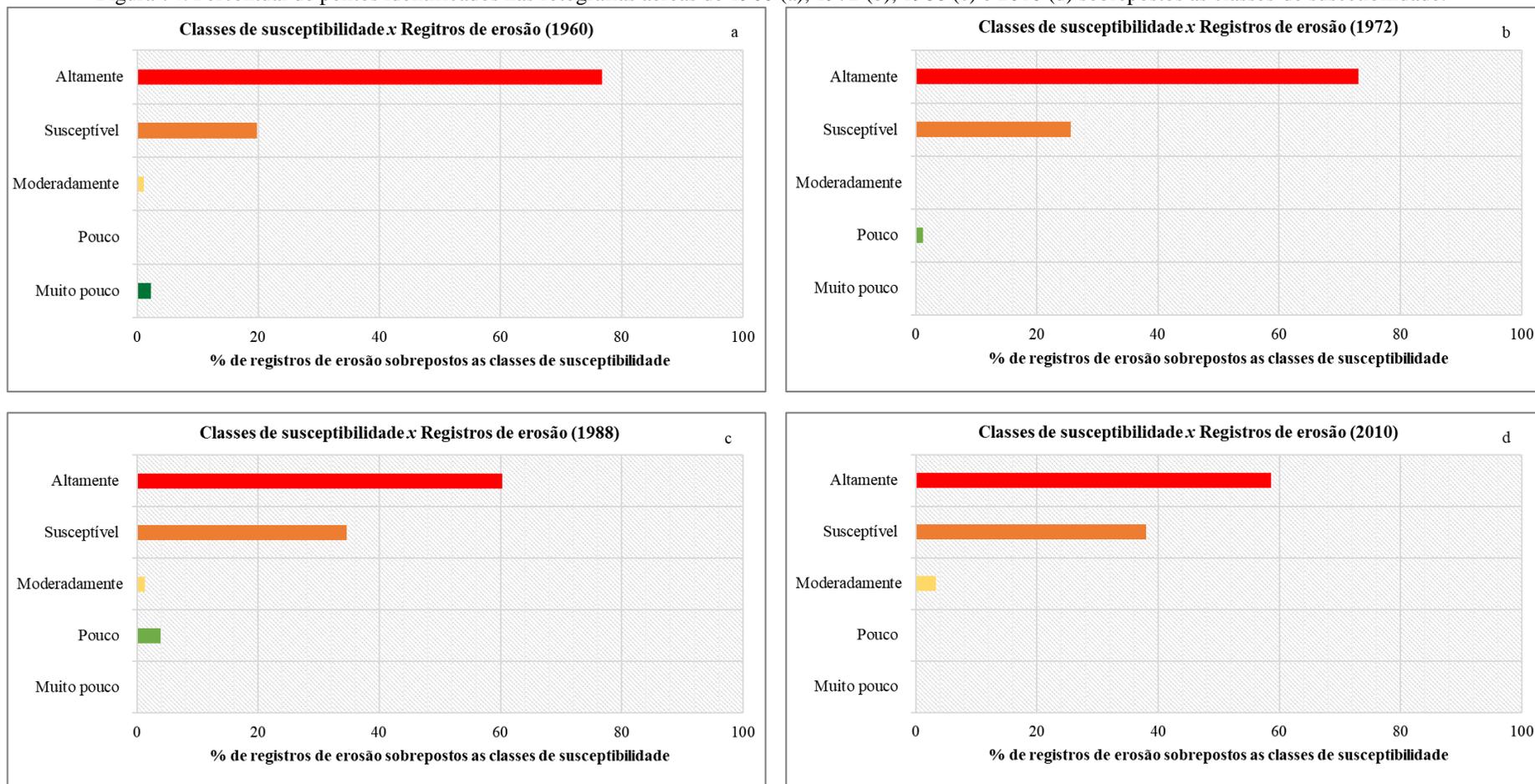


Figura 74. Percentual de pontos identificados nas fotografias aéreas de 1960 (a), 1972 (b), 1988 (c) e 2010 (d) sobrepostos as classes de suscetibilidade.



Por último, comparando as cartas de suscetibilidade geradas com os modelos de regressão logística à carta de suscetibilidade elaborada por Gomes (2002), considerando o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), verifica-se uma diferença significativa com relação ao percentual e à distribuição das áreas suscetíveis (ANEXO A). Isso se deve às técnicas utilizadas para a integração das bases temáticas, atributos considerados e cenário temporal de identificação dos registros de erosão.

A carta de suscetibilidade de Gomes (2002) parece representar essencialmente as áreas mais críticas da BHRM, isto é, terrenos fortemente inclinados ($> 20\%$), com presença de materiais inconsolidados associados à Formação Pirambóia, o que se deve aos pesos atribuídos a esses atributos. Por outro lado, as cartas elaboradas com os modelos de regressão logística compreendem as áreas críticas e áreas sob influência desses processos, de modo similar aos resultados de Gomez-Gutierrez et al. (2015).

Segundo Sobreira e Souza (2012), independentemente das técnicas e métodos utilizados, os documentos cartográficos devem representar os setores da paisagem que têm condicionantes potenciais à erosão, assim como os setores que podem ser atingidos por esses processos. Desse modo, a representação espacial das áreas sob influência dos processos erosivos é adequada, porém, dado o caráter orientativo dessas cartas, sua interpretação exige investigações complementares, pois muitas áreas podem ser apontadas como restritas à ocupação.

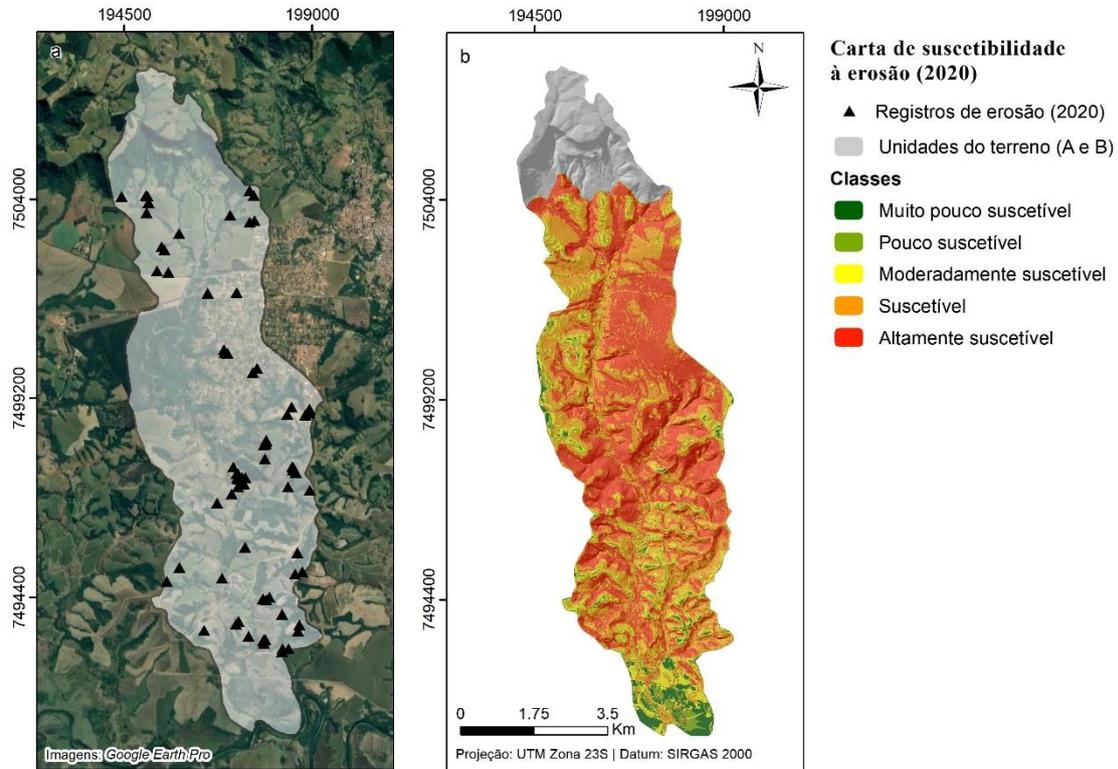
Para consolidar a avaliação do modelo de regressão logística como método para a elaboração das cartas de suscetibilidade, bem como sua capacidade de representar a disposição dos terrenos à erosão, elaborou-se a carta para o cenário de 2020 (Figura 75b). Convém ressaltar que essa carta foi gerada considerando o modelo de regressão logística B2 (geral) e, para confirmar se a delimitação das classes estava condizente com a BHRM, comparou-se a carta com os registros identificados nas imagens de satélite do *Google Earth* de 2020.

Inicialmente, destaca-se que os setores classificados como “altamente suscetível” e “suscetível” estão relacionados, principalmente, às variáveis declividade, uso do solo pastagem, urbano, material inconsolidado associado à Formação Pirambóia e fluxo acumulado. Desse modo, 43% da BHRM correspondem à classe altamente suscetível e 37% à classe suscetível (Figura 76a) e, conforme esperado, a distribuição dessas classes concentra-se na região com uso do solo urbano e pastagem.

Comparando as classes de suscetibilidade com os registros de erosão, obteve-se um percentual de 89.5%, ou seja, a maioria dos registros identificados nas imagens de satélite do *Google Earth* está sobreposta às classes suscetível e altamente suscetível. Portanto, pode-se

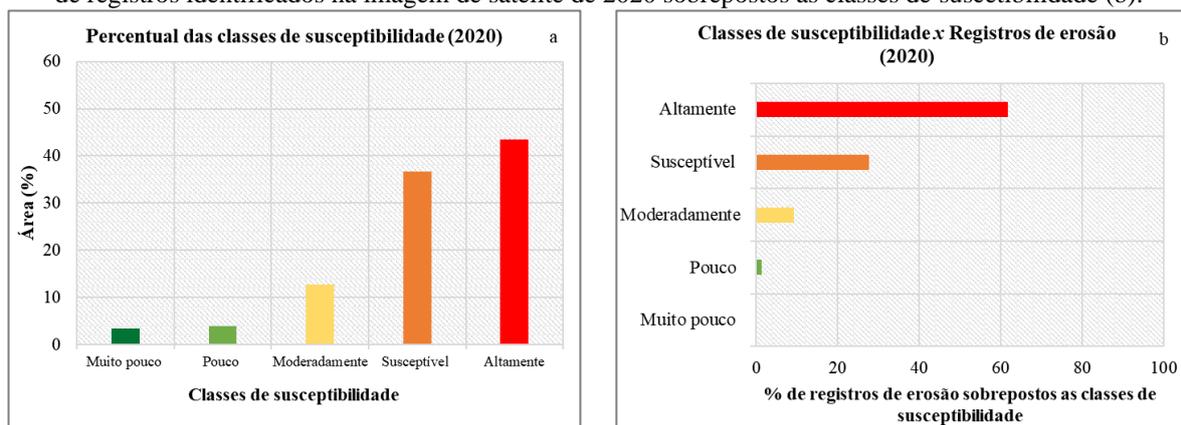
concluir que, apesar de delimitar áreas sob influência da erosão, o modelo de regressão logística foi capaz de prever os principais setores da BHRM propensos a desenvolver processos erosivos.

Figura 75. Registros de erosão identificados na imagem de satélite de 2020 (a) e carta de suscetibilidade à erosão elaborada com base nos modelos de regressão logística B2 (geral) para o cenário de 2020 (b).



Fonte: A autora.

Figura 76. Percentual de ocorrência das classes de suscetibilidade à erosão para o mapa de 2020 (a) e percentual de registros identificados na imagem de satélite de 2020 sobrepostos às classes de suscetibilidade (b).



5.3.4 Síntese

Ao aplicar a técnica de regressão logística, foi possível explicar os principais fatores condicionantes dos processos erosivos nos cenários de 1960, 1972, 1988 e 2010. Todavia, os resultados mostraram que, ao aplicar a técnica, é fundamental levar em conta o método de obtenção das variáveis independentes, pois estes influenciam consideravelmente nas medidas de desempenho estatístico dos modelos de regressão.

Além do mais, na regressão logística, o tamanho da amostra é importante (HAIR et al., 2014). Tal fato foi comprovado com os resultados do modelo P1, calibrado com algumas variáveis com coeficientes de regressão estaticamente não significativos (1960 e geral). Contudo, o principal problema foi a calibração com um número relativamente pequeno de variáveis predictoras, afetando o desempenho do modelo frente às características da BHRM.

Por outro lado, ao aumentar o número de observações e extrair variáveis, considerando como recorte a área de contribuição (modelos de regressão logística A2), não foi possível obter um ajuste aceitável e os testes estatísticos mostraram que existem diferenças significativas entre valores preditos e observados. Como descrito, esse fato possivelmente está relacionado com o tamanho das áreas de contribuição e distribuição dos pontos aleatórios.

Logo, o modelo de regressão logística B2 foi aquele que apresentou os melhores resultados para as condições da BHRM. Ao incluir os pontos aleatórios no *buffer*, foi possível aumentar o número de observações e, assim, obter um modelo com maior número de variáveis predictoras e coeficientes de regressão estatisticamente significativos. De maneira análoga, Bergonse e Reis (2015) incluíram pontos aleatórios ao aplicar a técnica de regressão logística e obtiveram bons resultados para os modelos.

Todavia, os resultados deixam em aberto uma questão fundamental para pesquisas futuras: a correção dos efeitos da multicolinearidade. Isso porque, a alta correlação entre as variáveis independentes pode afetar a precisão dos coeficientes de regressão. Nesse sentido, é fundamental desenvolver outras investigações para corrigir os efeitos da multicolinearidade e, assim, melhorar o desempenho e a robustez dos modelos. Nessa pesquisa, altos valores de VIF resultaram na exclusão de muitas variáveis independentes. Segundo Kennedy (2005), uma alternativa para minimizar esse problema é aumentar o número de observações. Porém mesmo para os modelos B2 e A2, foram obtidos altos níveis de correlação entre as variáveis independentes.

Ao aplicar o método de regressão logística na geração das cartas de suscetibilidade foi possível obter bons resultados. Ao utilizar o modelo, foi possível incluir informações básicas

mínimas, importantes para os modelos de suscetibilidade, como declividade, fluxo acumulado, materiais inconsolidados e índice de erosividade. A comparação com os registros de erosão resultou em um percentual relevante de áreas sobrepostas, acima de 90% para os modelos B2 (1960, 1972, 1988 e 2010) e 89.5% para o modelo B2 (geral). Assim, concluiu-se que as cartas de suscetibilidade à erosão representaram bem os setores suscetíveis da BHRM, ou seja, regiões com os principais fatores condicionantes, tanto naturais como antrópicos.

Esse resultado corrobora com Lucá et al. (2011) e Roy et al. (2020). Segundo os autores citados, os modelos de regressão logística tendem a apresentar um melhor desempenho quando comparados a outras técnicas e, por isso, podem ser aplicados no mapeamento da suscetibilidade à erosão. Além disso, Razavi-Termeh et al. (2020) destacam a importância da técnica de regressão logística na explicação dos fatores condicionantes.

Por último, é importante destacar a eficiência dos modelos no entendimento da dinâmica dos processos erosivos na BHRM. Ao aplicar a técnica em quatro cenários temporais, foi possível identificar os principais condicionantes e, ainda entender a sua variabilidade ao longo dos anos. Desse modo, ao interpretar os modelos de regressão logística, para os cenários de 1988 e 2010, verificou-se que os fatores antrópicos tendem a modificar a dinâmica natural, condicionando processos erosivos acelerados.

6. CONCLUSÕES

6.1 Quanto aos aspectos metodológicos

A avaliação da dinâmica dos processos erosivos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Meio, localizada em São Pedro (SP), foi fundamentada em três métodos principais: inventário, limiar topográfico ($S \times A$) e regressão logística.

O inventário de processos erosivos favoreceu o entendimento da distribuição espacial e temporal das erosões. Por meio da representação espacial dos registros temporais, realizada com o apoio das fotografias aéreas de 1960, 1972, 1988 e 2010, foi possível avaliar a evolução dos processos erosivos ao longo dos cenários analisados. A caracterização dos registros de erosão considerando a localização, materiais inconsolidados e uso do solo forneceu informações básicas necessárias à aplicação das etapas subsequentes. Portanto, o inventário de processos erosivos foi fundamental nesta pesquisa, pois as informações levantadas nessa etapa constituíram a base para a aplicação dos outros métodos (limiar topográfico e regressão logística).

O limiar topográfico, relação entre área de contribuição (A) e declividade (S), forneceu informações sobre as condições mínimas de desencadeamento dos processos erosivos. Os resultados mostraram que há uma redução das condições morfométricas, especificamente da declividade, o que pode levar muitas feições erosivas a uma condição de equilíbrio. Por outro lado, as alterações no uso do solo podem modificar a resistência do solo à erosão, e contribuir com o desenvolvimento e/ou evolução das erosões.

Comparando os resultados obtidos, quanto aos métodos para calcular k (PATTON e SCHUMM, 1975; TORRI; POSEN, 2014), concluiu-se que existem diferenças consideráveis na representação espacial das áreas críticas. Para a BHRM os melhores resultados foram obtidos ao estimar os valores de k e b . Esses resultados forneceram uma base física mais consistente para a previsão das condições de deflagração dos processos erosivos. Além disso, ao adotar b como expoente variável, foi possível entender melhor a variabilidade dos valores k em função das mudanças do uso do solo.

Por último, para complementar a base de dados acerca do limiar topográfico no Brasil, recomenda-se, em pesquisas futuras, considerar a possibilidade de estimar os valores do expoente b , adotando um valor fixo conforme proposto por Torri e Poesen (2014). Para isso, deve-se levar em conta as teorias estabelecidas para os modelos de base física. Dessa forma, será possível desenvolver modelos fundamentados nas características locais.

O uso da técnica de regressão logística binária forneceu uma série de informações a respeito da sua aplicação na avaliação da suscetibilidade à erosão. Os modelos de regressão logística conseguiram explicar a relação entre materiais inconsolidados, uso do solo, variáveis morfométricas e processos erosivos. Porém, os procedimentos aplicados mostraram que a forma de obtenção das variáveis dependentes interfere na resposta do modelo. Nesse sentido, ao comparar os modelos P1, B2 e A2, concluiu-se que é mais adequado obter as variáveis considerando uma área de influência no entorno do registro da cabeceira (*buffer*).

Os modelos de regressão logística B2 apresentaram um bom desempenho estatístico (ajuste, discriminação e precisão) e foram calibrados com variáveis independentes consistentes com as características da área estudada. Desse modo, foi possível identificar os agentes condicionantes de maior importância em cada cenário e, principalmente, concluiu-se que esses fatores são dinâmicos e podem condicionar tanto a deflagração como a aceleração dos processos erosivos. Por fim, com base no modelo de regressão logística B2, foi possível gerar as cartas de suscetibilidade, que representaram de maneira satisfatória as áreas com susceptibilidade alta à erosão.

Assim, conclui-se que o método aplicado se mostrou muito eficiente e pode ser utilizado para avaliar a suscetibilidade à erosão em outras locais. Contudo, os resultados deixam em aberto uma questão fundamental para ser investigada: a correção dos efeitos da multicolinearidade entre as variáveis independentes. Somente dessa forma será possível incluir outros atributos do meio físico e antrópico, resultando na calibração de modelos mais robustos. Nesse contexto, seria interessante aplicar os modelos em bacias hidrográficas maiores, que contemplem um maior número de registros de erosão.

6.2 Quanto à dinâmica de processos erosivos

A área estudada apresenta sérios problemas com relação às erosões lineares (sulcos, ravinas e voçorocas). A ocorrência desses processos está condicionada principalmente com as características dos materiais inconsolidados (erodibilidade alta) e uso inadequado do terreno. Essa condição crítica foi relatada por diversos autores na literatura, como Pejon (1992), Gomes (2002), Araújo (2011) e Neves (2017). Assim, os resultados obtidos nesta pesquisa corroboram com esses autores e, complementam o entendimento acerca da dinâmica dos processos erosivos.

Nos quatro cenários temporais analisados foram, identificadas e cadastradas erosões com diferentes características, sobretudo em locais com materiais inconsolidados arenosos associados à Formação Pirambóia. A partir do ano de 1960, a sistemática de investigação

adotada permitiu concluir que houve um processo evolutivo significativo, principalmente nos anos de 1988 e 2010. Os registros nesses últimos anos comprovaram que a aceleração dos processos erosivos se relaciona, principalmente, com o uso do solo urbano. No entanto, convém destacar que a substituição de área agrícola para pastagem condicionou o surgimento de sulcos em terrenos com material inconsolidado residual associado à Formação Pirambóia.

Os resultados desta pesquisa, bem como de outras investigações e produtos cartográficos disponíveis na literatura, podem auxiliar na proposição de medidas de recuperação, evitando a continuidade da degradação ambiental. Como medidas de recuperação recomenda-se, o reflorestamento das áreas mais críticas e a implantação e/ou manutenção de sistemas de drenagem, principalmente nas estradas e área de chaceamento. Além do mais, os documentos cartográficos elaborados podem subsidiar os instrumentos de planejamento, tais como o plano diretor do município de São Pedro, o zoneamento ambiental e a gestão da bacia hidrográfica (SOBREIRA; SOUZA, 2012).

Por fim, segundo Zuquette et al. (2007), para evitar ou minimizar a degradação ambiental, bem como as perdas econômicas e sociais, é fundamental que sejam elaboradas políticas criteriosas de planejamento do uso do solo, considerando as características do meio físico. Assim como os autores citados, conclui-se que a preservação ambiental sempre há de prevalecer sobre a necessidade da recuperação ambiental.

6.3 Considerações finais

Os procedimentos aplicados nesta pesquisa para avaliar a suscetibilidade a erosão linear na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Meio em São Pedro (SP) auxiliaram na compreensão dos principais fatores condicionantes associados com a deflagração e evolução desses processos. Considerando a relação entre SxA , foi possível entender os limites críticos que condicionaram o desencadeamento das erosões nos anos de 1960, 1972, 1988 e 2010. Logo, com os resultados do modelo de regressão logística, foi possível identificar outros aspectos relacionados tanto com o desenvolvimento quanto com a evolução das erosões como material inconsolidado, uso do solo e características pluviométricas.

Os documentos cartográficos produzidos representaram espacialmente as áreas críticas e suscetíveis e, foram fundamentados em diferentes atributos. Os mapas de áreas críticas (SxA) representaram apenas as áreas propícias à deflagração das erosões e as estáveis; por outro lado, as cartas de suscetibilidade elaboradas com os modelos de regressão logística possibilitaram a identificação dos setores BHRM, representados em cinco classes (muito pouco, pouco,

moderadamente, suscetível e altamente suscetível), conforme a potencialidade dos terrenos para desenvolver processos erosivos.

A metodologia aplicada para a geração das cartas de suscetibilidade à erosão proporcionou resultados muito satisfatórios e representa uma contribuição significativa para o campo da cartografia geotécnica. Por meio dos modelos de regressão logística, foi possível gerar as cartas de suscetibilidade fundamentadas nos registros de processos erosivos e atributos estatisticamente significativos para as condições analisadas da área de estudo.

Considerando a criticidade dos processos erosivos na BHRM, sobretudo a degradação ambiental, espera-se que essas cartas e outros documentos produzidos na literatura subsidiem os instrumentos de planejamento em escala regional. Esses dados podem fornecer informações essenciais para uma análise preliminar e, assim, auxiliar na interpretação das áreas adequadas e com restrições à ocupação. Enfim, cabe ressaltar que esses instrumentos devem ser fundamentados nas características do meio físico.

Assim, conclui-se que a sistemática proposta nesta pesquisa é apropriada aos estudos de eventos geodinâmicos, como a erosão linear, uma vez que as técnicas conseguiram explicar os condicionantes naturais e induzidos associados com esses processos. Por fim, destaca-se a importância de investigar os processos erosivos e entender seu caráter dinâmico, ou seja, os atributos condicionantes naturais, suas relações com as atividades antrópicas e as mudanças associadas com o uso do solo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA FILHO, G. S.; SANTORO, J.; GOMES, L. A. Estudo da dinâmica evolutiva da boçoroca São Dimas no município de São Pedro, SP. In: **Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais**, 2004, Florianópolis, Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 73-86.
- ALMEIDA, C. O. S.; AMORIN, R. S. S.; COUTO, E. G.; ELTZ, F. L.; BORGES, L. E. C. Erosive potential of rainfall in Cuiabá, MT: distribution and correlation with rainfall. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 178–184, 2011. doi: 10.1590/S1415-43662011000200011.
- AKGÜN, A.; TÜRK, N. Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: A case study from the Ayvalık region, NW Turkey. **Computers and Geosciences**, v. 37, p. 1515-1524, 2011. doi: 10.1016/j.cageo.2010.09.006
- ALVARES, A. C.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVEZ, J. L. M. Sparovek. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, = p. 711-728, 2014. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- ARABAMERI, A.; PRADHAN, B.; LOMBARDO, L. Comparative assessment using boosted regression trees, binary logistic regression, frequency ratio and numerical risk factor for gully erosion susceptibility modelling. **Catena**, v. 183, 2019. doi: 10.1016/j.catena.2019.104223.
- ARABAMERI, A.; PRADHAN, B.; REZAEI, K.; YAMANI, M.; POURGHASEMI, H. R.; LOMBARDO, L. Spatial modelling of gully erosion using evidential belief function, logistic regression, and a new ensemble of evidential belief function–logistic regression algorithm. **Land Degradation & Development**, v.29, p. 4035– 4049, 2018. doi: 10.1002/ldr.3151
- ARAÚJO, T. P. **Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro/ SP**. 2011. 181 p. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- AUGUSTO FILHO, O. Sistema de informações geográficas aplicados à engenharia ambiental. In: CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. C. **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. p. 643 - 667.
- BATER, C. W.; COOPS, N. C. Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. **Computers & Geosciences**, v. 35, 2009. doi:10.1016/j.cageo.2008.09.001

- BECKER, R. A., CHAMBERS, J. M.; WILKS, A. R. **The New S Language**. Wadsworth & Brooks: Cole, 1988.
- BEGIN, Z. B.; SCHUMM, S. A. Instability of alluvial valley floors: a method for its assessment. **Transactions of the Asae**, v.22, p. 347 – 350, 1979.
- BERGONSE, R.; REIS, E. Fatores de controlo sobre a localização de grandes complexos de ravinhas: uma análise com base em reconstrução topográfica e regressão logística. **Cadernos de Geografia**, v. 34, p. 73-84, 2015.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355 p.
- BLOOM, A. Superfície da Terra. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1970, 184 p.
- BONETTI J.; RUDORFF, F. M.; CAMPOS, A. V.; SERAFIM, M. B. Geoindicator-based assessment of Santa Catarina (Brazil) sandy beaches susceptibility to erosion. **Ocean & Coastal Management**, v. 156, p. 198-208, 2017. doi: DOI:10.1016/J.OCECOAMAN.2017.08.009
- BOZDONGAN. H. Model selection and Akaike's Information Criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. *Psychometrika*. v.52, n.3, 345-370, 1987.
- BREHENY, P.; BURCHETT, W. **Visualization of regression models**: Package 'visreg'. 2013.
- BULL, L. J.; KIRKBY, M. J. Gully processes and modelling. **Progress in Physical Geography**, v. 21, n. 3, p. 354-374, 1997.
- COLIN, C. **Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst**. ESRI: Education Services. ArcUser, p. 32-35, 2004.
- CANTALICE, J. R.; BEZERRA, S. A.; FIGUEIRA, S. B.; INÁCIO, E. S.; SILVA, M. D. Linhas isoerosivas do estado de Pernambuco - 1º Aproximação. **Revista Caatinga**, v. 22, p. 75–80, 2009.
- CAPOANE, V.; SANTOS, L. J. C.; SANTOS, D. R.; TIECHER, T. Uso de atributos topográficos para predição de áreas propensas a perda e a deposição de sedimento em uma bacia hidrográfica do planalto do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 3, p. 469-483, 2015. doi:10.20502/rbg.v16i3.733
- CARRAZZA, L. P. **Identificação de cavidades em voçorocas por meio da aplicação do método geofísico da eletrorresistividade**. 2016, 64 p. Dissertação, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 2016.

- CERRI, L.E.S. Carta Geotécnica: contribuições para uma concepção voltada às necessidades brasileiras. In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, 1990, Salvador, Anais... Salvador: ABGE, 1990, p.309-317.
- CERRI, L. E. S.; AKIOSSI, A.; AUGUSTO FILHO, O. & ZAINÉ, J. E. Cartas e mapas geotécnicos de áreas urbanas: reflexões sobre as escalas de trabalho e proposta de elaboração com o emprego do método de detalhamento progressivo. In: **Congresso Brasileiro Geologia de Engenharia**, 1996, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro: ABGE, 1996, p.537-548.
- CHENG, H.; WU, Y.; ZOU, X.; SI, H.; ZHAO, Y.; LIU, D.; YUE, X. Study of ephemeral gully erosion in a small upland catchment on the Inner-Mongolian Plateau. **Soil and Tillage Research**, v. 90, p. 184-193, 2006.
- CONFORTI, M.; AUCELI, P.; ROBUSTELI, C.; SCARCIGLIA, F. Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). **Natural Hazards**, v. 56, p. 881-898, 2011. doi: 10.1007/s11069-010-9598-2
- CONOSCENTI, C.; AGNESI, V.; ANGILERI, S.; CAPPADONIA, C.; ROTIGLIANO, E.; MÄRKER, M. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy. **Environmental Earth Sciences**, v. 70, p. 1179-1195, 2013. doi: 10.1007/s12665-012-2205-y
- CONOSCENTI, C.; ANGILERI, S.; CAPPADONIA, C.; ROTIGLIANO, E.; AGNESI, V.; MÄRKER, M. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). **Geomorphology**, v. 204, p. 399-411, 2014. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.08.021
- DAEE - Departamento de Águas e Energia. **Postos Pluviométricos**. Disponível em:> http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/CTH.Mapas/ugrhi_05/ugrhi_05_plu.html. Acesso em: jan. 2020.
- DAGGUPATI, P.; DOUGLAS-MANKIN, K. R.; SHESHUKOV, A. T. Predicting ephemeral gully location and length using topographic index models. **Transactions of the ASABE**, v. 56, p. 1427-1440, 2013. doi:10.13031/trans.56.10087
- DALGAARD, P. **Introductory Statistics with R**. Springer: New York, Second Edition, 2008.
- DANIEL, E. **Análise do papel da morfologia e do uso do solo na gênese e na distribuição de feições erosivas na Bacia do Córrego Espreado, São Pedro - SP**. 2012, 183 p. Dissertação. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

- DANTAS-FERREIRA, M. **Análise da evolução dos processos erosivos acelerados em áreas urbanas e das técnicas de controle e recuperação – Córrego do Tucum (São Pedro/SP)**. 2004. 171 p. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- DANTAS-FERREIRA, M. **Proposta de índice para processos erosivos acelerados a partir de levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico das áreas degradadas**. 2008. 447 p. Tese, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- DEBANSHI, S.; PAL, S. Assessing gully erosion susceptibility in Mayurakshi river basin of eastern India. **Environment, Development and Sustainability**, 2018. doi: 10.1007/s10668-018-0224-x.
- DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. Two-dimensional modelling of the within-field variation in rill and gully geometry and location related to topography. **Catena**, v. 29, 1997, p. 283-306.
- DEWITTE, O.; DAOUDI, M.; BOSCO, C.; EECKHAUT, M. V. D. Predicting the susceptibility to gully initiation in data-poor regions. **Geomorphology**, v. 228, p. 101-115, 2015. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.08.010
- DIETRICH, W. E.; WILSON, C.; MONTGOMERY, D. R.; ROMY BAUER, J. M. Erosion threshold and land surface morphology. **Geology**, v. 20, p.675-679, 1992.
- DIETRICH, W. E.; WILSON, J. C.; MONTGOMERY, D. R.; MCKEAN, J. Analysis of erosion threshold, channel networks, and landscape morphology using a digital elevation model. **The Journal of Geology**, v. 101, p.259-278, 1993.
- DINIZ, N. C. Cartografia geotécnica por classificação de unidades de terreno e avaliação de suscetibilidade e aptidão. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, v. 2, p. 29-77, 2012.
- ESRI. ArcMap. **How IDW works**. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>. Acesso em: mar.2019.
- ESRI. ArcMap. **Interpolation toolset**. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/topo-to-raster.htm>. Acesso em: dez/2020.
- FACINCANI, E. M. **Influência da estrutura tectônica no desenvolvimento de boçorocas da região de São Pedro/SP: proposta de reabilitação e aspectos jurídicos-institucionais correlatos**. 1995, 124 p. Dissertação, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1995.

- FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P.; SILVA, F. L.; CHAN, B. L. Regressão logística e regressão logística multinomial. In: FÁVERO, L. P.; BELFIORES, P.; SILVA, F. L.; CHAN, B. L. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009, p. 439-465.
- FERNANDES, D. O. **Erodibilidade de materiais inconsolidados da Bacia do Ribeirão Samambaia (Região de São Pedro - SP)**. 2003. 164 f. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- GAROSI, Y.; SHEKLABADI, M.; CONOSCENTI, C.; POURGHASEMI, H. R.; VAN OOST, K. Assessing the performance of GIS- based machine learning models with different accuracy measures for determining susceptibility to gully erosion. **Science of The Total Environment**, v. 664, p. 1117-1132, 2019. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.02.093.
- GAROSI, Y.; SHEKLABADI, M.; POURGHASEMI, H. R.; BESALATPOUR, A. A.; CONOSCENTI, C.; VAN OOST, K. Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping, **Geoderma**, v. 330, p. 65-78, 2018. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.05.027.
- GHOSH, A., MAITI, R. Soil erosion susceptibility assessment using logistic regression, decision tree and random forest: study on the Mayurakshi river basin of Eastern India. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, 2021. doi.org/10.1007/s12665-021-09631-5
- GLEN, S. **ROC Curve Explained in One Picture**. Disponível em: <https://www.datasciencecentral.com/profiles/blogs/roc-curve-explained-in-one-picture>. Acesso em: dez. 2019.
- GOMES, D. M. **Mapeamento geológico-geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na Bacia do Córrego Ribeirão do Meio, região de São Pedro/SP, na escala 1:20.000**. 2002. 242 f. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- GÓMEZ-GUTIÉRREZ, A.; CONOSCENTI, C.; ANGILERI, S. E.; ROTIGLIANO, E.; SCHNABEL, S. Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: advantages and limitations. **Natural Hazards**, v. 79, p. 291-314, 2015. doi: 10.1007/s11069-015-1703-0
- GÓMEZ-GUTIÉRREZ, A.; SCHNABEL, S.; CONTADOR, F. L. 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, p. 535-550, 2009a.

- GÓMEZ-GUTIÉRREZ, A.; SCHNABEL, S.; FELICÍSIMO, A. M. Modelling the occurrence of gullies in rangelands of southwest Spain. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, p. 1894-1902, 2009 b. doi:10.1002/esp.1881
- GONÇALVES, F. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CARVALHO, D. F.; CRUZ, E.S. Indices and spatialization of rainfall erosivity in Rio de Janeiro State, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 269–276, 2006. doi:10.1590/ S1415-43662006000200003
- GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA; A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998, p. 149 - 199.
- GUIMARÃES, C. N. **Mapeamento geotécnico da Bacia do Córrego da Barra, aplicação do penetrômetro de impacto em estudos de processos erosivos, São Pedro - SP - Escala 1:10.000**. 2008, 104 p. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Multivariate data analysis**. London: Pearson, 2014.
- HANCOCK, G.; EVANS, K. Gully, channel and hillslope erosion - an assessment for a traditionally managed catchment. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 35, p. 1468-1479, 2010. doi.org/10.1002/esp.2043
- HAWKINS, R. H.; WARD, T. J.; WOODWARD, D. E.; VAN MULLEM, J. A. **Curve Number Hydrology: State of practice**. ASCE Library: Virginia, 2009.
- HAYAS, A.; POESEN, J.; VANWAALLEGHEM, T. Rainfall and Vegetation Effects on Temporal Variation of Topographic Thresholds for Gully Initiation in Mediterranean Cropland and Olive Groves. **Land Degradation & Development**, v. 28, p. 2540-2552, 2007. doi:10.1002/ldr.2805
- HEMBRAM, T.K., PAUL, G.C.; SAHA, S. Spatial prediction of susceptibility to gully erosion in Jainti River basin, Eastern India: a comparison of information value and logistic regression models. *Model. Modeling Earth Systems and Environment*, v. 5, p. 689–708, 2019. DOI: 10.1007/s40808-018-0560-8
- HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences**, v. 32, p. 1283-1298, 2006. doi: 10.1016/j.cageo.2005.11.008
- HICKMANN, C.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A.; COGO, C. M. Rainfall erosivity in Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Brazil from 1963 to 1991 determined by the EI30 index.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 825–831, 2008. doi:10.1590/S0100-06832008000200035

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 56, 1945, p. 275–370.

HOSMER, D. W.; LEMESCHOW, S. **Applied Logistic Regression**. 2 ed. New York: Wiley, 2000.

HUDSON, N. **Soil conservation**. New York: Cornell University Press, 1977, 320p.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v.106, p. 211-232, 1989.

IAEG - International Association of Engineering Geology. Commission on Engineering Geological Maps. **Guide pour la préparation des cartes géotechniques**. IAEG/UNESCO. Les Presses de l'Unesco. Paris, 1976.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidade**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-pedro/panorama>. Acesso em: jan. 2020.

_____. **Mudanças na cobertura e uso da terra**. IBGE: Rio de Janeiro, 2015, 45p.

IG - Instituto Geológico. **Subsídios do meio físico-geológico ao planejamento do município de Campinas (SP)**. Relatório de Integração: Volume I. São Paulo: IG, 1993, 85 p.

IGC - Instituto Geográfico e Cartográfico. **Plano cartográfico do Estado de São Paulo**. Coordenadoria de ação regional; Divisão de Geografia. Escala: 1.10.000, São Paulo, 1979.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Diagnóstico e recomendações sobre a boçoroca do Córrego Tucum, município de São Pedro, SP**. São Paulo: IPT, 1993, 105p.

_____. **Levantamento dos processos erosivos urbanos no Estado de São Paulo desencadeados ou agravados pelas chuvas de janeiro e fevereiro de 1995**. Relatório N° 33. São Paulo: IPT, 1995.

_____. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo – 1:500.000**. São Paulo: IPT/USP, 1981.

_____. **Cadastramento de pontos de erosão e inundação no Estado de São Paulo**. Relatório Técnico N° 131.057-205: Volume I. São Paulo: IPT/DAEE, 2012, 195 p.

- IRONSIDE, K.E., MATTSON, D.J., ARUNDEL, T., THEIMER, T., HOLTON, B., PETERS, M., EDWARDS, T.C. J. & HANSEN, J. Geomorphometry in Landscape Ecology: Issues of Scale, Physiography, and Application. **Environment and Ecology Research**, v. 6, n. 5, p. 397-412, 2018. doi: 10.13189/eer.2018.060501
- JETTEN, V.; POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VAN DE VLAG, D. Spatial modelling of ephemeral gully incision: A combined empirical and physical approach. In: Owens, A. J.; Collins, J.A. **Soil Erosion and Sediment Redistribution in River Catchments: Measurement, Modelling and Management**. CABI: Wallingford, UK, p.195-206, 2006.
- JOHNSON, R.A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. New Jersey: Pearson, 2007.
- KENNEDY, P. **A guide to econometrics**, Oxford: Maldon, 2005.
- KERTZMAN F. F.; OLIVEIRA, A. M. S.; SALOMÃO, F. X. T.; GOUVEIA, M. I. F. Mapa de erosão do estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, p.31-36, 1995. doi:10.5935/0100-929X.19950008
- KIENZLE, S. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. **Transactions in GIS**, v. 8, p. 83-112, 2004. Doi: 10.1111/j.1467-9671.2004.00169.x
- KNAPEN, A.; POESEN, J. Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 35, p. 217-228, 2010. doi:10.1002/esp.1911
- LAL, R. **Soil erosion research methods**. Florida: St. Lucie Press, 1994. 340 p.
- LOLLO, J. A. **Mapeamento geotécnico da Folha de Leme - SP: Utilização da geomorfologia para a caracterização preliminar de unidades geotécnicas**. 1991. 99p. Dissertação. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1991.
- LOLLO, J. A.; NEVES, M. P.; ARANTES, L. T.; LIMA, C. G. R.; LORANDI, R. Mudanças de uso e cobertura da terra e degradação ambiental em bacias hidrográficas. In: Américo-PINHEIRO, J. H. P.; BENINI, S. M. **Bacias hidrográficas: fundamentos e aplicações**. ANAP: Tupã, p. 15-40, 2018.
- LOLLO, J. A.; SENA, J. N. Establishing erosion susceptibility: analytical hierarchical process and traditional approaches. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 72, p. 589-600, 2013. doi: 10.1007/s10064-013-0529-9

- LOMBARDI NETO, F., MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). **Bragantia**, v. 51, p. 189–196, 1992. doi.org: 10.1590/S0006-87051992000200008
- LUCÁ, F.; CONFORTI, M.; ROBUSTELLI, G. Comparison of GIS-based gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. **Geomorphology**, v. 134, 2011, p. 297-308. doi.org: 10.1016/j.geomorph.2011.07.006
- MARTINS, A. G. S.; ARAUJO, T. P.; PEJON, O. J. Inventário de feições erosivas como subsídio à gestão da ocupação de uma área do município de São Pedro-SP, Brasil. In: **Congresso Nacional de Geotecnia**, 2010, Guimarães, Anais... Guimarães: SPG, 2010. p.347-355.
- MARTÍNEZ-CASANOVAS, J. A.; RAMOS, M. C.; POESEN, J. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. **Geomorphology**, v. 58, p. 305-321, 2004. doi:10.1016/j.geomorph.2003.08.005.
- MATHIAS, D. T. **Contribuição metodológica para diagnóstico da dinâmica erosiva linear e seu prognóstico evolutivo visando subsidiar projetos de recuperação**. 2016. 178p. Tese. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Presidente Prudente, 2016.
- MENÉNDEZ-DUARTE, R.; MARQUÍNEZ, J.; FERNÁNDEZ-MENÉNDEZ, S.; SANTOS, R. Incised channels and gully erosion in Northean Iberian Peninsula: controls and geomorphic setting. **Catena**, v. 71, p. 267-278, 2007. doi: 10.1016/j.catena.2007.01.002
- MENEZES, M. B. M. **Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade**. 2010, 139 p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.
- MILLARES, A.; GULLUVER, Z.; POLO, M. J. Scale effects on the estimation of erosion thresholds through a distributed and physically based hydrological model. **Geomorphology**, v. 154, p. 115-126, 2012.
- MOMM, H. G.; BINGNER, R. L. WELLS, R. P.; RIGBY, J. R.; DABNEY, S. M. Effect of topographic characteristics on compound topographic index for identification of gully channel initiation locations. **Transactions of the ASABE**, v. 56, 523-537, 2013. doi: 10.13031/2013.42673
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Channel Initiation and the Problem of Landscape Scale. **Science**, v. 255, 1992, p. 826-830.

- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Where do channels begin? **Nature**, v.336, p. 232-234, 1988.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W.E. Landscape dissection and drainage area–slope threshold. In: KIRKBY, M. J. **Process models and theoretical geomorphology**. Wiley: New York, 1994, p. 221–246.
- MONTGOMERY, D. Predicting landscape-scale erosion rates using digital elevation models. **Geoscience**, v. 335, p. 1121-1130, 2003. doi.org/10.1016/j.crte.2003.10.005
- MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. **Soil Conservation**, v. 50, p. 1294-1298, 1986.
- MOORE, I. D.; BURCH, G. J.; MACKENZIE, D. H. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. **Transactions of the ASAE**, v.31, p.1098-1107, 1988. doi: 10.13031/2013.30829
- MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, 1991, p. 3-30.
- MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J.; AUESWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D.; STYCZEN, M. E.; FOLLY, A. J. V. **The European Soil Erosion Model (EUROSEN): documentation and user guide**. Cranfield University, 1998.
- MATTIVI, P.; FRANCI, F.; LAMBERTINI, A.; BITELLI, G. TWI computation: a comparison of different open source GIS. **Open Geospatial Data, Software and Standards**, v. 4, 2019. doi: 10.1186/s40965-019-0066-y
- MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. Australia: Blackwell, 2005, 304p.
- MOSAVI, A.; SAJEDI-HOSSEINI, F.; CHOUBIN, B.; TAROMIDEH, F.; RAHI, G.; DINEVA, A. A. Susceptibility Mapping of Soil Water Erosion Using Machine Learning Models. **Water**, v. 12, 2020. doi:10.3390/w12071995
- NACHTERGAELE, J.; POESEN, J.; OOSTWOUD WIJDENES, D.; VANDEKERCKHOVE, L. Medium-term evolution of a gully developed in a loess-derived soil. **Geomorphology**, v. 46, p. 223-239, 2002. doi:10.1016/S0169-555X(02)00075-2
- NACHTERGAELE, J.; POESEN, J.; STEEGEN, A.; TAKKEN, I.; BEUSELINCK, L.; VANDEKERCKHOVE, L.; GOVERS, G. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils. **Geomorphology**, v. 40, p. 237-252, 2001. doi:10.1016/S0169-555X(01)00046-0

- NACHTERGAELE, J.; POESEN, J.; VANDEKERCKHOVE, L.; OOSTWOUW WIJDENES, D.; ROXO, M. Testing the Ephemeral Gully Erosion Model (EGEM) for two Mediterranean environments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, p. 17-30, 2000. doi:10.1002/1096-9837
- NAZARI SAMANI, A.; AHMADI, H.; JAFARI, M.; BOGGS, G.; GHODDOUSI, J.; MALEKIAN, A. Geomorphic threshold conditions for gully erosion in Southwestern Iran (Boushehr-Samal Wastershed). **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 35, p. 180-189, 2009. doi: 10.1016/j.jseaes.2009.02.004
- NEARING, M. A.; FOSTER, G. R.; LANE, L. J.; FINKNER, S. C. A Process-based soil erosion model for USDA- Water Erosion Prediction Project technology. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 5, p.1587-1593, 1989. doi: 10.13031/2013.31195
- NEVES, M. P. **Análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego do Meio – Município de São Pedro (SP): Estudo do desencadeamento das erosões**. 2017. 179 p. Dissertação. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2017.
- NEVES, M. P.; PADILHA, A. F. R.; BOURSCHEIDT, V.; LOLLO, J. A. Otimização de Modelos Digitais de Elevação para a Obtenção de Variáveis Geomorfológicas e Hidrológicas: Avaliação da Convolução Bidimensional sobre os Produtos ALOS, ASTER-GDEM e SRTM. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021. doi: 10.11137/1982-3908_2021_44_38692
- NELSON, A., REUTER, H. I.; GESSLER, P. DEM production methods and sources. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Elsevier, p.65-85, 2009.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, v. 19, 1979, p. 196-199.
- NYSSSEN, J.; POESEN, J.; MOEYERSONS, J.; LUYTEN, E.; VEYRET-PICOT, M.; DECKERS, J.; HAILEN, M.; GOVERS, G. Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the Northern Ethiopian Highlands. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 27, p.1267-1283, 2002. doi:10.1002/esp.404
- OLIVEIRA, J.R.; MEDINA, B. F. A erosividade das chuvas em Manaus (AM). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 235–239, 1990.
- OLIVEIRA, J. P. B.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; ZANETTI, S. S. Espacialização da erosividade das chuvas no Brasil a partir de séries sintéticas de precipitação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 4, 2015. doi:10.5039/agraria.v10i4a4998.

- OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. **Rainfall erosivity in Brazil: A review**. *Catena*, n. 100, p. 136-147, 2012. doi: 10.1016/j.catena.2012.08.006.
- PARKNER, T.; PAGE, M. J.; MARUTANI, T.; TRUSTRUM, N. A. Development and controlling factors of gullies and gully complexes, East Coast, New Zealand. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, p. 187-199, 2006.
- PATTON, P. C.; SCHUMM, S. A. Gully erosion, northwestern Colorado: a threshold phenomenon. **Geology**, p. 88-90, 1975.
- PAULIN, G. L.; BURSIK, M.; LUGO-HUBP, J.; ZAMORANO OROZCO, J. J. Effect of pixel size on cartographic representation of shallow and deep-seated landslide, and its collateral effects on the forecasting of landslides by SINMAP and Multiple Logistic Regression landslide models, **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 35, 2010, p.137-148, doi: 10.1016/j.pce.2010.04.008.
- PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba – SP (Escala 1:100.000: estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos**. 1992. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- PIGA, F. G. **Modelagem ambiental de áreas degradadas por processos erosivos, com vista ao planejamento ambiental - São Pedro e Santa Maria da Serra - SP**. 2017, 125 p. Dissertação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- PIKE, A. C.; MUELLER, T. G.; SCHÖRGENDORFER, A.; SHEARES, S. A.; KARATHANASIS, A. D. Erosion index derived from terrain attributes using logistic regression and neural networks. **Agronomy Journal**, v. 101, 1068-1079, 2009. Doi: :10.2134/agronj2008.0207x
- PINHEIRO, M. R. **Técnicas cartográficas e aerofotogramétricas no estudo da erosão: Alta Bacia do Ribeirão Araquá - São Pedro e Charqueada - SP**. 2009, 186 p. Dissertação, Faculdade de Filosofia, letras e ciências humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- PITOMBO, C. S. **Estudos de relações entre variáveis socioeconômicas, de uso do solo, participação em atividades e padrões de viagens encadeadas urbanas**. 2007. 267 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- PMSP - PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PEDRO. **Mapa: Macrozoneamento territorial**. In: Plano Municipal de Saneamento Básico de São Pedro. Proesplan: São Pedro, 2013.

- POESEN, J. W. A.; TORRI, D.; VANWALLEGHEM, T. Gully erosion: procedures to adopt when modelling soil erosion in landscapes affected by gullying. In: MORGAN, R. P. C.; NEARING, M. A. (eds) **Handbook of erosion modelling**. Wiley-Blackwell, p. 360–386, 2011.
- POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, p. 91-133, 2003. doi: 10.1016/S0341-8162(02)00143-1
- POESEN, J.; VANDEKERCKHOVE, L.; NACHTERGAELE, J.; OOSTWOUW WIJDENES, D.; VERSTRAETEN, G.; VAN WESEMAEL, B. Gully erosion in Dryland Environments. In: BULL; L. J.; KIRKBY, M. J. **Drylands Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-arid Channels**. Chichester, UK: Wiley & Sons, 2002, p. 229-248.
- MAPBIOMAS - Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. **Coleção 6 (1985-2020) da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil**. Disponível: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: mar.2021.
- RICARDI, A. M. **Variabilidade espacial e temporal da erosividade das chuvas (EI30) no Estado de São Paulo**. 2020. 91 p. Dissertação, Faculdade de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2020.
- RODRIGUES, V. G.; DANTAS-FERREIRA, M. D.; ZUQUETTE, L. V. Estudos geológicos e geotécnicos de áreas degradadas por mineração e erosão. In: ZUQUETTE, L. V. **Geotecnia Ambiental**. Rio de Janeiro: Elsevier, v. 1, 2015, p. 307-339.
- ROTTA, C. M. S. **Estudo da recuperação de áreas degradadas por processos erosivos: procedimentos e eficiência dos métodos**. 2012, 168 p. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- ROTTA, C. M. S.; ZUQUETTE, L. V. Processos erosivos. In: ZUQUETTE, L. **Geotecnia ambiental**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015, p. 115-152.
- ROY, P.; CHANDRA PAL, S.; ARABAMERI, A.; CHAKRABORTTY, R.; PRADHAN, B.; CHOWDHURI, I.; LEE, S.; TIEN BUI, D. Novel Ensemble of Multivariate Adaptive Regression Spline with Spatial Logistic Regression and Boosted Regression Tree for Gully Erosion Susceptibility. **Remote Sensing** 2020, 12, 3284. doi.org: 10.3390/rs12203284
- ROSSI, M.; TORRI, D.; SANTI, E. Bias in topographic thresholds for gully heads. **Natural Hazards**, v. 79, 2015. doi: 10.1007/s11069-015-1701-2

- RUFINO, R.L.; BISCAIA, R. C. M.; MERTEN, G. H. Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná através da pluviometria: terceira aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, 439–444, 1993.
- SALOMÃO, F. X. T.; IWASA, O. Y. Erosão e a ocupação rural e urbana. In: BITAR, O. Y (Coord). **Curso de geologia aplicada ao meio ambiente**. São Paulo: ABGE/IPT, p. 5-148, 1995.
- SANTA'ANNA NETO, J. L. A erosividade das chuvas no Estado de São Paulo. **Revista Do Departamento De Geografia**, v. 9, p. 35-49, 1995. <https://doi.org/10.7154/RDG.1995.0009.0004>
- SANTORO, J. **Fenômenos erosivos acelerados na região de São Pedro-SP: Estudo da fenomenologia, com ênfase geotécnica**. 1991. Dissertação. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1991.
- SANTORO, J. Erosão continental. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, K.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, p. 55-70, 2009.
- SCHNABEL, S.; GOMEZ AMELIA, D. Variability of gully erosion in a small catchment in South-West Spain. **Acta Geologica Hispanica**, v. 28, p.27-35, 1993.
- SAMANI, A.N.; AHMADI, H.; JAFARI, M.; BOGGS, G.; GHODDOUSI, J.; MALEKIAN, A. Geomorphic threshold conditions for gully erosion in Southwestern Iran (Boushehr-Samal watershed). **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 35, p. 180-189, 2009. doi:10.1016/j.jseaes.2009.02.004
- RAZAVI-TERMEH, S. V.; SADEGHI-NIARAKI, A.; SOO-MI, C. Gully erosion susceptibility mapping using artificial intelligence and statistical models, **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, p. 821-845, 2020. doi: 10.1080/19475705.2020.1753824
- SILVA, A. F. **Mapeamento geotécnico e análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego Tuncum, São Pedro-SP, Escala 1:10.000**. 2003, 131 p. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- SILVA, M. L. N.; FREITAS, P. L.; BLANCANEUX, P.; CURI, N. Rainfall erosivity indices in the Goiânia region, Goiás state, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, p. 977–985, 1977.
- SILVA, R. B.; IORI, P.; ARMESTO, C.; BENDINI, H. N. Assessing rainfall erosivity with artificiais neurais networks for the Ribeira Valley, Brazil. **International Journal of Agronomy**, 2010. doi: 10.1155/2010/3652497

- SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Análise comparativa entre Modelos Digitais de Elevação com distintas características de processamento e aquisição. **Boletim de Geografia**, v. 33, p. 106-121, 2015. doi: 10.4025/bolgeogr.v33i0.31930.
- SMITH, M.P.; XING-ZHU, A.; BURT, J.E.; STILES, C. The effect of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. **Geoderma**, v. 137, pp. 58-69, 2006. doi: 10.1016/j.geoderma.2006.07.002
- SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, p.79-97, 2012.
- SOUZA, L. A.; SOBREIRA, F. G. **Guia para elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais**, Brasília, 2014, 68 p.
- STABILE, R. A. **Limites topográficos de feições erosivas lineares em Piratinga (SP)**. 2013. 103p. Dissertação. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- SVORAY, T.; MARKOVITCH, H. Catchment scale analysis of the effect of topography, tillage direction and unpaved roads on ephemeral gully incision. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, p. 1970-1984, 2009. doi:10.1002/esp.1873
- TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, 1997, p. 309-319.
- TARBOTON, D. G.; BRAS, R.L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 81-100, 1991.
- TEIXEIRA, D. B. S.; CECÍLIO, R. A.; OLIVEIRA, J. P. B.; ALMEIDA, L. T.; PIRES G. F. Rainfall erosivity and erosivity density through rainfall synthetic series for São Paulo State, Brazil: Assessment, regionalization and modeling, **International Soil and Water Conservation Research**, 2021. doi: 10.1016/j.iswcr.2021.10.002.
- THORNE, C. R.; ZEZENBERGEN, L.W.; GRISSINGER, E. H.; MURPHEY, J. B. Ephemeral gullies as sources of sediment. In: **Proceeding of the 4th Federal Interagency Sedimentation Conference**. Las Vegas, 1986, p. 301-309.
- TORRI, D.; POESEN, J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. **Earth-Science Reviews**, v. 130, p. 73-85, 2014. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.12.006
- TORRI, D.; POESEN, J.; ROSSI, M.; AMICI, V.; SPENNACCHI, D.; CREMER, C. Gully head modelling: a Mediterranean badland case study. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, p. 2547-2561, 2018. doi: 10.1002/esp.4414

- TRINDADE, A. L. F.; OLIVEIRA, P. T. S.; ANACHE, J. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 12, p. 1918-1928, 2014. doi: 10.1590/S0100-204X2016001200002.
- USDA - United States Department of Agriculture. **Urban Hydrology for Small Watersheds: TR-55**. USDA/NRCS, Washington, 1986.
- VANACKER, V.; VANDERSCHAEGHE, M.; GOVERS, G.; WILLEMS, E.; POESEN, J. ; DECKERS, J. ; DE BIEVRE, B. Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. **Geomorphology**, v. 52, p. 299-315, 2003. doi: 10.1016/S0169-555X(02)00263-5
- VANDAELE, K.; POESEN, J.; GOVERS, G.; WESEMAEL, B. V. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. **Geomorphology**, v. 19, 161-173, 1996.
- VANDAELE, K.; POESEN, J.; MARQUES DE SILVA, J. R.; GOVERS, G.; DESMET, P. Assessment of factors controlling ephemeral gully erosion in Southern Portugal and Central Belgium using aerial photographs. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, v. 41, p. 273-287, 1997.
- VANDEKERCHKOVE, L.; POESEN, J.; OOSTWOUD WIJDENES, D.; FIGUEIREDO, T. Topographical threshold for ephemeral gully initiation in intensively cultivated areas of the Mediterranean. **Catena**, v. 33, p. 271-292, 1998.
- VANDEKERCHKOVE, L.; POESEN, J.; OOSTWOUD WIJDENES, D.; NACHTERGAELE, J.; KOSMAS, C. ROXO, M. J.; FIGUEIREDO, T. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 25, p. 1201-1220, 2000.
- VANWALLEGHEM, T.; VAN DEN EECKHAUT, M.; POESEN, J.; GOVERS, G.; DECKERS, J. Spatial analysis of factors controlling the presence of closed depressions and gullies under forest: Application of rare event logistic regression. **Geomorphology**, v. 95, p. 504-517, 2008. doi: 10.1016/j.geomorph.2007.07.003
- VANWALLEGHEM, T.; POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. **Geomorphology**, v. 69, p. 76-91, 2005.
- VIEIRA, S.R., LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 54, p. 405-412, 1995. doi:10.1590/S0006-87051995000200018.

- VILAR, O. M.; PRANDI, E. C. Erosão dos Solos. In: CINTRA, J. C.A; ALBIERO, J. H. (Org.). **Solos do interior de São Paulo**. São Paulo: ABMS, 1993, v. 1, p. 177-206.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationships to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**. v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958. doi.org:10.1029/TR039i002p00285
- YAMANOUTH, G. R. B. **Avaliação de processos erosivos e das técnicas de controle e reabilitação - Bacia do Córrego do Espraiado (São Pedro - SP)**. 2003, 177 p. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- YIBELTAL, M.; TSUNEKAWA, A.; ADGO, E.; MESHESHA, D. T.; MASUNAGA, T.; TSUBO, M.; BILLI, P.; EBABU, K.; FENTA, A. A.; BERIHUN, M. L. Morphological characteristics and topographic thresholds of gullies in different agro-ecological environments. **Geomorphology**, v. 341, p. 15-27, 2019. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.05.012
- ZACHAR, D. **Soil Erosion**. New York: Elsevier, 1982. 548 p.
- ZHANG, J. X.; CHANG, K. T.; WU, J. Q. Effects of DEM resolution and source on soil erosion modelling: a case study using the WEPP model. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 22, p. 925-942, 2008. doi: 10.1080/13658810701776817
- ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. Tese (Doutorado). EESC/USP, São Carlos, v. 3, 673p, 1987.
- ZUQUETTE, L. V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. 1993, 256 p. Tese (Livre-Docência). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
- ZUQUETTE, L. V.; CARVALHO, A. R.; YAMANOUTH, G. R. B. Feições erosivas na bacia do córrego Espraiado, São Pedro (SP), seus tipos e evolução entre 1972-2002. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 414-425, 2007.
- ZUQUETTE, L. V.; RODRIGUES, V. G. S.; PEJON, O. J. Recuperação de áreas degradadas. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia ambiental: conceitos e práticas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013, p. 590-619.

APÊNDICES E ANEXO

APÊNDICE A

```
## regressão logística para avaliação da suscetibilidade à erosão
```

```
## Leitura e Visualização da base de dados
```

```
base_modelo <- read.csv("nome", sep=",", header=TRUE)
```

```
View(base_modelo)
```

```
## Alterando a base de dados das variáveis categóricas
```

```
base_modelo$nomevariável <- as.factor(base_modelo$ nomevariável)
```

```
## Análise dos dados
```

```
summary(base_modelo)
```

```
## Análise correlação
```

```
correlacao_base_modelo <- cor(base_modelo [c1:c2])
```

```
correlacao_base_modelo <- round(correlacao_base_modelo,3)
```

```
cor_base_modelo <- correlacao_base_modelo
```

```
cor_base_modelo[upper.tri(correlacao_base_modelo)] <- ""
```

```
cor_base_modelo <- as.data.frame(correlacao_base_modelo)
```

```
cor_base_modelo
```

```
## Removendo variáveis com alta correlação (se for necessário)
```

```
base_modelo <- base_modelo[, -c(c1)]
```

```
## Divisão da amostra: treino (Train) e teste (Valid)
```

```
prop.table(table(base_modelo$erosao))
```

```
library(caret)
```

```
set.seed(200)
```

```
trainIndex_base_modelo <- createDataPartition(base_modelo$erosao, p = 0.7, list = FALSE, times = 1)
```

```

Train_modelo <- base_modelo[ trainIndex_base_modelo,]
Valid_modelo <- base_modelo[-trainIndex_base_modelo,]

## Chencando a proporção treinamento x proporção teste
prop.table(table(Train_modelo$erosao))
prop.table(table(Valid_modelo$erosao))

## Calibração inicial do modelo de regressão logística
logit_base <- glm(factor(erosao) ~., data = Train_modelo, family =
binomial(link="logit"))

## Resultados do modelo logit_base
logit_base
summary(logit_base)

## Método Stepwise
step(logit_base, direction = "both")
step_model_logit <- step(logit_base, direction = "both")

## Resultado estatístico do modelo step
summary(step_model_logit)

## Teste de Multicolinearidade
library(faraway)

vif(step_model_logit)

## Pseudo R2
nagelkerke(step_model_logit)

## Teste Hosmer e Lemeshow
library(ResourceSelection)

hl_logit <- hoslem.test(Train_modelo $erosao,fitted(step_model_logit))
hl_logit

## Curva ROC
library(pROC)

roc1=plot.roc(Train_modelo$erosao,fitted(step_model_logit))

```

```

plot(roc1,          print.auc=TRUE,          auc.polygon=TRUE,          grid=c(0.1,0.2),
      grid.col=c("green","red"),          max.auc.polygon=TRUE,
      auc.polygon.col="lightblue", print.thres=TRUE)

```

```
## Calculando a previsão e acurácia - amostra treinamento
```

```

predTrain_step_model_logit <- predict(step_model_logit, Train_modelo, type =
"response")

```

```
predTrain_step_model_logit
```

```
probabilidade_train_step <- predTrain_step_model_logit
```

```
head(probabilidade_train_step)
```

```
previsão_train_step <- ifelse(probabilidade_train_step > 0.5, "1", "0")
```

```
head(previsão_train_step)
```

```
table(previsão_train_step, Train_modelo$erosao)
```

```
mean(previsão_train_step == Train_modelo$erosao)
```

```
## Calculando a previsão e acurácia - amostra teste
```

```

predValid_step_model_logit <- predict(step_model_logit, Valid_modelo, type =
"response ")

```

```
predValid_step_model_logit
```

```
probabilidade_valid_step_model_logit <- predValid_step_model_logit
```

```
head(probabilidade_valid_step_model_logit)
```

```
previsao_valid_step <- ifelse(probabilidade_valid_step_model_logit > 0.5, "1", "0")
```

```
head(previsao_valid_step )
```

```
table(previsao_valid_step, Valid_modelo$erosao)
```

```
mean(previsao_valid_step == Valid_modelo$erosao)
```

```
## Visualização de gráficos
```

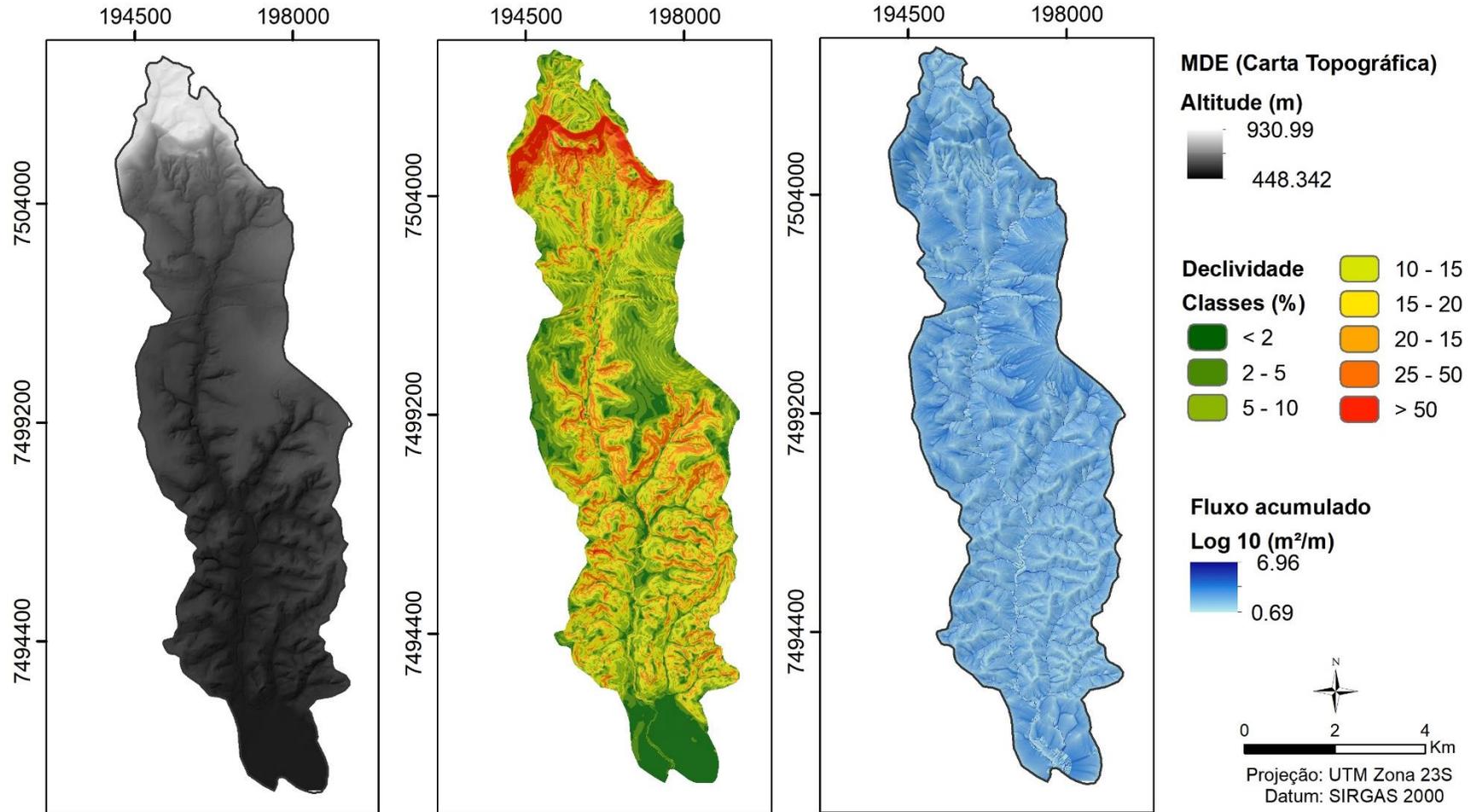
```
library(visreg)
```

```
visreg(step_model_logit, "variável_1", scale="response", band=FALSE, rug=0,  
xlab="variável_1", ylab="P(erosao)")
```

```
visreg(step.model_logit, " variável_1", " variável_2", gg=T, band=FALSE, overlay=T,  
xlab=" variável_1", ylab="P(erosao)", scale="response") + ggtitle("Valores na Escala  
de Probabilidades (erosao)") + theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5)) +  
theme(plot.title = element_text(face = "bold"))
```

APÊNDICE B

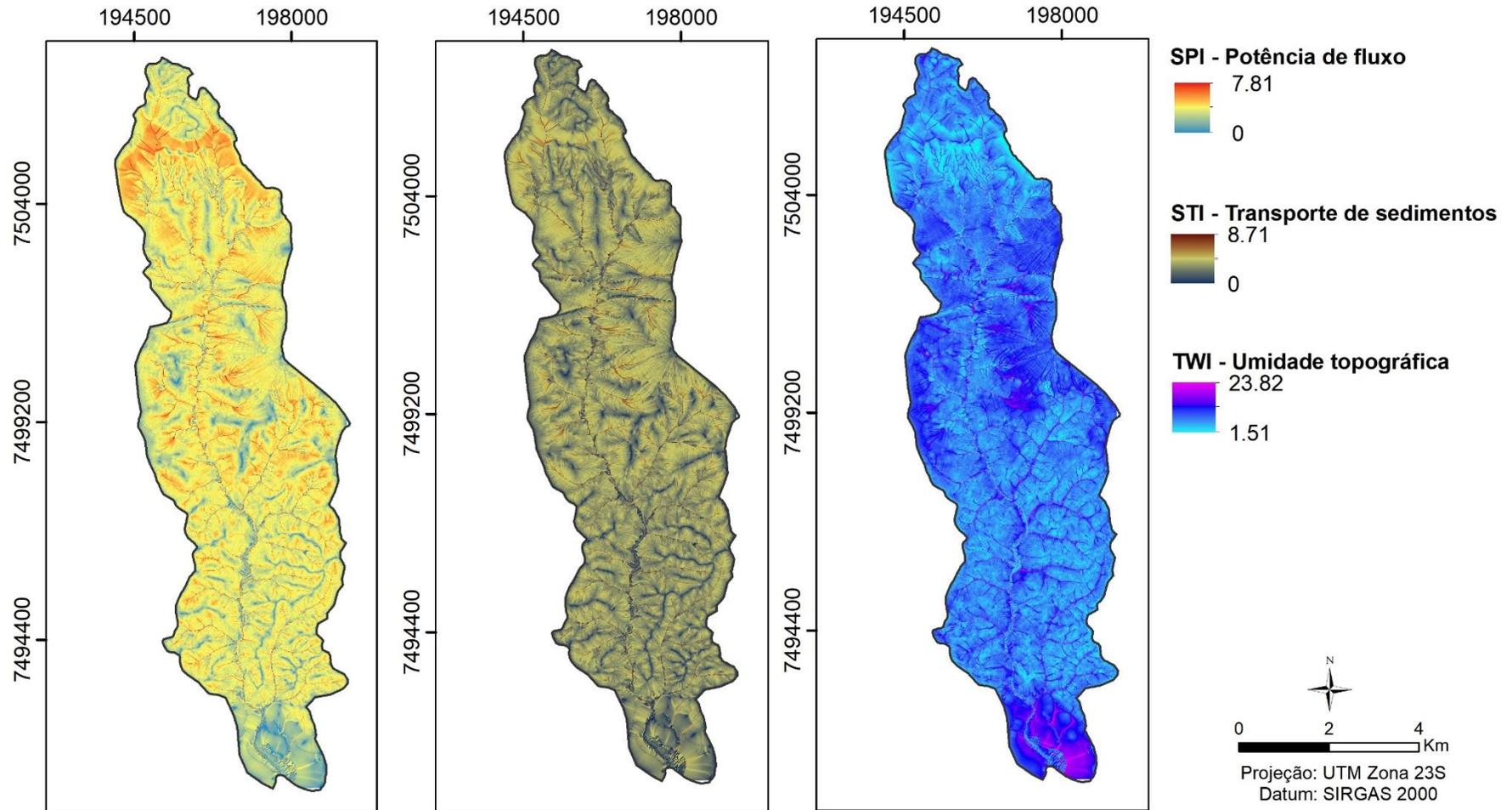
Mapas: MDE, Declividade e Fluxo acumulado



Fonte: A autora.

APÊNDICE C

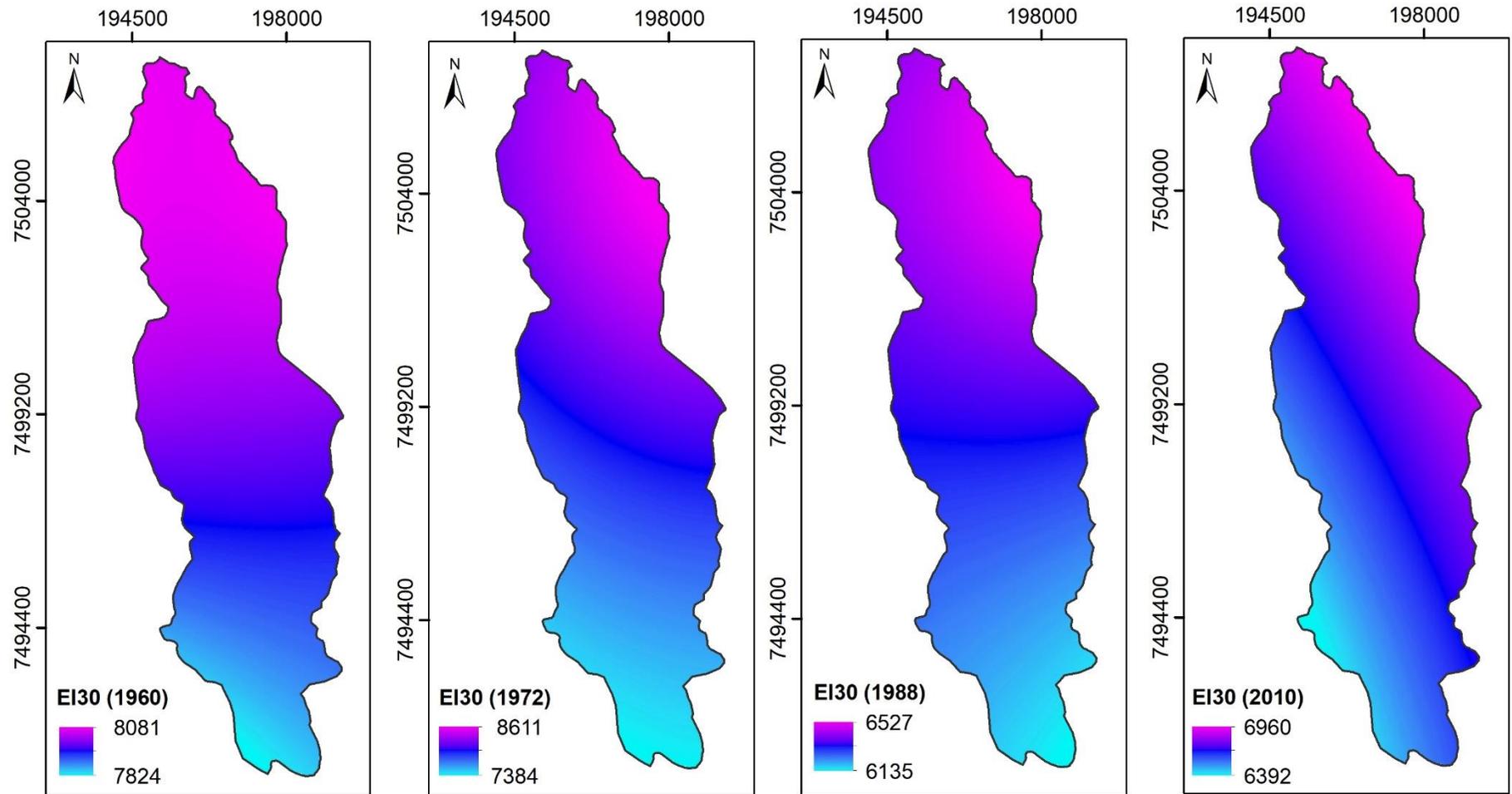
Mapas: SPI, STI e TWI



Fonte: A autora.

APÊNDICE D

Mapas de erosividade anual das chuvas (MJ.mm/ha.h.ano)

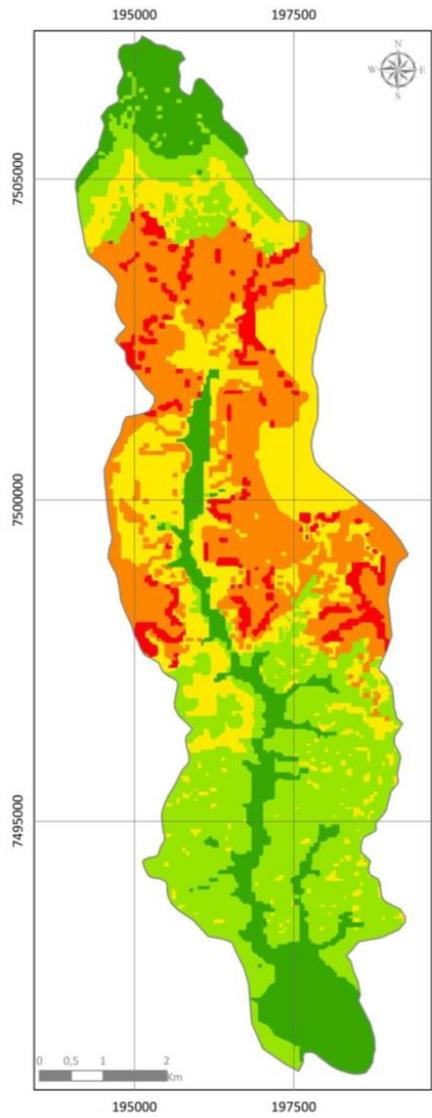


Fonte: DAEE
Séries históricas: 1960, 1972, 1988 e 2010

0 1.75 3.5
Km
Projeção: UTM Zona 23S | Datum: SIRGAS 2000

Fonte: A autora.

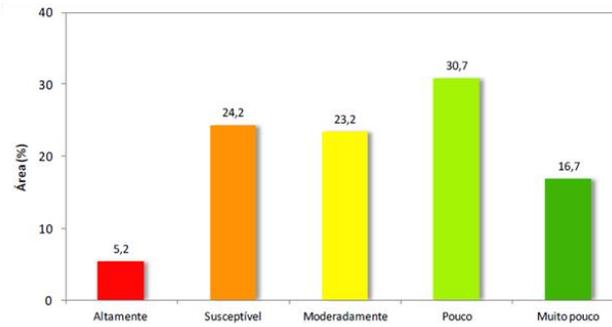
ANEXO A



Projeção UTM
Datum: SIRGAS 2000 - Fuso 23S

Adaptado de Gomes (2002)

Percentual de áreas de ocorrência das classes de susceptibilidade



Fonte: Adaptado de Gomes (2002).