

**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM
GEOGRAFIA**

ESTÊVÃO BOTURA STEFANUTO

**ANÁLISE DA DINÂMICA EROSIVA LINEAR E SEU POTENCIAL EVOLUTIVO EM
AMBIENTE AGRÍCOLA**

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

**RIO CLARO - SP
2019**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

ESTÊVÃO BOTURA STEFANUTO

ANÁLISE DA DINÂMICA EROSIVA LINEAR E SEU
POTENCIAL EVOLUTIVO EM AMBIENTE AGRÍCOLA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientadora: Prof^a Dra. Cenira Maria Lupinacci

Rio Claro - SP
2019

S816a Stefanuto, Estêvão Botura
 Análise da Dinâmica Erosiva Linear e seu Potencial
 Evolutivo em Ambiente Agrícola / Estêvão Botura
 Stefanuto. -- Rio Claro, 2019
 123 p. : il., tabs., fotos, mapas

 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
 (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio
 Claro
 Orientadora: Cenira Maria Lupinacci

 1. Declividade. 2. Fluxo Acumulado. 3. Uso da Terra. 4.
 Solos. 5. Feição Erosiva Linear. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ESTÊVÃO BOTURA STEFANUTO

ANÁLISE DA DINÂMICA EROSIVA LINEAR E SEU
POTENCIAL EVOLUTIVO EM AMBIENTE AGRÍCOLA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. João Osvaldo Rodrigues Nunes

Profa. Dra. Vania Silvia Rosolen

Profa. Dra. Cenira Maria Lupinacci (Orientadora)

Conceito: Aprovado

Rio Claro/SP, 12 de novembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jamil e Marli, e meu irmão, Tiago, por sempre apoiarem, de forma lúcida, minhas buscas;

À minha amada Daiane, companheira de todos os momentos e incentivadora dos meus sonhos;

À professora Cenira Maria Lupinacci, pela orientação deste trabalho e pelo exemplo de profissionalismo;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo financiamento dos projetos 2016/25399-1 e 2018/09746-9. Ainda, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001;

Aos amigos de República, Gabriel, João Paulo, José Renato e Rafael, pelo companheirismo e apoio;

Aos amigos de Geografia, Alessandra, Amanda, Ana Claudia, Arthur, Beatriz; Bruna, Bruno, Cecy, Edvaldo, Felipe Zanatta, Franciele, Francielly, Gabriel, Higor, João Francisco, José Vitor, Luis Paulo, Marcelo Franzin, Marina, Mariana, Rafael Andrade, Renan, Rogério e Yuri, pelos aprimoramentos científicos e momentos vividos;

Aos amigos de Bariri – SP, minha cidade natal, pelos momentos de descontração e apoio: Ana Maria, Bruno, Fernando, Heitor, João Pedro Albanese, João Pedro Bissi, João Paulo, Marcelo Henrique, Marcelo Monari, Maria Isabel, Maurício, Paulo, Rafael, Raul, Renan Budin, Renan Siqueira, Rodrigo, Vinicius e Vitor;

Aos funcionários do DEPLAN, pelo ótimo convívio diário e por me auxiliarem no desenvolvimento desta pesquisa: Ana Carolina, Bira, Cássia, Magali e Suely;

Aos estagiários do Laboratório de Análise de Formações Superficiais, João Arthur e Hugo, pelo empenho e dedicação nas análises de solo;

Aos professores Xavier Úbeda, Filipe Carvalho e Marcos Francos, pelos ensinamentos e aprimoramentos científicos durante a Bolsa Estágio de Pesquisa no Exterior – BEPE;

Aos meus avós, tios e primos, pelo apoio e incentivo;

Aos professores João Osvaldo Rodrigues Nunes e Vania Silvia Rosolen, por avaliarem esta dissertação;

Aos professores (as) Andréia Medinilha Pancher, Fabiano Tomazini da Conceição, Rodrigo Moruzzi e Sérgio dos Anjos Ferreira Pinto, pelas orientações e trocas científicas;

Ao proprietário da Fazenda Chapultepec, Senhor Mário, e seu funcionário, Barbosa, por cederem a propriedade para o desenvolvimento das etapas de campo.

RESUMO

Com o auxílio de diversos ramos da ciência, o ser humano buscou o desenvolvimento de suas demandas ao longo da história junto ao espaço natural, chegando para alguns autores, do ponto de vista do relevo, a ser denominado como um novo agente geomorfológico. A partir disso, as ações humanas vêm modificando o relevo em ambientes rurais, tanto para fins de agricultura como de pecuária. A fim de colaborar com os estudos que visam compreender os mecanismos de desenvolvimento de feições erosivas lineares e sua interação com agentes antropomórficos, teve-se como objetivo desta pesquisa apontar o potencial ao avanço erosivo linear de feições localizadas em uma bacia hidrográfica alocada no setor cuneiforme de Analândia (SP). Para o desenvolvimento da pesquisa, utilizaram-se as orientações de Mathias (2016), realizando o levantamento de diversas variáveis (granulometria, infiltração, resistência do solo à penetração, permeabilidade, declividade, fluxo acumulado de superfície e uso da terra) para formulação de cartas de síntese, as quais foram validadas a partir das áreas de ocorrência de feições erosivas e a partir dos dados de evolução do talude de uma voçoroca. Para validação, pautou-se na hipótese de que as classes com alto potencial ao avanço erosivo deveriam ter uma boa correspondência com os setores de maior concentração de feições erosivas e maior evolução do talude. Assim, tal sistemática permitiu identificar o setor central da bacia como uma zona de concentração de feições erosivas lineares, a qual se constitui em uma área de transição entre os solos argilosos de maior resistência (ao norte) e os solos arenosos de menor resistência (ao sul). Ainda, as vertentes ao norte apresentaram declives íngremes (30|45%) e fluxo acumulado elevado (2500|12500m²), quando comparado a outras pesquisas. Tais fatores, associados a um intensivo uso da terra voltado para pecuária, com reduzidas práticas de manejo, apontaram, nas cartas de síntese com melhor resposta à validação, uma faixa, no setor central da área de estudo, de maior potencial ao avanço erosivo, firmando o setor de contato entre materiais de resistências variadas como uma zona que requer atenção. Destaca-se ainda que as cartas de síntese com melhor resposta à hipótese empregaram influência igual às variáveis interpoladas, fato que permitiu a compreensão de que a dinâmica erosiva atuante no setor evolui e avança a partir da interação de elementos físicos e das ações humanas, afirmação que subsidia pesquisas em ambientes rurais que empreguem perspectivas calcadas na análise da complexidade da interação das variáveis naturais e humanas para o estudo dos sistemas terrestres.

Palavras-Chave: Declividade. Fluxo Acumulado. Uso da Terra. Solos. Feição Erosiva Linear.

ABSTRACT

With help of several Science fields, human beings sought to develop their demands throughout history all over the natural space, reaching out to some authors, from the point of view of relief, to be named as a new geomorphological agent. From this, human actions have been modifying the relief in rural environments, for agriculture and livestock purposes. Seeking to collaborate with studies that aim to understand the mechanisms of development of linear erosive features and their interaction with anthropomorphic agents, this research goal was to indicate the potential to linear erosive rise of features located in a watershed located in the cuestas sector from Analândia (SP). For the research development, it has been used the guidelines of Mathias (2016), performing the survey of several variables (particle size, infiltration, penetration resistance, permeability, slope, accumulated surface flow and land use) for the formulation of maps synthesis, which were validated from the areas of erosive features and from the evolution data of a gully erosion. For validation, it was based on the hypothesis that the kinds with high potential to erosive rise should have a good correspondence with sectors in higher concentration of erosive features and larger slope evolution. Thus, this systematic allowed to identify the central sector of the watershed as a zone of concentration of linear erosive features, which constitutes a transition area between the more resistant clay soils (to the north) and the less resistant sandy soils (to the south). Still, the northern hillslopes showed steep slopes (30-45%) and highly accumulated flow (2500-12500m²) when compared to other surveys. These factors, combined with intensive land use for livestock, reduced management practices indicated, in the synthesis maps with the best response to validation, a band on the central sector of the study area, with larger potential to erosive rise, establishing the contact sector between materials of varying strengths as a zone that requires attention. It is noteworthy that the synthesis maps with better response to the hypothesis employed the same influence as the interpolated variables, a fact that allowed the understanding that the erosive dynamics acting in the sector evolves and advances from the interaction of physical elements and human actions, affirmation that supports research in rural environments that employ perspectives based on the analysis of the interaction complexity of natural and human variables for the study of Earth systems.

Keywords: Slope. Accumulated Flow. Land Use. Soils. Linear Erosive Features.

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização da área de estudo.....	16
Figura 2 – Formações Geológicas de Superfície.....	30
Figura 3 – Solos da Área de Estudo.....	34
Figura 4 – À esquerda, localização do talude erosivo da voçoroca monitorada na bacia hidrográfica. À direita, em amarelo, os pontos de monitoramento do talude erosivo e de remoção/acumulação em superfície por erosão hídrica laminar. Em vermelho, somente os pontos em que se fez o monitoramento do talude erosivo.....	39
Figura 5 – Esquadro com nível acoplado para instalação das estacas e monitoramento do talude erosivo.....	39
Figura 6 – Pino de erosão utilizado na área de estudo. O setor branco representa o referencial para os monitoramentos de perda ou acúmulo de solo na superfície próxima ao pino. A mensuração da informação foi realizada sistematicamente no lado esquerdo do pino, considerando a face do pesquisador voltada para o talude da voçoroca.....	41
Figura 7 – Pluviômetro digital modelo Davis 7852 instalado na área de estudo.....	42
Figura 8 – Distribuição da malha de pontos amostrais na bacia hidrográfica analisada.....	43
Figura 9 – Infiltrômetro instalado em campo para realização do experimento no ponto de amostragem 13.....	44
Figura 10 – Penetrômetro de impacto IAA/Planalsucar-Stolf no ponto de amostragem 29.....	46
Figura 11 - Tradagem em campo para coleta de material para análise granulométrica e de permeabilidade do ponto amostral 36.....	47
Figura 12 – Características das classes de uso e ocupação da terra em 2010 e 2019. A classe cana-de-açúcar foi registrada somente em 2010.....	56
Figura 13 – Chave de interpretação das feições erosivas lineares identificadas nos anos de 1962, 1988, 2010 e 2019 a partir dos diversos produtos de sensoriamento remoto utilizados.....	57
Figura 14 – Exemplificação do processamento realizado pela ferramenta <i>Weighted Overlay</i>	59
Figura 15 – Funções da ferramenta <i>Wighted Overlay</i> . Destacada em azul a porcentagem de influência da variável no modelo; destacadas em vermelho as classes da variável; e em amarelo os pesos de cada classe para o processo de multiplicação e somatória dos <i>pixels</i>	60
Figura 16 – Distribuição espacial das características granulométricas na bacia hidrográfica.....	66
Figura 17 - Distribuição espacial da taxa média de infiltração na bacia hidrográfica.....	68
Figura 18 - Fendas de ressecamento em perfil exposto em campo. Foto tirada em área próxima ao Ponto 19.....	68
Figura 19 - Distribuição espacial da resistência do solo à penetração na bacia hidrográfica.....	70

Figura 20 - Distribuição espacial da taxa de permeabilidade na bacia hidrográfica.....	73
Figura 21 - Modelo espacial das características e comportamento dos materiais com o peso fatorial atribuído a cada variável. O fator do período úmido representa 50,1% das correlações possíveis na área de estudo.....	74
Figura 22 - Modelo espacial das características e comportamento dos materiais com o peso fatorial atribuído a cada variável. O fator do período seco representa 49,7% das correlações possíveis na área de estudo.....	75
Figura 23 – Carta de Feições Erosivas Lineares da Alta Bacia do Córrego Santa Terezinha – Analândia (SP).....	77
Figura 24 – Carta de Declividade da Alta Bacia do Córrego Santa Terezinha – Analândia (SP).....	80
Figura 25 – Carta de Fluxo Acumulado do Escoamento Superficial da Alta Bacia do Córrego Santa Terezinha – Analândia (SP).....	81
Figura 26 – Carta de Uso e Ocupação da Terra de 2010 da Alta Bacia do Córrego Santa Terezinha – Analândia (SP).....	85
Figura 27 - Carta de Uso e Ocupação da Terra de 2019 da Alta Bacia do Córrego Santa Terezinha – Analândia (SP).....	86
Figura 28 – À esquerda, setor da voçoroca leste dominado por vegetação típica de área úmida. À direita, foto em campo do setor.....	87
Figura 29 – Curvas de nível sendo desmantelas por feições erosivas em função da ausência de manutenção.....	88
Figura 30 – Cartas de potencial ao avanço erosivo linear. Cartas A e B com influência de 25% para cada variável, considerando a área das feições, em período seco e úmido, respectivamente. Cartas C e D com influência de 25% para cada variável, utilizando a dupla aplicação do coeficiente de 0-1, em período seco e úmido, respectivamente. Cartas E e F com influência de 50% para o uso da terra, utilizando área. G e H com dupla aplicação do coeficiente de 0-1 e 50% para o uso da terra.....	90
Figura 31 – Carta C de Potencial ao Avanço Erosivo Linear.....	93
Figura 32 – Carta D de Potencial ao Avanço Erosivo Linear.....	94
Figura 33 – Evolução do talude erosivo sobreposto às classes de potencial ao avanço erosivo linear.....	97
Figura 34 – Carta A de Potencial ao Avanço Erosivo Linear.....	98
Figura 35 – Carta B de Potencial ao Avanço Erosivo Linear.....	99
Figura 36 – Identificação do setor de distorção da voçoroca na Carta A de potencial ao avanço erosivo.....	100
Figura 37 – Barragem construída pelo proprietário que, durante os períodos de chuva, contém o escoamento do canal pluvial, formando um lago.....	100
Figura 38 – Comparação entre os dados de evolução do talude e remoção/acumulação de material no setor circundante ao talude.....	101
Figura 39 – Espécie <i>Tecoma Stans</i> (Vegetação Invasora) durante os períodos seco e úmido na frente de evolução do talude da voçoroca oeste.....	103
Figura 40 - Gráficos de chuva dos períodos destacados na Tabela 10.....	105

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Pesos atribuídos às classes de cada variável. Os valores foram gerados originalmente através do coeficiente de 0 a 1 e multiplicados por 100 para fins de inserção do ArcGis. A escala de valores varia de 1 a 100.....	61
Tabela 2 – Correlações estatísticas das variáveis físicas dos solos.....	69
Tabela 3 – Coeficiente de 0-1 da área ocupada pelas feições erosivas lineares em cada classe das cartas de características e comportamentos dos materiais.....	76
Tabela 4 - Coeficiente de 0-1 da área ocupada por feições erosivas lineares em cada classe de declividade.....	79
Tabela 5 – Coeficiente de 0-1 da área ocupada por feições erosivas lineares em cada classe da carta de fluxo acumulado. Valores das classes: classe 1 (25-625); classe 2 (625,1-2.500); classe 3 (2.500,1-12.500); classe 4 (12.500,1-25.000); classe 5 (25.000,1 – 50.000); classe 6(50.000,1 – 250.000) e classe 7 (>250.000,1).....	82
Tabela 6 – Coeficiente de 0-1 da área ocupada por feições erosivas em cada classe de uso da terra nos anos de 2010 e 2019.....	83
Tabela 7 – Área normalizada das feições erosivas por classe de potencial ao avanço erosivo linear. Em vermelho os maiores valores. Cartas A e B com influência de 25% para cada variável, considerando a área das feições. Cartas C e D com influência de 25% para cada variável, utilizando a dupla aplicação do coeficiente de 0-1. Cartas E e F com influência de 50% para o uso da terra, utilizando a área das feições. G e H com dupla aplicação do coeficiente de 0-1 e 50% de influência para o uso da terra.....	91
Tabela 8 – Distribuição das estacas de monitoramento e dos valores de evolução do talude erosivo em cada classe de potencial ao avanço erosivo linear. A densidade normalizada foi obtida a partir da divisão entre os milímetros de recuo do talude pelo número de estacas em cada classe.....	96
Tabela 9 – Período de análise do talude erosivo em comparação à precipitação. Destaque para os períodos de maior evolução do talude e menor volume de precipitação.....	102
Tabela 10 - Período de análise da dinâmica de superfície dos materiais em comparação à precipitação. Destaque para os períodos de maior perda ou acúmulo de material e dinâmica de superfície.....	102

Lista de Quadros

Quadro 1 - Definição e caracterização das classes de declividade.....	52
Quadro 2 – Classes de uso e ocupação da terra adaptadas e suas respectivas cores em RGB.....	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 A Teoria Geral dos Sistemas, complexidade e antropogeomorfologia.....	18
2.2 Conceitos sobre erosão e estudos aplicados.....	19
2.3 Pesquisas aplicadas a estudos de erosão	23
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	28
4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	38
4.1. Procedimentos técnicos para o levantamento de dados em campo	38
4.1.1 Monitoramento do talude erosivo da voçoroca oeste	38
4.1.2. Uso dos pinos de erosão para monitoramento da remoção/acumulação de material em superfície por erosão hídrica laminar	40
4.1.3. Aquisição de dados pluviométricos	41
4.1.4. Definição da malha de pontos amostrais para quantificação dos dados referentes às características e comportamento dos materiais	42
4.1.5. Mensuração das taxas de infiltração	43
4.1.6. Mensuração da resistência do solo à penetração	45
4.2. Coleta de amostras e procedimento para obtenção da granulometria e da permeabilidade	46
4.3. Processamento de dados em gabinete.....	49
4.3.1. Produtos cartográficos intermediários referentes às características e comportamento dos materiais	49
4.3.2. Carta de Características e Comportamento dos Materiais.....	50
4.3.3. Carta de Declividade.....	51
4.3.4. Carta de Fluxo Acumulado do Escoamento Superficial	53
4.3.5. Carta de Uso e Ocupação da Terra	54
4.3.6. Carta de Feições Erosivas Lineares	56
4.3.7 Cartas de Potencial ao Avanço Erosivo Linear	59
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	64
5.1. Análise das variáveis físicas dos solos	64
5.2. A integração das variáveis físicas dos solos para composição das cartas de características e comportamento dos materiais	73
5.3. Análise da declividade e do comportamento do escoamento superficial.....	78
5.4. Análise do uso e ocupação da terra de 2010 e de 2019	82
5.5. Cartas de potencial ao avanço erosivo linear	88

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXO A	120
ANEXO B	121
ANEXO C	122
ANEXO D	123

1. INTRODUÇÃO

A interação entre as organizações humanas, sobretudo aquelas com concepção judaico-cristã (DREW, 1986), e a natureza tem ocorrido de forma predatória, não compreendendo os seres humanos como parte da natureza, mas sim como uma força de domínio desta. Esse descompasso rítmico entre a sociedade e a natureza se potencializa a partir do século XVII, com o alvorecer da ciência moderna (CHAUI, 1994), e início do século XVIII, com a Revolução Industrial (HOBSBAWM, 1981), situações históricas que proporcionaram a intensa expansão da população mundial em meados do século XX (TREWARTHA, 1974). Nesse período, a relação de dominação e transformação do sistema natural se intensificou, fazendo com que, mediante a vigência de um sistema econômico exploratório, as demandas não somente fossem por alimentação e abrigo, mas sim por hodiernos fatores, como a demanda por novas fontes de energia, exploração mineral e florestal, dentre outras.

Atualmente, do ponto de vista geomorfológico, o ser humano tornou-se um agente potencial de transformação do relevo (NIR, 1983), realizando ações diretas e indiretas, caracterizadas, respectivamente, como incisivas (compactação do solo) ou graduais (terraços e aração) e como ocupação em setores de fragilidade (falhamentos; GOUDIE, 1986). As ações diretas em ambientes rurais podem ser maximizadas através de práticas agrícolas e de pecuária, as quais apresentam inúmeros impactos aos solos (GUERRA; MARÇAL, 2009) se desenvolvidas sem práticas conservacionistas adequadas (CASANELLAS *et al.*, 2003; CORRÊA, 2016; DEUSCHLE *et al.*, 2019). Já as ações indiretas, que estão associadas a questões estruturais, podem constituir-se em gatilhos para o desenvolvimento de feições erosivas associadas à dinâmica de falhamentos e às variações de resistência nas camadas litológicas (GOUDIE, 1986; MILANI *et al.*, 2007; STEFANUTO; LUPINACCI, 2017a).

A erosão dos solos é uma temática discutida há algumas décadas, sendo desde os anos 1980 apontada como elemento de preocupação ambiental (LAL, 1988). Nos últimos anos, tal assunto vem ganhando maior visibilidade, uma vez que 33% dos solos do mundo apresentam-se degradados (FAO, 2015), sendo esse o recurso natural que garante a produção de 98,2% da alimentação humana e animal (FAO, 2013).

No Brasil, mais especificamente no estado de São Paulo, um setor que merece atenção, no que se refere ao desenvolvimento de feições erosivas, é a transição entre os

compartimentos geomorfológicos da Depressão Periférica Paulista e das *Cuestas* Basálticas. Tal setor estende-se de Franca a Chavantes, sendo este marcado por contatos estruturais entre as camadas litológicas de maior resistência e as mais friáveis, definidas a partir dos derrames basálticos datados do Mesozoico (MILANI *et al.*, 2007). Alguns setores de contato entre litologias de resistências variadas apresentam intensa ocorrência de falhamentos, conforme constataram Stefanuto e Lupinacci (2016) em estudo aplicado à porção central do relevo *cuestiforme* paulista. Neste setor, a partir de uma escala de médio detalhe, foram mapeados lineamentos de até 1500 metros de extensão (STEFANUTO; LUPINACCI, 2016), os quais apresentaram uma relação intrínseca com o desenvolvimento de feições erosivas do tipo voçoroca (STEFANUTO; LUPINACCI, 2017a).

Sobre o relevo do estado de São Paulo, registra-se ainda intenso uso da terra, tanto agrícola como urbano. A afirmação evidencia-se quando se analisam os dados levantados pelo Instituto de Economia Agrícola (IEA) para o ano de 2017 e verifica-se que apenas 12,4% do território paulista era recoberto por mata. No que concerne ao uso da terra paulista, destaca-se a pesquisa de Produção Agrícola Municipal (PAM), desenvolvida pelo IBGE no ano de 2016, na qual se identifica que a microrregião de Franca (SP), localizada ao norte da faixa de transição entre as unidades geomorfológicas mencionadas, apresentava, em 2016, área expressiva de produção agrícola, com destaque para a cana-de-açúcar, 21,7% de área de ocupação e o café, 13,7%. Mais ao centro da Depressão Periférica, de acordo com Stefanuto e Lupinacci (2017b), em estudo aplicado a setores da Serra do Cuscuzeiro, localizada em Analândia (SP), no ano de 2010, 73,2% da área analisada era ocupada por pastagens classificadas como pastos limpos, que caracterizam gramíneas para fins agropecuários. Por fim, no compartimento sul da Depressão Periférica, especificamente na bacia do Rio Capivara, localizada em Botucatu (SP), Campos *et al.* (2015) identificaram novamente uma predominância das áreas de pastagem, representada pela ocupação de 31,6% da área analisada.

Assim, compreendendo o contato Depressão Periférica Paulista-*Cuesta* como uma área de fragilidade estrutural, marcada pela ocorrência de estruturas monoclinais e a alternância de resistência das camadas e, sendo esta submetida a um expressivo uso agrícola, firma-se a necessidade de compreensão desta interação, a fim de analisar o desenvolvimento de feições erosivas lineares e a consequente degradação dos solos. Buscando dialogar com tal questão, Mathias (2016) apresenta uma sistemática de análise de feições erosivas lineares em setores periurbanos, localizados no município de São Pedro (SP), permitindo a compreensão

das tendências evolutivas das feições através da caracterização das variáveis físicas e antrópicas, sistematizadas a partir de um mapa síntese de potencial ao avanço erosivo linear.

Portanto, o objetivo desta pesquisa foi analisar a dinâmica de feições erosivas lineares em um ambiente rural, de relevo *cuestiforme*, submetido à atuação de agentes antropomórficos, utilizando procedimentos experimentais e um conjunto de técnicas geomorfológicas sistematizadas por Mathias (2016) para áreas periurbanas, efetuando-se, assim, adaptações que permitam aplicar tal metodologia a diferentes cenários de uso da terra agrícola e cobertura vegetal.

Ainda, a pesquisa teve como objetivos específicos:

- Identificar as variáveis de maior influência no diagnóstico da dinâmica erosiva linear;
- Caracterizar as interferências antrópicas ocorrentes na área de estudo e sua correlação com os processos erosivos;
- Elaborar uma proposta analítica, pautada em uma carta de síntese do potencial ao avanço erosivo linear e aplicável a cenários rurais correlatos ao deste estudo.

Para o desenvolvimento de tais objetivos, selecionou-se uma área situada na porção central da Serra do Cuscuzeiro (Figura 1), setor de transição entre as *Cuestas* e a Depressão Periférica Paulista e que se constitui na alta bacia do Córrego Santa Terezinha, afluente do Rio Corumbataí. No setor, segundo levantamento do Instituto Geológico de São Paulo de 1981, registra-se significativa variação geológica, representada pelo contato entre cinco formações litológicas diversas; e, de acordo com Koffler *et al.* (1993), expressiva variação pedológica, representada por três associações e duas classes. Ainda, no que corresponde às áreas circundantes à bacia hidrográfica, Stefanuto e Lupinacci (2016) caracterizam o relevo da região como complexo e com setores com topografia acidentada, além de, segundo Pinton (2011), constituir-se em um setor de franca expansão agrícola, com a consolidação, a partir de 1988, de áreas de pastagem e cana-de-açúcar em maior relevância. Assim, averigua-se que tais elementos constituíram-se em dados estratégicos para que os objetivos propostos fossem alcançados.

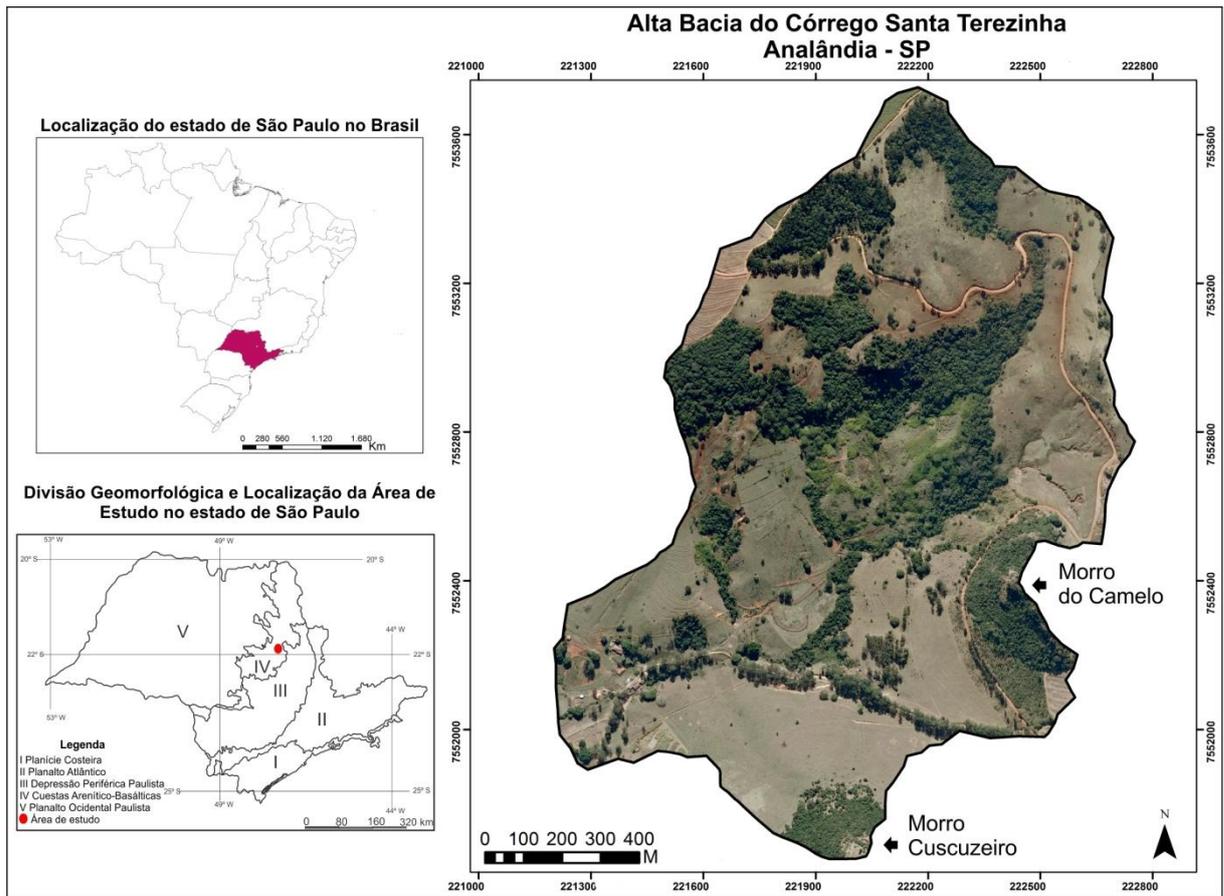


Figura 1 – Localização da área de estudo. Fonte: IPT - INSTITUTO PAULISTA DE TECNOLOGIA. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, 1981. Color. Escala 1:1.000.000. EMLPLASA – Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano. Projeto Mapeia São Paulo. São Paulo, 2010. Color. Escala 1:25000.

Assim, diante de um vasto número de variáveis a serem consideradas quando o assunto é a análise dos processos de degradação dos solos, entende-se que a granulometria (MAFRA, 1999; FRASER; STONE, 2016; LI *et al.*, 2018), a capacidade de infiltração (BABAEI *et al.*, 2018; ROSSI *et al.*, 2018), a resistência do solo à penetração (VAZ *et al.*, 2011; BAYAT *et al.* 2017), a permeabilidade (BERTOL; ALMEIDA, 2000; MOREIRA CÂNDIDO *et al.*, 2014) a declividade (MAHMOODABADI; SAJJADI, 2016; BAYAT *et al.* 2017), o fluxo acumulado (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012; SHIN *et al.*, 2019), o uso e ocupação da terra (CASANELLAS *et al.*, 2003; GUERRA; MARÇAL, 2009; CORRÊA, 2016; DEUSCHLE *et al.*, 2019) e a intensidade da precipitação (SHEN *et al.*, 2016) são fatores relevantes para a análise da erosão. Ademais, diferentes estudos dissertam sobre interações entre as variáveis apresentadas e compreendem: infiltração reduzida a partir do aumento de frações argilosas (LI *et al.*, 2018); resistência mais elevada de acordo com o aumento do teor de argila (VAZ *et al.*, 2011); maior resistência em solos com teor de umidade significativa quando submetidos a pastoreio (BAYAT *et al.* 2017); variações na resistência do

solo de acordo com os fatores topográficos e o uso da terra (BAYAT *et al.* 2017); redução da energia de escoamento superficial a partir do aumento da infiltração (SHIN *et al.*, 2019); e evolução de feições erosivas a partir de precipitações intensas e aumento da declividade (SHEN *et al.*, 2016).

Portanto, para avaliar a área selecionada e atingir os objetivos traçados, foram coletados em campo amostras de solos para granulometria e permeabilidade, bem como levantados dados de resistência do solo à penetração, infiltração, avanço do talude erosivo de uma voçoroca, remoção ou acumulação de material em superfície e dados pluviométricos. Submeteram-se os dados obtidos a procedimentos em laboratório, técnicas estatísticas, geoestatísticas e cartográficas. Em gabinete, foram produzidos mapeamentos morfométricos, das feições erosivas lineares e de uso da terra. A partir do tratamento desse conjunto de dados, geraram-se cartas de síntese do potencial ao avanço erosivo linear, validando-as a partir da área de ocorrência de feições erosivas lineares na bacia hidrográfica e através dos dados de monitoramento da evolução do talude erosivo da voçoroca oeste.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresenta-se a seguir o embasamento teórico-metodológico utilizado nesta pesquisa. Este é composto por uma revisão das definições e conceitos empregados em estudos sobre erosão e por trabalhos que sugerem caminhos para análise dos dados levantados durante o estudo.

2.1 A Teoria Geral dos Sistemas, complexidade e antropogeomorfologia.

Buscando analisar a dinâmica erosiva da área de estudo de forma holística, utilizou-se como categoria de análise desta pesquisa a paisagem, compreendendo-a como a relação interligada de elementos geográficos, em uma determinada porção do espaço, a qual resulta em uma combinação dinâmica, portanto, instável de elementos físicos, biológicos e antrópicos, que, reagindo uns com os outros, fazem da paisagem um conjunto único e indissociável que está em evolução (BERTRAND, 1972). A paisagem é composta por elementos e unidades que, por estarem em uma única categoria, interagem entre si, compondo, assim, um sistema (CHRISTOFOLETTI, 1979).

Assim, utilizaram-se neste estudo alguns princípios da Teoria Geral dos Sistemas, como os sistemas abertos (troca de matéria e energia, tanto em recebimento, como em perda), morfológicos (propriedades físicas dos fenômenos e as formas de seus elementos), em sequência (cadeia de subsistemas que se inter-relacionam) e controlados (ambientes que sofrem intervenção humana no fluxo de matéria e energia dos sistemas em sequência e na modificação dos sistemas morfológicos) (CHORLEY; KENNEDY, 1971). Tais sistemas são pertinentes à pesquisa, uma vez que a bacia hidrográfica estudada localiza-se em um setor com variações morfológicas consideráveis, representadas por diversos tipos de solos (KOFFLER *et al.*, 1993) e litologias (IG, 1984), as quais interagem entre si, com outros elementos da paisagem e estão submetidas há mais de 50 anos a usos voltados para pecuária e agricultura.

Desta forma, é importante um diálogo entre a Teoria Geral dos Sistemas e a ideia de sistemas complexos. A complexidade agregada aos sistemas pode ser compreendida como consequência da inter-relação entre elementos da natureza (CHOLLEY, 1964), da relação dos elementos da natureza com os seres humanos (LIMBERGER, 2006), e da interferência do ser humano através de suas ações e tecnologias no processo de auto-organização do sistema terrestre (CHRISTOFOLETTI, 1999, MURRAY, *et al.*, 2009). A interferência antrópica na

dinâmica de auto-organização do sistema caracteriza-se como uma forçante, a qual pode originar respostas não lineares do sistema, dificultando a capacidade de previsibilidade dos fenômenos e gerando incertezas (MURRAY *et al.*, 2009).

Compreendendo a complexidade agregada aos sistemas terrestres pela ação humana, que interfere na dinâmica evolutiva da natureza, identifica-se na Antropogeomorfologia uma possibilidade de análise desta interação. Tal área do conhecimento propõe o cruzamento e a comparação de dados históricos, socioeconômicos e geomorfológicos, compreendendo as intervenções antrópicas a partir de suas nuances de acordo com o país ou a região (NIR, 1983). Assim, têm-se algumas orientações analíticas, como: considerar a ação humana um elemento geomorfológico atuante na superfície terrestre; a interferência das ações humanas na morfodinâmica; analisar as interferências humanas através de uma perspectiva histórica em diversos espaços temporais; empregar a cartografia geomorfológica de detalhe; utilizar uma abordagem sistêmica integrada; levar em consideração os elementos morfoclimáticos e morfoestruturais da área de estudo (RODRIGUES, 2005).

Deste modo, entende-se a antropogeomorfologia como uma área do conhecimento que permite caminhos para a compreensão de realidades complexas. A erosão, que se constitui em um fenômeno natural altamente suscetível à ação humana permite, em muitos casos, que a complexidade se aloje em estudos sobre esse tema, garantindo diversidade na definição de conceitos sobre processos e formas.

2.2 Conceitos sobre erosão e estudos aplicados

A erosão dos solos ocorre nos cinco continentes do sistema terrestre, apresentando-se com diferentes formas e intensidades (FAO, 2015), fato que gera uma gama de definições e conceitos.

De acordo com algumas correntes geomorfológicas, a erosão do solo é definida como o processo de remoção de parte da camada superior de um solo através da ação da água, vento, gelo e/ou gravidade (KIRKBY; MORGAN, 1980; FAO, 2015), sendo tal material removido do local de ocorrência da erosão e seguido por um processo de arraste ou transporte (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012). Já outra corrente de pensamento também compreende as ações da água, vento, gelo e/ou gravidade como elementos que propiciam a erosão (GUERRA; GUERRA, 2010), no entanto definem que o processo erosivo é composto por um ciclo de erosão (GUERRA, 1987), caracterizado pelas etapas de desagregação

mecânica, decomposição química, transporte e deposição (FENDRICH *et al.*, 1997; GUERRA; GUERRA, 2010).

Guerra (1987), em um contexto aplicado à Geologia, contesta a separação entre períodos de erosão (remoção de material) e sedimentação (deposição de material), afirmando que erosão e sedimentação não se opõem no tempo e sim no espaço. Em um contexto geomorfológico, confirma-se tal afirmação, reforçando-se a ideia de um ciclo erosivo, que é contido por processos *onsite* (no local; desagregação mecânica e decomposição química) e *offsite* (fora do local; transporte e deposição) (GUERRA, 2016). Nesta pesquisa serão analisados os processos *onsite*.

Além disso, a erosão pode ser classificada em diferentes tipos, sendo alguns destes com destaque para ambientes com intensa ação das águas das chuvas, como é o quente e úmido. São esses: a erosão geológica ou normal, a qual é definida como uma erosão que ocorre em condições naturais e não perturbadas (FENDRICH *et al.*, 1997); a erosão laminar ou em lençol, classificada pelo escoamento difuso relacionado às condições do terreno (SALOMÃO, 1999; GUERRA; GUERRA, 2010); a erosão linear, a qual constitui-se pelo escoamento das águas das chuvas de forma concentrada em canais (SALOMÃO, 1999; GUERRA; GUERRA, 2010); e a erosão acelerada ou antropogenética, definida a partir da interferência humana em outros tipos de erosão (FENDRICH *et al.*, 1997; GUERRA; GUERRA, 2010).

Dentre as formas erosivas destacam-se aquelas vinculadas à erosão linear, a qual resulta em sulcos, ravinas e voçorocas. Tais formas erosivas apresentam duas definições principais, sendo estas debatidas a seguir.

A partir da compilação de algumas bibliografias (FURLANI, 1980; GOUDIE, 2004; AUGUSTIN; ARANHA, 2006; SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2008), podem-se classificar as feições erosivas lineares como:

Sulcos: pequenos canais que direcionam o fluxo de água do escoamento superficial, possuindo um entalhamento de centímetros de profundidade, uma baixa capacidade de transporte e ocorrência difusa.

Ravinas: cortes no relevo na ordem de metros a dezenas de metros, compostos por uma carga expressiva de materiais em seu interior, ocorrendo preferencialmente em áreas de fragilidade estrutural, alta declividade e encostas com material pouco consolidado.

Voçorocas: feições com formato de vale mais alargado do que as ravinas, atestando talude íngreme e suscetível a ocorrências de processos como: solapamento, *piping*, movimento de massa, escoamento de cabeceira, transferência de material por gravidade, queda de blocos e corrida de lama, sendo estes responsáveis por gerar feições específicas, como as alcovas e os dutos. As voçorocas poderão apresentar ou não canal fluvial, variando sua profundidade de 0,5 a 30 metros.

Já outro grupo de autores (LAL, 1990; FENDRICH *et al.*, 1997; SALOMÃO, 1999; GUERRA; GUERRA, 2010; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012) classifica as feições erosivas lineares como:

Sulcos: pequenos canais nos quais o fluxo superficial se concentra, sendo facilmente removidos por práticas agrícolas normais.

Ravinas: incisões no relevo, derivadas do trabalho erosivo das águas de escoamento, as quais promovem a formação de taludes laterais, sem vegetação. Nesse estágio, são diversas as formas com que a erosão se processa, sendo, portanto, necessárias técnicas variadas e complexas para sua contenção e estabilização.

Voçorocas: feição na qual ocorre o desmonte do solo a partir do afloramento do nível freático, ocasionando processos mais intensos e complexos que em ravinas, derivados do escoamento tanto de superfície, como de subsuperfície.

Mediante as definições apresentadas, entende-se nesta pesquisa erosão como o setor de ocorrência de desagregação de material e emprega-se à proposta de definição de feições erosivas, apresentada pelo primeiro conjunto bibliográfico, analisando que, principalmente no que tange as feições erosivas do tipo voçoroca, a bibliografia permite uma compreensão mais adequada das feições encontradas no setor de estudo, pois representam, em sua maioria, canais pluviais temporários, assim como feições específicas como as alcovas.

Também é válido destacar alguns processos que contribuem para origem e desenvolvimento de feições erosivas lineares. De acordo com Lal (1990), a erosão do solo ocorre a partir de processos naturais, como a erosão geológica, responsável pela evolução das formas de relevo; e processos acelerados, os quais podem derivar da interferência humana no ambiente, a qual pode ocasionar uma taxa de erosão maior que o processo pedogenético. Para compreensão do desenvolvimento de feições erosivas, ainda é importante entender a ação de alguns elementos, como os fluidos (água), o vento e a gravidade, os quais desenvolverão

processos geomorfológicos, como escoamento de superfície e subsuperfície, a abrasão e os fluxos de massa (LAL, 1990).

A ação denudativa das águas abrange grande porção da superfície terrestre, atuando, especialmente, em áreas do globo sob o domínio do clima tropical, sendo que nestes setores os totais pluviométricos apresentam-se elevados e concentrados em determinadas épocas do ano (LAL, 1990; GUERRA, 2010). Os eventos de chuva, quando contínuos e intensos, podem saturar os solos e reduzir o cisalhamento do material, tornando-o suscetível a processos erosivos acelerados (VALENTIM *et al.*, 2005; LUFFMAN *et al.*, 2015).

Ao analisar a interação entre as águas das chuvas e os solos, considera-se a capacidade de infiltração como um elemento de suma importância (GUERRA, 1999). Como se trata de uma relação entre água e solo, o material pedológico e sua porosidade terão relevância na capacidade de infiltração (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012). Assim, entende-se que solos com predominância de granulometria arenosa tenderão a ter taxas de infiltração mais elevadas (SILVA, 1999) em comparação a solos com fração granulométrica mais argilosa, que tendem a ser mais repelentes à água (LI *et al.*, 2018). Destaca-se ainda que a infiltração constitui-se em um fenômeno com grande variabilidade espacial (BABAEI *et al.*, 2018; ROSSI *et al.*, 2018), uma vez que a não linearidade de dados hidráulicos pode estar associada a altas variabilidades nas características do material pedológico (BONTA, 2005).

Havendo dificuldade nos processos de infiltração e percolação da água, poderá ocorrer um aumento do escoamento superficial (AYRES, 1960), pois, a partir da diferença textural (AYRES, 1960), ou da energia potencial do escoamento superficial (SHIN *et al.*, 2019), poderão desenvolver-se canais preferências, os quais, mediante características hidráulicas dos materiais da zona de percolação superficial e subsuperficial, assim como características do comportamento piezométrico do nível freático de uma determinada vertente, poderão ocasionar o surgimento de ravinas e/ou voçorocas (SALOMÃO, 1999).

Outro fator de relevância no que concerne à influência sobre os processos erosivos hídricos é a topografia, a qual pode interferir na velocidade de escoamento e no volume das enxurradas, através do declive e do comprimento da rampa, respectivamente. Em ambas as variáveis, a interferência se dará quanto à energia cinética da enxurrada, uma vez que declives mais acentuados e rampas mais extensas agregam mais energia às águas de escoamento superficial e, conseqüentemente, resultam em maior potencial erosivo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012; MAHMOODABADI; SAJJADI, 2016).

Também a vegetação tem uma ligação direta com a erosão hídrica, uma vez que, a depender da continuidade do dossel, alguns processos geomorfológicos clássicos (*splash* e *runoff*) terão seu potencial energético reduzido, fazendo com que a energia efetiva para ocorrência de processos erosivos não apresente alto potencial denudacional (SHIN *et al.*, 2019). Vertentes com vegetação esparsa podem apresentar ainda duas vezes mais perda de material em relação às vertentes densamente vegetadas, assim como vertentes desnudas chegam a perder até nove vezes mais materiais que vertentes parcialmente florestadas (NORTCLIFF *et al.*, 1990)

Ainda, destaca-se o fator geológico, que poderá ser responsável pela presença de setores de fragilidade do relevo, evidenciados através das características das litologias e presença de falhamentos, os quais dinamizam a evolução do relevo, assim como geram suscetibilidade a ocorrências de feições erosivas (FACINCANI, 2000; POPIT *et al.*, 2014) como as ravinas (GHOSH *et al.*, 2018) e as voçorocas (VALENTIM *et al.*, 2005).

Por fim, entende-se que a compreensão das características dos terrenos é de suma importância para o entendimento da dinâmica erosiva da área de estudo, sendo que os estudos apresentados a seguir constituem-se em exemplos que buscam classificar qualitativamente e quantitativamente a ação erosiva.

2.3 Pesquisas aplicadas a estudos de erosão

Atualmente, diversas vêm sendo as tentativas de compreender a ocorrência, o ritmo e as tendências evolutivas dos processos erosivos ao redor do mundo, sendo grande parte dessas pautadas no entendimento do limiar entre a influência humana e a dinâmica natural desse fenômeno. Assim, apresentam-se nessa seção trabalhos de relevância para análise da influência de elementos naturais e antrópicos nas tendências evolutivas de feições erosivas lineares.

Casanellas *et al.* (2003) afirmam que a ação humana, no que concerne à eliminação da cobertura vegetal com fins para agricultura de cultivo intensivo e o superpastoreio, acarreta processos de degradação dos solos, destacando a questão do menor aporte e mineralização da matéria orgânica e a compactação. As referidas variáveis poderão acarretar a degradação da estrutura do solo, menor infiltração e maior escoamento superficial, elementos que potencializam a atuação dos processos erosivos e a consequente diminuição da matéria orgânica (CASANELLAS *et al.*, 2003). Para Mafra (1999), a diminuição progressiva do

horizonte superficial do solo interfere no equilíbrio do trinômio água-solo-plantas, fazendo com que as novas condições para implementação de uma determinada espécie vegetal se tornem pouco favoráveis.

No que se refere ainda a áreas de pastoreio, Gale e Haworth (2005), em estudo aplicado ao nordeste australiano, discutem a questão dos solos que possuem características abruptas, ou seja, com horizontes superficiais de granulometria diferente dos horizontes de subsuperfície, destacando-se a necessidade de compreensão desses setores como complexos, uma vez que a ação de pisoteio desenvolvida pelos animais terá um comportamento nas camadas superficiais do solo e outro nas camadas internas, fazendo com que a disponibilidade de material para destacamento possa ser alterada na transição de um horizonte para o outro.

Já no que corresponde às áreas com fins agrícolas, muitas vezes, encontra-se resistência dos proprietários da terra em demandarem recursos para técnicas de prevenção ou contenção erosiva. Nesse sentido, Valentim *et al.* (2005) apresentam, em estudos aplicados no norte do Laos, uma perspectiva de conscientização econômica dos proprietários através da quantificação da perda de receita. Assim, constatam que, em uma área com cultivo de arroz atingida por sulcos erosivos, as perdas econômicas podem chegar a 29% e, em setores atingidos por voçorocas, chegam a 37% do total de receitas. Além disso, atesta-se o aumento nos custos em áreas com cultivo de arroz e ocorrência de voçorocamentos, uma vez que as feições erosivas se constituirão em redutos para plantas daninhas, fornecendo exemplares destas para áreas circunvizinhas. Nestes casos, os custos com controle de pragas e limpeza do local podem chegar a 67,1% do valor total empregado para o controle de voçorocas (VALENTIM *et al.*, 2005).

Maeda *et al.* (2010) alertam também para a necessidade de compreender a interação entre as mudanças climáticas locais e a erosão do solo. Segundo os autores, em estudo aplicado à região dos montes Taita, no Quênia, as mudanças climáticas locais vêm ocasionando chuvas mais concentradas e intensas em alguns meses do ano, fator que contribui para a potencialização de processos erosivos na região. De acordo com os modelos de simulação de uso da terra e mudança de cobertura da terra (LUCC), o Fator C aumentou de 0,165 em 1987, para 0,181 em 2003, sendo possível prever que, no ano de 2030, ocorrerá um aumento na perda do solo de 8,8%, atingindo 0,197 no Fator C. Tal aumento é acompanhado pelo crescimento do uso agrícola no setor, que, no ano de 2030, deve ocupar 60% da área de 850 km².

Ainda do ponto de vista climático, Nadal-Romero *et al.* (2015) desenvolveram estudo aplicado à Espanha, buscando correlacionar os tipos de massa de ar com o aumento ou diminuição da erosão. Assim, a partir da identificação do rumo das chuvas e dos dados de erosão, precipitação, escoamento laminar e quantidade de sedimentos nos cursos fluviais, identificaram que as maiores taxas de erosão ocorreram em áreas que receberam frentes de chuva provenientes de NW, S e SW, sendo que a maior ocorrência de eventos extremos é identificada em áreas que recebem chuvas de rumos variados. Assim, alude-se para a importância de compreender as variáveis climáticas no que se refere a estudos sobre processos erosivos.

Já no que concerne à retirada da cobertura vegetal e variações climáticas, Valentim *et al.* (2005) descrevem um dado de relevância obtido através de datações com C14, apresentando que os períodos históricos com maiores taxas de erosão na Europa constituem-se por uma combinação de altas taxas de desmatamento e precipitações extremas ocorrentes entre os séculos XIV e XVII. Assim, Nortcliff *et al.* (1990), em estudo aplicado a Ilha da Maracá, localizada ao norte do estado brasileiro de Roraima, reafirmam que a perda de solo em vertentes desnudas é algo que merece atenção. Nortcliff *et al.* (1990) realizaram seu estudo, no período de 25 de julho a 26 de outubro de 1987, em solos com textura variando entre arenosa e muito argilosa, constatando perdas de solos na ordem de 5,14kg em áreas florestadas; 10,26kg em setores parcialmente florestados, e 93,83kg em áreas totalmente descampadas. Bhattacharyya *et al.* (2011) também corroboram com esta perspectiva, através de estudo aplicado no Reino Unido, durante os meses de janeiro de 2007 a janeiro de 2009. No período, registrou-se precipitação total de 1.776 mm, em solo areno-argiloso e com declividade média de 15°, constatando uma perda média de solo, em setores sem cobertura, de 0,045 kg m⁻² e de 0,0005 kg m⁻², em parcelas com coberturas herbáceas.

Destacam-se também nesta seção estudos estatísticos e geoestatísticos que buscam diminuir o grau de incerteza nos dados prognósticos, além de permitir compreender algumas questões sobre a complexidade em ambientes com o desenvolvimento de feições erosivas.

Assim, Pereira *et al.* (2013), em estudo aplicado às áreas atingidas por queimadas na Lituânia, buscaram compreender, através de tratamentos estatísticos, a interação entre espessura do pacote de cinzas e o desenvolvimento erosivo. Para isso, utilizaram o *software* IBM SPSS, explorando a coleção de modelos estatísticos ANOVA, os quais permitiram o tratamento dos dados espacializados através de uma malha de pontos e a submissão destes à

testes não paramétricos. A partir dos índices gerados, interpolaram-se as informações numéricas através do método *kriging*, disponível no ArcGis. Assim, foi possível estimar, dentre outros fatores, a variabilidade espacial das cinzas em relação ao tempo de análise, elemento que impacta diretamente na erosão hídrica.

Em estudo similar, Francos *et al.* (2018a) analisam as interferências das queimadas na composição química dos solos através dos pacotes estatísticos IBM SPSS e CANOCO. A amostragem é composta por 18 anos de levantamento. Assim, os modelos de tratamento de dados, ANOVA, foram empregados para garantir comparação adequada entre as informações químicas dos solos e suas alterações em relação ao tempo pós-evento de queimada. Ainda Francos *et al.* (2018b), em setores submetidos a práticas de manejo florestal e queimas prescritas, identificam um bom desempenho dos pacotes estatísticos supra citados, obtendo resultados qualitativos através de uma análise de redundância (RDA). Dentre os resultados, destaca-se uma comparação qualitativa entre setores submetidos a queimas prescritas e setores atingidos por incêndios florestais.

Em uma perspectiva geoestatística, Outeiro *et al.* (2008) estudaram a evolução de feições erosivas através de tratamentos geoestatísticos. Para isso, desenvolveram os estudos em uma área experimental atingida por queimadas e localizada no setor leste da Península Ibérica. Para o tratamento dos dados, utilizam o *software* GS+ v7 e *GeoStatistical Analysis*, os quais possibilitaram o uso de funções vinculadas a semivariogramas, interpolação dos valores médios, dependência espacial, força da estrutura espacial e o índice de resposta temporal. Destaca-se que, dentre as variáveis levantadas pelos autores, estão a granulometria e o volume de chuvas. Outro exemplo de uso dos semivariogramas é o trabalho de Mathias (2016), no qual se aplica o método estatístico aos dados de infiltração, resistência do solo à penetração e granulometria. Para tal intento, utiliza-se o *software* VARIOWIN para gerar os parâmetros, exportando-os para o ArcMap e realizando o tratamento geoestatístico.

Ainda, utilizando os índices de correlação, mais especificamente do coeficiente de correlação de Pearson, Zanatta *et al.* (2017) identifica, através do cruzamentos dos dados de uso da terra e geomorfológicos, uma estreita correlação entre o aumento de áreas de pastagem e canais fluviais com fundo de vale plano e feições erosivas lineares, uma vez que as variáveis obtiveram em quase todos os processamentos uma correlação perfeita.

Diante desta revisão bibliográfica, buscou-se associar a esta pesquisa metodologias de análise que permitissem a compreensão das variáveis pedológicas, morfométricas e de uso

e ocupação da terra da bacia hidrográfica em questão. Variáveis estas que, uma vez compreendidas, apresentaram relevância na interpretação e na delimitação das tendências ao avanço das feições erosivas identificadas.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica pesquisada localiza-se no município de Analândia (SP), entre as latitudes 22°6'0"S e 22°7'0"S e as longitudes 47°41'30" e 47°42'0", no setor *cuestiforme* denominado de Serra do Cuscuzeiro. Constitui-se em parte da Alta Bacia do Córrego Santa Terezinha, o qual é afluente no Rio Corumbataí. A seguir, apresenta-se uma caracterização dos elementos fisiográficos regionais, com destaque para o relevo, a litologia, a vegetação, o clima e os solos, além de uma caracterização do uso e ocupação da terra de áreas congruentes e adjacentes à dessa pesquisa.

A área pesquisada posiciona-se no setor leste da Bacia Sedimentar do Paraná. Esta unidade é classificada por Casseti (2001) como a segunda maior bacia sedimentar do Brasil, caracterizando-a com quatro mil metros de espessura no que se refere ao pacote sedimentar. Sobre a Bacia Sedimentar do Paraná ocorre a zona de contato entre o compartimento da Depressão Periférica Paulista (assim denominada no Estado de São Paulo) e o relevo *cuestiforme*. O primeiro compartimento constitui-se em uma área rebaixada por processos erosivos, sendo delimitado a leste pelas terras altas do Planalto Atlântico e a oeste pelas *Cuestas* Basálticas. O segundo origina-se na borda dos derrames basálticos de São Paulo e apresenta-se como elevada e festonada *cueta*, tendo a leste a área de circundenudação paulista e a oeste o Planalto Ocidental (ALMEIDA, 1974).

A Depressão Periférica Paulista pode ser subdivida, ainda, em três zonas: a do Médio Tietê, do Paranapanema e do Mogi-Guaçu. A Zona do Médio Tietê, na qual a área de estudo se localiza, encontra-se delimitada pelos divisores de águas da bacia do rio Tietê com as dos rios Mogi-Guaçu e Paranapanema (ALMEIDA, 1974). De modo geral, a topografia desta zona é pouco movimentada, apresentando desníveis regionais que chegam ao máximo de 200 m (ALMEIDA, 1974) e declividades entre 5% e 10% (ROSS; MOROZ, 1997). A dissecação do relevo é classificada como média, apresentando vales entalhados e densidade de drenagem que varia de média à alta. Esta área apresenta ainda grande susceptibilidade erosiva devido às amplas regiões de terrenos dissecados a leste, onde se encontram arenitos provenientes das Formações Botucatu e Pirambóia (ROSS; MOROZ, 1997).

Salientam-se nas adjacências da Zona do Médio Tietê os relevos *cuestiformes*, onde se identificam camadas de litologias de resistências variadas, tendo destaque topográfico no relevo da região as mais resistentes (IPT, 1981a), provenientes dos derrames basálticos. Esses exercem a função de carapaça para o relevo *cuestiforme* e possibilitam menor degradação por

parte dos agentes erosivos. Para Almeida (1949), os derrames basálticos das *cuestas* possuem em média 300 m de espessura, podendo ocorrer derrames basálticos na ordem de 1000 m, como em Santa Catarina, onde se formam extensas barreiras à evolução de tal relevo.

Christofolletti e Queiroz Neto (1961), em estudo realizado na Serra de Santana, região adjacente à área deste estudo, também relatam a ocorrência de derrames basálticos, subdividindo-os em três conjuntos: o superior, responsável por capear os espigões mais altos da Serra de Santana; o intermediário, indicado como sustento das escarpas da Serra; e o inferior, onde há a origem da soleira estrutural na qual se desenvolve grande parte do planalto de Campo Alegre.

São importantes modeladores do relevo na Zona do Médio Tietê as drenagens de curso obsequente responsáveis por dissecarem numerosos *fronts* serranos festonados, relevos tabulares - em alguns casos isolados - e morros testemunhos que caracterizam fortemente o relevo da área pesquisada (ALMEIDA, 1974).

No que se refere à litologia (Figura 2), a área de estudo está localizada, segundo mapeamento do Instituto Geológico (1984), sobre as formações Itaqueri e Santa Rita do Passa Quatro, além de possuir afloramentos dos depósitos mesozóicos do Grupo São Bento, compreendidos pelas formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral.

A Formação Itaqueri constitui-se em uma formação pós-basáltica, dotada de arenitos com cimentação argilosa, carapaças ferruginosas, folhelhos e conglomerados. Atesta a ocorrência de condições climáticas do tipo savana, uma vez que apresenta déficit hídrico (FACINCANI, 2000). De acordo com Ricomini (1997), a sedimentação da Formação Itaqueri ocorreu sob condições de média à alta energia, sendo os leques aluviais bem desenvolvidos na Serra de Itaqueri e no flanco leste da Serra de São Pedro, com contribuição mais arenosa no rumo oeste e noroeste. Ricomini (1997) afirma ainda que a Formação Itaqueri foi submetida a processos de tectonismo deformador, principalmente falhas e juntas, sendo as falhas em um eixo de tensão principal máxima, orientação NW, horizontal; eixo de tensão principal mínima, NE, horizontal; e eixo intermediário, vertical, direção geral WNW a E-W.

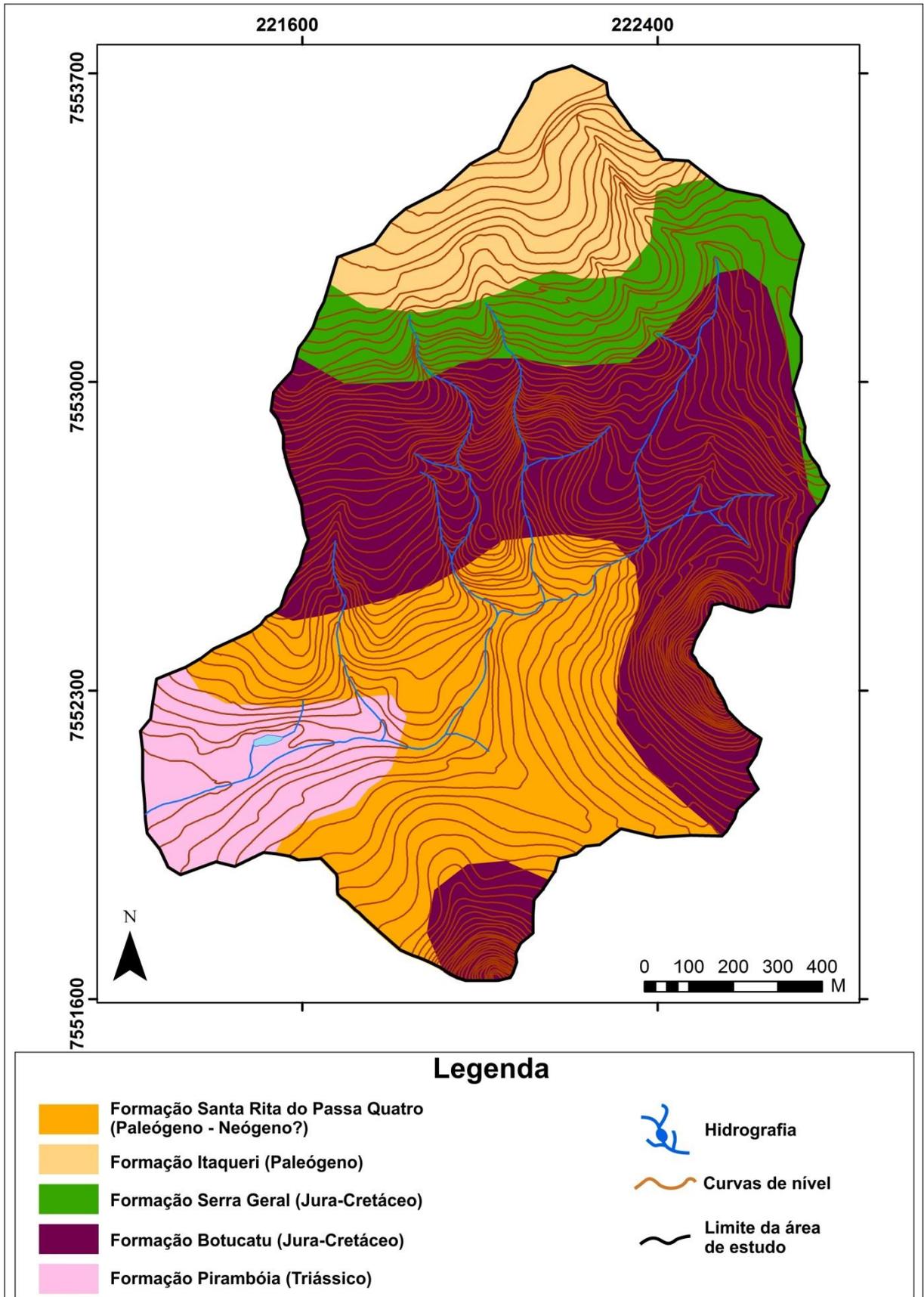


Figura 2 –Formações Geológicas de Superfície. Fonte: IG. Folha Geológica de Corumbataí (SF-23-Y-A-I-2): Formações Geológicas de Superfície. São Paulo: Instituto Geológico, 1984. Escala 1:50.000.

A Formação Santa Rita do Passa Quatro tem sua origem atrelada aos depósitos cenozóicos, sugerindo uma deposição com características colúvio-aluvial. É formada por sedimentos de areias finas, compostos majoritariamente por quartzo e apresentando de 77% a 94% de areia, onde se evidenciam *stone lines* constituídas de quartzo e fragmentos de limonita (FACINCANI, 2000). Esta unidade caracteriza-se ainda por ocupar posições em topos aplainados (declividades inferiores a 2%) e apresenta as seguintes características identificadoras: comportamento não-laterítico e alta erodibilidade (SILVA *et al.*, 2005).

As formações Pirambóia e Botucatu são constituídas basicamente por arenitos finos e representam ciclos de sedimentação que refletem alternâncias climáticas, ou seja, de condições quentes e úmidas para desérticas (ALMEIDA; BARBOSA, 1953, *apud* FACINCANI, 2000, p.30).

A Formação Pirambóia, segundo IPT (1981b), data do período entre o Triássico Inferior e o Jurássico Superior. Possui estratificação cruzada do tipo diagonal, apresentando sedimentos de origem fluvial relacionados a rios meandranes e pequenas lagoas com condição climática dominante de oxidação. Salientam-se também estruturas deformacionais produzidas por deslizamentos, como: estruturas convolutas e brechas intraformacionais (BÓRIO, 1973). A faixa de afloramento da Formação Pirambóia no estado de São Paulo estende-se desde a divisa com o Paraná até Minas Gerais, possuindo larguras entre 5 km e 50 km; constituindo-se em uma das unidades de maior ocorrência no centro-leste paulista (LANDIM *et al.*, 1980). A espessura da Formação Pirambóia é de, no máximo, 300 m na Bacia do Rio Tietê, reduzindo-se para sul e para nordeste do estado de São Paulo (ZAINÉ, 1994).

A Formação Botucatu tem sua idade estabelecida como do Triássico-Médio Superior ao Cretáceo Inferior (IPT, 1981b). Sua deposição ocorreu em um ambiente predominantemente desértico, com intercalações de sedimentos fluviais e lacustres (SCHNEIDER *et al.*, 1974), sendo ainda, característica fundamental desta unidade a presença constante de estratificação cruzada em grandes cunhas, representando paleodunas (ZAINÉ, 1994). Formada em grande parte por arenitos silicificados, possui apenas nas parcelas mais altas do relevo pontos em contato com rochas eruptivas que caracterizam a Formação Serra Geral. A Formação Botucatu apresenta também espessura muito variável, raramente ultrapassando 150 metros, estando sua média entre 50 e 70 metros de espessura.

Por fim, a Formação Serra Geral compreende a sequência de rochas vulcânicas, predominantemente composta por lavas basálticas, de composição toleítica e coloração cinza a preta com amígdalas no topo dos derrames, sendo intercalada por delgadas camadas de arenitos intertrapianos (ZAINÉ, 1994). Assim, a Formação Serra Geral origina-se de um intenso vulcanismo de fissura iniciado sob o domínio climático desértico da Formação Botucatu, indicando idades de 120 e 130 milhões de anos (LENIZ, 1949 *apud* FACINCANI, 2000, p.32). Seu início ocorre no término do Jurássico e seu desenvolvimento é datado do Cretáceo Inferior (FACINCANI, 2000). Assim, a Formação Serra Geral caracteriza-se como uma sequência de derrames basálticos, diques e soleiras de formação intrusiva, além de possuir camadas arenosas que capeiam as formações gondwânicas da Bacia do Paraná (IPT, 1981b).

Ainda, a Serra do Cuscuzeiro está submetida a uma expressiva ocorrência de fraturas e falhas que contribuem para evolução do relevo *cuestiforme* (PINTON, 2016). De acordo com Pinton (2016), o alinhamento dos córregos do Cavalheiro (NW-SE) e Santa Terezinha (NE-SW), localizados no setor leste da Serra, atestam a orientação preferencial da hidrografia, sendo que o cruzamento destes com lineamentos N-S, que acompanham a linha de ruptura dos morros testemunhos do Camelo e do Cuscuzeiro, confirma a influência de estruturas falhadas no processo de esculturação e separação destes morros do *front cuestiforme*.

Também, identifica-se na área, segundo mapeamento de Facincani (2000), grande contingente de Sedimentos Continentais Quaternários de origem colúvio-aluvial e que formam planícies e baixos terraços fluviais, rampas de colinas amplas e rampas e terraços elevados. Tais elementos datados do Quaternário são de grande importância nesse estudo, sendo que, segundo Ab'Sáber (1969), os materiais datados do Quaternário são responsáveis pela roupagem final das paisagens terrestres, constituindo a estrutura superficial da paisagem.

No que concerne aos solos da área, a parcela contida no domínio da Depressão Periférica é formada basicamente pelos processos pedogenéticos atuantes sobre o arenito. Os arenitos são responsáveis por agregar aos solos desta região textura arenosa, predomínio de macroporos (alta infiltração, percolação e lixiviação) e pHs variando entre 4,5 e 5,5. Já a parcela do relevo *cuestiforme* apresenta arenitos e basaltos como rochas de origem de seus solos, sendo estas responsáveis por solos com textura argilosa ou argilo-arenosa, bem como o com predomínio de microporos responsáveis por reter bom contingente de água por capilaridade (TROPMAIR, 2000).

Koffler *et al.* (1992) realiza uma caracterização mais específica da área deste estudo, elencando, através de mapeamento pedológico em escala de 1:50.000, quais solos podem ser encontrados no *front*, talus e reverso da *cuesta* (Figura 3). Visando a uma atualização dos dados pedológicos, apresentam-se os solos com as nomenclaturas definidas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da EMBRAPA (2006).

De acordo com Kloffler *et al.* (1992), o *front* da *cuesta* caracteriza-se pela associação entre NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e NITOSSOLOS Eutróficos ou Distróficos da Unidade Estruturada. De acordo com a EMBRAPA (2006), os NEOSSOLOS LITÓLICOS são pouco evoluídos, sendo que o horizonte A se encontra assentado diretamente sobre um horizonte C ou Cr ou sobre material com mais de 90% de seu volume constituído por fragmentos rochosos. Alho *et al.* (2007) destaca ainda a necessidade de atenção para com o uso empregado em áreas de NEOSSOLOS LITÓLICOS, haja vista o baixo grau de intemperização e a vulnerabilidade no desenvolvimento de processos erosivos. Já os NITOSSOLOS Eutróficos ou Distróficos da Unidade Estruturada apresentam, de acordo com Oliveira e Prado (1984), textura argilosa ou muito argilosa; grande homogeneidade vertical em cor; espessura do *solum* superior a 120 cm; e horizonte B3 podendo apresentar estrutura fraca e friável. De acordo ainda com o Instituto Agrônomo de Campinas - IAC (2014), os Nitossolos possuem estrutura que favorece a retenção de água, mas que mantêm boa drenagem, propriedades físicas extremamente desejáveis em condições de sazonalidade climática e estação seca prolongada, destacando, ainda a necessidade de práticas de conservação para prevenção de processos erosivos.

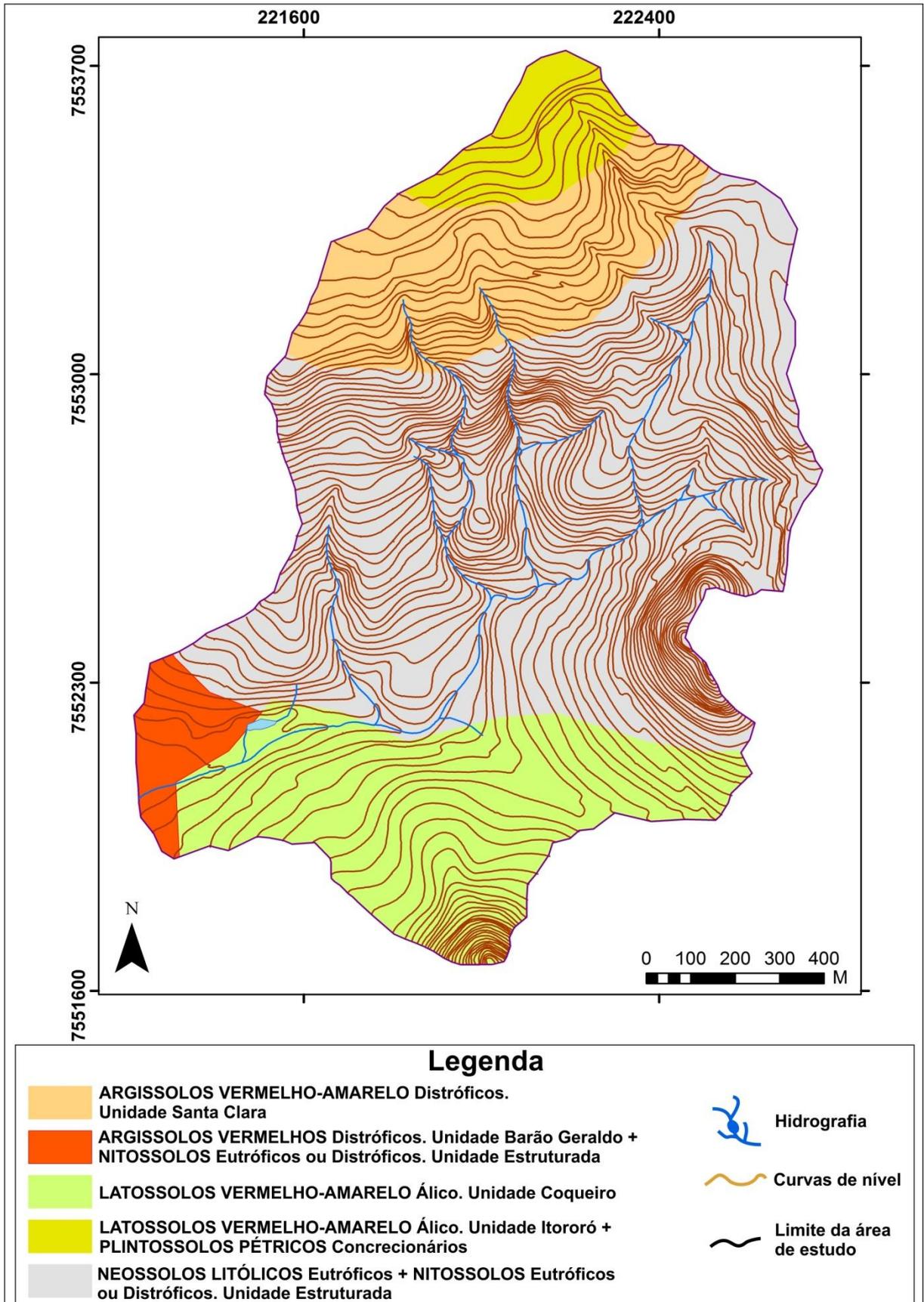


Figura 3 – Solos da Área de Estudo. Fonte: KOFFLER, N. F.; MACHADO, M. L. de. A.; DAROS, E.; PROCHNOW, E. A. Solos da bacia do Rio Corumbataí. Rio Claro: Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 1992. Escala: 1:50.000.

De acordo com o mapa pedológico de Kloffler *et al.* (1992), encontram-se nos setores de talus LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO Álicos da Unidade Coqueiro, ARGISSOLOS Vermelhos Distróficos da Unidade Barão Geraldo e NITOSSOLOS Eutróficos ou Distróficos da Unidade Estruturada. Os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO Álicos da unidade Coqueiro são classificados, por Oliveira e Prado (1984), com textura média; horizonte B apédico ou com estrutura subangular fraca, com teor de argila inferior a 20% e predominância de areia grossa sobre a fina. São solos provenientes de arenitos, tendo elevada permeabilidade, baixa retenção de água e baixa coesão, o que os torna sensíveis à degradação sob manejo agrícola (IAC, 2014). Os ARGISSOLOS VERMELHOS Distróficos da Unidade Barão Geraldo apresentam, de acordo com Oliveira e Prado (1984), textura muito argilosa ou argilosa; teor de areia grossa inferior a 20%; e horizonte B2 apédico, com estrutura subangular fraca e consistência friável ou muito friável.

Por fim, no reverso, identificam-se os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELO Distróficos da Unidade Santa Clara, os LATOSSOLOS VERMELHO AMARELO Álicos da Unidade Itororó e os PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários. Os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELO Distróficos da Unidade Santa Clara apresentam horizonte A proeminente ou chernozênico; abundância de cascalhos e calhaus no horizonte A e B; espessura do horizonte A+B inferior a 150 cm; elevado teor de minerais primários facilmente intemperizáveis; estrutura e cerosidade bem desenvolvidas no horizonte B2; e material de origem vinculado às fáceis conglomeráticas da Formação Itaqueri (OLIVEIRA; PRADO, 1984). Os LATOSSOLOS VERMELHO AMARELO Álicos da Unidade Itororó possuem, de acordo com Oliveira e Prado (1984), horizonte A proeminente; textura do horizonte B argilosa ou muito argilosa, em função do material de origem ser suprabasáltico; constituindo solos muito profundos e muito friáveis. Já os PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários são compostos por material mineral, no qual se identificam horizontes litoplínticos ou concrecionários, sendo pouco profundos, porém, com mais de 30% de terra fina argilosa ou muito argilosa, a qual não apresenta crescimento substancial ao longo do perfil (OLIVEIRA; PRADO, 1984).

Sobre tais condições de solo, relevo e litologia encontram-se na área deste estudo, na parcela da Depressão Periférica e reverso da *cuesta*, fragmentos de Cerrado, confinados em pequenas áreas e em unidades de conservação. Identificam-se ainda fragmentos de Mata Atlântica, que estão normalmente associados às manchas de Nitossolos, provenientes da Formação Serra Geral (TROPMAIR, 2000). Na área do *front* da *cuesta*, devido à sua

topografia, predomina a Mata Latifoliada Tropical de Encosta que apresenta espécies arbóreas de porte médio (10 a 15 metros), com sistema radicular pouco profundo. O capeamento arenítico do reverso da *cuesta* possibilita ao solo da região alta taxa de infiltração de água, abastecendo fortemente o lençol freático que dá origem a diversas nascentes e pequenos riachos que possibilitam a formação de Matas de Grotão ou Galeria (TROPMAIR, 2000). O dossel da região deste estudo varia ainda de 20 a 25 metros, apresentando indivíduos emergentes (ALMEIDA, 2001). Tal vegetação vincula-se diretamente às condições climáticas locais.

De acordo com Brino (1973), Analândia possui ocorrência de chuvas, em média, durante 82 dias do ano, totalizando média pluviométrica anual de 1.272,7 mm. Segundo o autor, o mês mais chuvoso do ano constitui-se em janeiro, no qual o índice pluviométrico ultrapassa 215 mm, tendo como mês mais seco julho ou agosto, com média pluviométrica que alcança os 30,9 mm. Brino (1973) constatou ainda temperatura média da área entre 19 e 18,5 °C, ocorrendo no mês de janeiro temperaturas médias na casa dos 22°C e no mês de julho temperaturas médias na casa dos 15,5°C.

No que concerne ao uso e ocupação da terra, Pinton (2011) em estudo aplicado à bacia do Córrego Cavalheiro, área vizinha ao setor aqui analisado, constata que em, 1962, 53,2%, da área era ocupada por pastos limpos, 26,1% por pastos sujos e 11,8% por mata. Já em levantamento do cenário de 2007, o autor constatou 53,5% da área recoberta por pastos limpos, 13,1% por mata e 10,2% por cana-de-açúcar. Assim, o autor verificou a chegada intensiva da monocultura canavieira. Ademais, Stefanuto e Lupinacci (2017b), em estudo mais recente, aplicado também em área congruente, atestaram que, no que concerne ao uso e ocupação da terra no setor estudado, as áreas com pasto limpo foram preponderantes nos três anos analisados (1962, 1988 e 2010), ocupando em 1962, 95,1% da área; em 1988, 84,8%; e em 2010 73,2%. A maior mudança no uso da terra foi constatada pelos autores na classe vegetação arbórea, que apresentou crescimento contínuo nos três cenários, ocupando em 1962, 2,4% do setor; em 1988, 13%; e em 2010, 22%. Assim, o aumento da classe vegetação arbórea atesta um uso da terra menos intenso do setor.

Portanto, buscando compreender de maneira integrada os dados apresentados, considera-se que, a partir do predomínio atual de um clima quente e úmido com altas taxas pluviométricas, que possibilitam a formação de inúmeros canais fluviais e intensa dinâmica do escoamento de superfície, a área desta pesquisa apresenta processos morfogenéticos

influenciados de forma marcante por esses fenômenos. Os canais fluviais, assim como o escoamento de superfície, adquirem, sobretudo, no *front cuestasiforme*, intensa energia de fluxo. Essa energia é propiciada pela elevada recarga hídrica, advinda da alta taxa de infiltração, percolação e retenção de água, associada à Formação Itaqueri, localizada no reverso da *cuesta*. Essa energia, combinada com os solos da região que possuem, em sua maioria, textura arenosa com a presença de macro-poros, propicia o desenvolvimento de feições erosivas. A ação erosiva principalmente sobre o *front* da *cuesta* é amenizada em alguns setores pela vegetação arbórea de porte médio. Contudo, parte desses elementos fisiográficos vem sendo alterados ou transformados pelo uso e ocupação da terra da região, fato que colabora para o desenvolvimento de feições erosivas aceleradas.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Serão descritos neste tópico os procedimentos técnicos para o levantamento de dados em campo, os procedimentos operacionais padrão para obtenção da granulometria e permeabilidade e os processamentos de dados em gabinete para formulação dos produtos cartográficos.

4.1. Procedimentos técnicos para o levantamento de dados em campo

Apresentam-se a seguir os procedimentos técnicos desenvolvidos em campo visando ao monitoramento do talude erosivo de uma voçoroca, a mensuração da dinâmica dos materiais de superfície do entorno do talude, a precipitação e a coleta de dados para compreensão das características e do comportamento dos materiais da bacia hidrográfica. O período de monitoramento da voçoroca, de mensuração da dinâmica de superfície e de coleta dos dados pluviométricos foi de março de 2017 a abril de 2019. Já as técnicas para análise do comportamento dos materiais foram aplicadas durante o período úmido (janeiro de 2018) e o período seco (julho e agosto de 2018).

4.1.1 Monitoramento do talude erosivo da voçoroca oeste

Inicialmente, selecionou-se uma voçoroca localizada no extremo oeste da área de estudo (Figura 4), a qual possui talude erosivo íngreme e vale alargado, além de estar situada em uma área de uso agrícola voltada para pecuária desde 1962. Para o monitoramento do talude erosivo, utilizaram-se estacas de erosão (GUERRA, 2002; MATHIAS, 2016), as quais foram instaladas no dia 31 de março de 2017, realizando-se algumas adaptações nas técnicas.

Primeiramente, buscando garantir uma boa precisão ao monitoramento do talude e um critério métrico para instalação das estacas, construiu-se um esquadro (LEAL; RODRIGUES, 2011), o qual garantiu que todas as estacas fossem fixadas a 97 cm do talude erosivo. Assim, instalaram-se 38 estacas de monitoramento com espaçamento médio de 5 metros, assegurando o acompanhamento longitudinal de aproximadamente 200 m do talude. Entre os 97 cm do talude e a estaca de monitoramento foram adicionadas estacas auxiliares, visando a demarcar o rumo no qual a evolução do talude foi mensurada no levantamento anterior. Todas as estacas de monitoramento receberam ainda uma etiqueta de identificação. No entanto, no intervalo entre a instalação das estacas e o primeiro levantamento, constatou-se a necessidade de acoplar um nível ao esquadro (Figura 5) para garantir que as estacas fossem fixadas em linha reta em relação ao declive do setor. Assim, os dados do intervalo de 29/03/2017 à

03/07/2017 foram invalidados por apresentarem imprecisão, fato que resultou no monitoramento do talude por 21 meses (Anexo A).

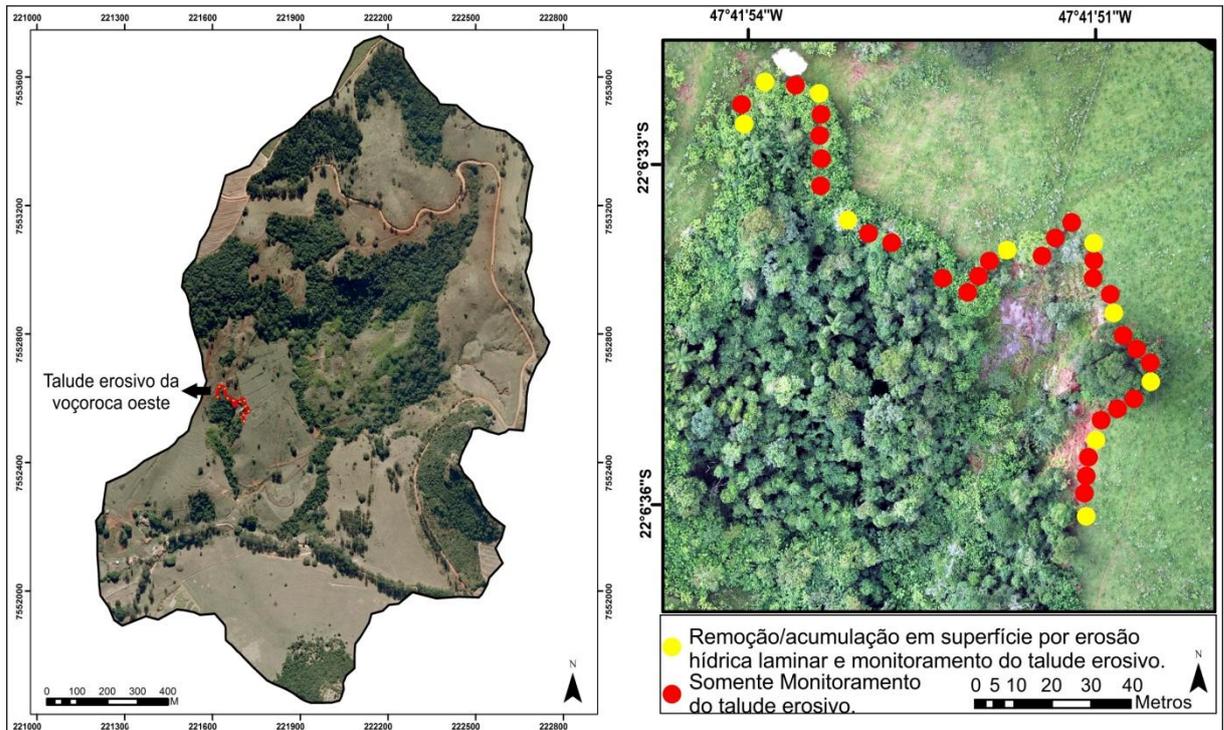


Figura 4 – À esquerda, localização do talude erosivo da voçoroca monitorada na bacia hidrográfica. À direita, em amarelo, os pontos de monitoramento do talude erosivo e de remoção/acumulação em superfície por erosão hídrica laminar. Em vermelho, somente os pontos em que se fez o monitoramento do talude erosivo.



Figura 5 – Esquadro com nível acoplado para instalação das estacas e monitoramento do talude erosivo.

A cada três meses, realizou-se o monitoramento do talude erosivo, quantificando a evolução dos pontos de forma analógica e digital. Diferentemente da proposta de Guerra (2002), formulada para medidas analógicas, nas quais as estacas são fixadas no entorno da voçoroca e mede-se a distância do talude até a estaca; as estacas deste estudo foram reposicionadas a cada levantamento para uma distância de 97 cm do talude. Tal adaptação fez-se necessária uma que vez que, para o levantamento digital, utilizou-se uma estação total (Spectra Precision Focus 6), a qual não permitiu a fixação do prisma na borda exata da voçoroca, sendo este fixado junto à estaca (97 cm) de monitoramento, procedimento que também garantiu agilidade nos levantamentos.

Destaca-se que Mathias (2016) propõe mensurar os dados através de um aparelho GPS RTK, no entanto, em decorrência de alguns setores do talude serem densamente vegetados, o GPS RTK não apresentou bom desempenho, registrando queda constante de sinal. Também vale destacar que a estação total utilizada permitiu manter a precisão geográfica dos pontos com uma margem de erro de 2 a 4 cm, limiar que foi corrigido em laboratório a partir dos dados analógicos.

Após o levantamento, os pontos foram plotados no software AutoCAD, exportando as informações no formato *shape* para o ArcGis, no qual criou-se um modelo digital com tamanho de célula de 10cm da evolução do talude erosivo conforme técnica de *Krigagem* a ser descrita no item 4.3.1.

4.1.2. Uso dos pinos de erosão para monitoramento da remoção/acumulação de material em superfície por erosão hídrica laminar

Para avaliar os processos de remoção/acumulação em superfície por erosão hídrica laminar foram implantados 22 pinos de erosão em duplas com espaçamento de 1 metro entre estes e 25 metros entre as duplas, conforme demonstrado na Figura 4. Utilizaram-se dois pinos por setor visando a aumentar o detalhamento e não perder o monitoramento de uma área muito extensa em caso de invalidação de um pino (ao final do monitoramento restaram 19 pinos). Os pinos quantificaram os processos de perda e deposição de material em função da variação das irregularidades da superfície do terreno que foram mensuradas a cada três meses (Anexos B e C). Para isso, criou-se uma marca de 10 cm de altura nos pinos (Figura 6), sendo esse cravado até a superfície do solo atingir a marcação. Assim, quando a superfície do solo se distanciou da marca, caracterizaram-se setores de perda de material; já sendo a marca recoberta por solo, caracterizaram-se setores de acúmulo de material. Após o levantamento e a

partir da malha de pontos digitais no entorno do talude erosivo, criou-se um modelo digital com tamanho de célula de 10 cm das áreas de remoção e/ou acúmulo de material conforme técnica de *Krigagem* a ser descrita no item 4.3.1.



Figura 6 – Pino de erosão utilizado na área de estudo. O setor branco representa o referencial para os monitoramentos de perda ou acúmulo de solo na superfície próxima ao pino. A mensuração da informação foi realizada sistematicamente no lado esquerdo do pino, considerando a face do pesquisador voltada para o talude da voçoroca.

4.1.3. Aquisição de dados pluviométricos

Para obtenção dos dados pluviométricos, optou-se pela instalação de um pluviômetro digital modelo Davis 7852, com balsa reclinável de 0,2 mm, acoplada a um interruptor magnético *reed switch*; coletor de chuva com abertura de 16,5 cm (6.5') por 24 cm de altura; e área de coleta de 214 cm². Ao equipamento, foi acoplado um *Rainlogger* modelo 3002. Antes da instalação, os equipamentos foram submetidos à calibração em laboratório. A instalação ocorreu em um poste de 3 metros de altura, sendo o pluviômetro fixado na parte superior e o *logger* armazenado no interior de um quadro de comando de 30X40 cm com vedação para água. O setor de instalação constitui-se em um terreno com vegetação rasteira, fator que

minimiza possíveis interferências na coleta de dados. Além disso, o poste foi alocado a 30 m do talude da voçoroca monitorada (Figura 7).

Definiu-se ainda um intervalo de armazenamento de dados de 5 minutos, garantindo, assim, a mensuração do volume de água, da frequência e da intensidade do evento chuvoso. De acordo com a capacidade de memória do *logger*, os dados foram coletados mensalmente. Destaca-se que os dados do mês de agosto de 2017 sofreram avarias devido aos imprevistos causados por abelhas, sendo as informações do referido mês coletadas junto ao banco de dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE, posto de coleta prefixo D4-035. Por fim, os dados coletados foram organizados em tabelas e gráficos.



Figura 7 – Pluviômetro digital modelo Davis 7852 instalado na área de estudo.

4.1.4. Definição da malha de pontos amostrais para quantificação dos dados referentes às características e comportamento dos materiais

Com o objetivo de avaliar os materiais de superfície, definiu-se uma malha de pontos amostrais pautando-se nas características morfológicas do terreno e nas variações das classes de uso da terra, adensando a malha amostral nos setores circundantes às duas principais

voçorocas da bacia para melhor detalhamento de tais setores de interesse (Figura 8). No total, foram definidos 48 pontos amostrais distribuídos por toda a área de estudo. Cada ponto foi alvo de procedimentos visando à aquisição de materiais para obtenção da granulometria e da permeabilidade e de dados para definição da taxa de infiltração e do índice de resistência do solo à penetração (Anexo D).

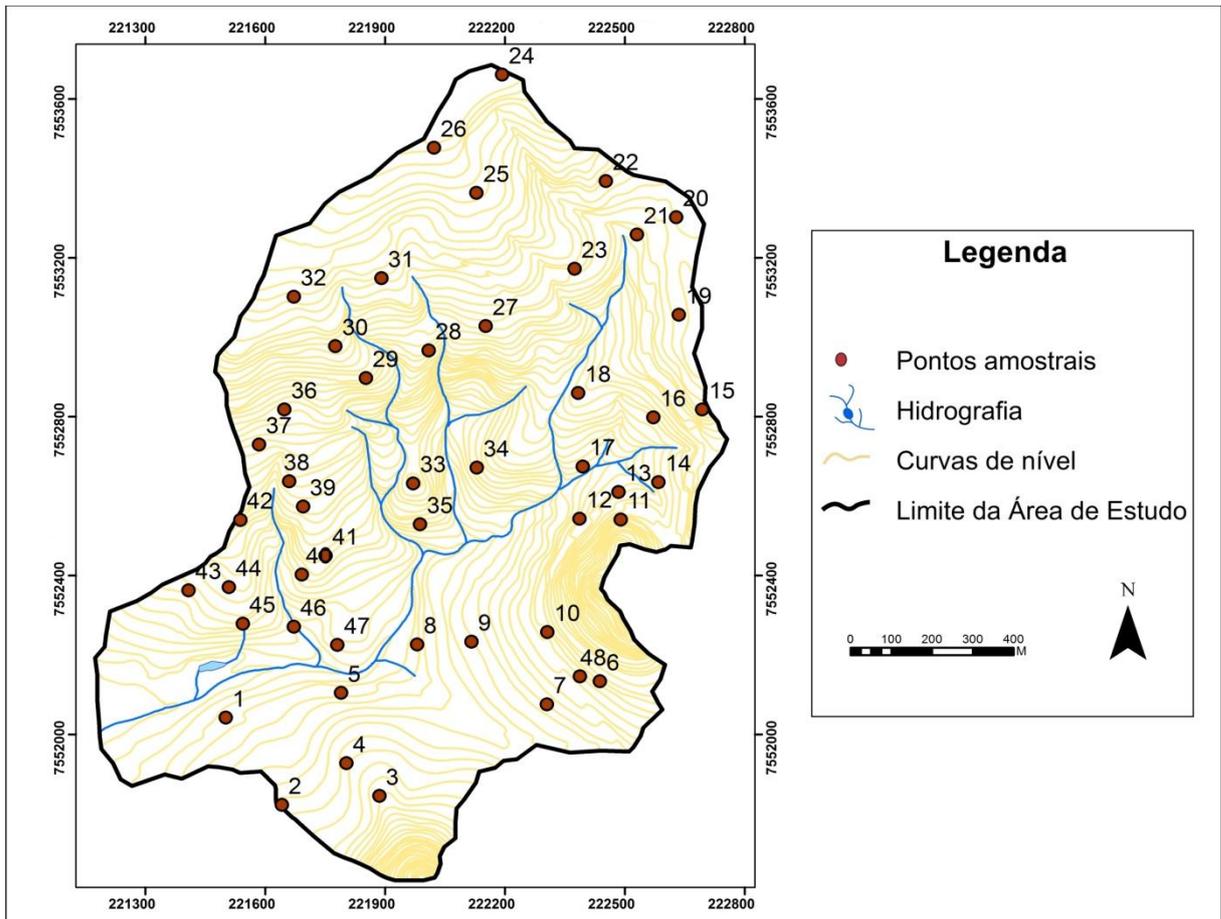


Figura 8 – Distribuição da malha de pontos amostrais na bacia hidrográfica analisada.

4.1.5. Mensuração das taxas de infiltração

Para obtenção das taxas de infiltração, foram realizados ensaios utilizando um infiltrômetro de Hills, conforme as seguintes especificações técnicas: cano de PVC com 15 cm de altura e 100 mm de diâmetro (GUERRA, 2002). Em campo, o tubo de PVC foi inserido, aproximadamente, cinco centímetros no solo de forma a ficar nivelado. Posteriormente, acoplou-se ao cano uma régua milimetrada com o auxílio de um alicate, preenchendo-o com água até a altura de 10 cm (Figura 9). A partir disso iniciaram-se os experimentos, anotando-se a altura da coluna de água a cada 30 segundos, nos dois primeiros minutos, e a cada 1 minuto até o final do experimento. Tal experimento foi aplicado durante o período úmido e seco, segundo procedimento adotado por Mathias (2016).

Após o levantamento de dados em campo, aplicou-se um conjunto de fórmulas aos dados de infiltração, buscando chegar a uma taxa de infiltração média por ponto. Para isso, foram seguidas algumas orientações de Guerra (2002). As fórmulas foram aplicadas através do *software* Excel 2007.



Figura 9 – Infiltrômetro instalado em campo para realização do experimento no ponto de amostragem 13.

Inicialmente, obteve-se o dado de rebaixamento da coluna de água em cm por instante do experimento (Equação 1).

$$RI = hAC - RIA \quad (1)$$

RI é o rebaixamento da coluna de água em cm por instante de monitoramento do experimento; hAC é a altura da coluna de água; RIA é o rebaixamento da coluna de água em cm do instante anterior.

Com os valores de RI definidos, buscou-se a quantidade de água que se infiltra no solo (Equação 2).

$$h = hA + RI \quad (2)$$

h é a quantidade de água infiltrada no solo em cm; hA é a quantidade de água infiltrada no solo em cm do instante antecedente; e RI é o rebaixamento da coluna de água em cm por instante de monitoramento do experimento.

Com o valor de h definido, obteve-se a taxa de infiltração (Equação 3).

$$VI = \pi r^2 \cdot h \quad (3)$$

VI é o volume de infiltração em mm^3 ; πr^2 é a área de seção do tubo; e h a quantidade de água infiltrada no solo em cm.

As fórmulas anteriores foram aplicadas para cada instante de tempo registrado. Assim, visando representar as características de infiltração para cada ponto amostral, foi calculada a taxa de infiltração média, obtida conforme a Equação 4:

$$TI = \frac{VOL}{t} \quad (4)$$

TI é a taxa de infiltração média em cm^3 ; Vol é o Volume total infiltrado durante o experimento e t é a duração do experimento (30 minutos).

4.1.6. Mensuração da resistência do solo à penetração

Em campo, para o levantamento dos dados brutos de resistência, utilizou-se o modelo de penetrômetro de impacto IAA/Planalsucar-Stolf (Figura 10), caracterizado por possuir haste de 12,8 mm de diâmetro provida de régua graduada anexada e bloco metálico de 4 kg. O curso em queda livre para o experimento foi de 40 cm (STOLF, 1984), sendo as profundidades para as anotações do número de impactos de 10 a 15 cm; de 25 a 30 cm; e até 60 cm, buscando monitorar, respectivamente, as camadas de superfície, de subsuperfície e de profundidade (MATHIAS, 2016). Realizaram-se três vezes o experimento em cada ponto amostral, com espaçamento de 50 cm entre cada ponto de aplicação, sendo que, se fossem identificados valores destoantes, seria realizada uma quarta amostragem buscando equalizar a média.

Após o levantamento em campo, os números de impacto e a profundidade da haste em cada intervalo foram adicionados a planilhas Excel – VBA elaboradas por Stolf (2011) e disponíveis para download em site para divulgação do material. As planilhas permitiram, a

partir da Equação 5 (STOLF, 1991), obter o índice de resistência à penetração em MPa (Mega Pascal).

$$R=0,56+0,689.N \quad (5)$$

R é o índice de resistência à penetração; $0,56 + 0,689$ são variáveis obtidas da Fórmula dos Holandeses e N é o número de impactos por profundidade (Impactos/cm).



Figura 10 – Penetrômetro de impacto IAA/Planalsucar-Stolf no ponto de amostragem 29.

4.2. Coleta de amostras e procedimento para obtenção da granulometria e da permeabilidade

Primeiramente, foram coletadas amostras de material, utilizando-se um trado (Figura 11). Definiu-se uma profundidade de coleta entre 40 e 60 cm (MATHIAS, 2016), uma vez que os perfis em campo mostraram-se homogêneos. Em um período de até três dias após a coleta, as amostras foram submetidas a uma rotina de secagem, sendo posteriormente destorroada, em pistilo, e passadas em uma peneira de 2 mm (POP 17 / NBR 6457 – AGO/1986). Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Análise de Formações

Superficiais – DEPLAN/IGCE, sendo registrados nos cadernos de rotina 80021 e 80024, os quais permitem rastreabilidade dos procedimentos desempenhados.



Figura 11 - Tradagem em campo para coleta de material para análise granulométrica e de permeabilidade do ponto amostral 36.

Para obtenção da granulometria, utilizou-se o método do densímetro conforme orientações da ABNT NBR 7181:2016, sendo os procedimentos apresentados a seguir de forma resumida.

Destaca-se inicialmente, que a etapa de pré-tratamento da matéria orgânica não foi necessária, uma vez que as amostras não apresentaram relevância percentual de tal componente. Assim, selecionou-se 20g de TFSA (Terra Fina Seca ao Ar), às quais foram adicionados 100 ml de solução dispersante, agitando o material por 16 horas. Ao término da agitação, peneirou-se o material junto da solução em uma peneira ABNT 270 (0,053 mm), retendo-se na peneira a fração correspondente a areia total; a peneira foi lavada com água destilada, canalizando a solução para uma proveta até atingir 500 ml. Em uma sala com temperatura controlada, mediu-se a temperatura da solução da proveta, agitou-a por 30 segundos, realizando um repouso de 6 minutos para inserção do densímetro e leitura do silte e

de 6 horas para a argila. A areia total retida na peneira foi secada a 105°C, sendo o material seco submetido uma peneira ABNT 70 (0,210mm), para separação da areia grossa da areia fina. Os dados granulométricos foram apresentados em porcentagem.

Já para a obtenção da permeabilidade pautou-se na ABNT NBR 14545:2000, utilizando um permeâmetro a carga variável.

Por se tratar de uma amostra coletada através de tradagem, inicialmente, foi necessária a formulação de um corpo de prova para realização do experimento. Para isso, aplicou-se um procedimento de compactação padrão para todas as amostras, utilizando 2kg de material, um molde cilíndrico com diâmetro de 100mm e um soquete de 2,5KGF. Cada corpo de prova foi moldado por 25 impactos a uma altura de 30,5 cm. Os corpos de prova foram retirados dos moldes com o auxílio de um macaco hidráulico. Ao permeâmetro, foi adicionada uma tela de contenção do material na parte inferior, sendo recoberta por uma camada de 2 cm de areia grossa e um disco de areia; na parte superior do disco, foi alocado o corpo de prova, adicionado ao seu entorno um anel de borracha, argila bentonita e, nos últimos 2 cm, parafina. Na parte superior do corpo de prova, foi adicionado um segundo disco de areia, fechando-se, assim, o permeâmetro com os lacres. Com o permeâmetro abaixo da bureta, mediu-se a altura entre a base deste e o ponto zero da bureta. Completou-se a bureta com água até iniciar o escoamento pela mangueira da mesma. Neste momento, fechou-se a saída do permeâmetro, conectou-se a mangueira da bureta à entrada deste e liberou-se a saída. Ao iniciar o experimento, mediram-se as cargas hidráulicas, o tempo decorrido e a temperatura da água percolante em intervalos variáveis. Tais informações foram submetidas ao seguinte conjunto de fórmulas para obtenção da permeabilidade (K_{20}):

$$Kt = 2,3 \cdot \frac{(aH)}{(A \cdot \Delta t)} \cdot \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (6)$$

Kt é o coeficiente de permeabilidade; a é área da bureta; H a altura da amostra; A a área da amostra; Δt o tempo de escoamento da água; h_1 a carga inicial da bureta; e h_2 a carga final da bureta.

Para obtenção do coeficiente de permeabilidade, a partir da temperatura de 20°C (K_{20}), aplicou-se a seguinte fórmula para correção:

$$K_{20} = Kt \cdot CK \quad (7)$$

K_{20} é o coeficiente de permeabilidade a partir da temperatura de 20°C; Kt coeficiente de permeabilidade; e CK coeficiente de correção, obtido a partir de valores de correção específicos para cada temperatura no momento do experimento, contidos na Planilha 1 da norma técnica ABNT NBR 14545:2000.

4.3. Processamento de dados em gabinete

Apresentam-se a seguir os procedimentos geoestatísticos e estatísticos aplicados aos dados de campo e laboratório e as técnicas de mapeamento desenvolvidas para obtenção dos dados de características e comportamento dos materiais, declividade, fluxo acumulado, uso e ocupação da terra, feições erosivas lineares e potencial ao avanço erosivo linear. Destaca-se que, para formulação das cartas, foi utilizada a base cartográfica do Instituto Geográfico Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC) de 1979, em escala de 1:10.000, folhas Serra da Estrela (SF-23-Y-A-I-2-NO-E) e Analândia I (SF-23-Y-A-I-2-NO-F).

4.3.1. Produtos cartográficos intermediários referentes às características e comportamento dos materiais

Os dados obtidos em campo e laboratório referentes à resistência do solo à penetração, infiltração, permeabilidade e granulometria foram cartografados através do método geoestístico *Kriging/CoKriging*, disponível na ferramenta do ArcMap 10.6, *Geostatistical Analyst*, conforme parâmetros definidos por Carvalho e Schulte (2013) e Carvalho (2014). Os autores aplicaram os parâmetros a dados geoquímicos, portanto algumas adaptações foram necessárias para essa pesquisa. Tais procedimentos foram desenvolvidos junto ao Grup Recerca Ambiental Mediterrània (GRAM), da Universitat de Barcelona – Espanha, coordenado pelo Prof. Dr. Xavier Úbeda por meio da Bolsa de Estágio e Pesquisa no Exterior – BEPE, durante o período de setembro a novembro de 2018.

Considerando as orientações obtidas durante o estágio de pesquisa, optou-se por uma *krigagem* do tipo ordinária. Ainda nos ajustes iniciais, selecionou-se a função *predicion* com o intuito de obter as estimativas de determinada variável em pontos não amostrados, descartando, assim, outros dados como a taxa de erro médio. Como a malha de pontos amostrais é irregular, optou-se pela interpolação dos valores através de semivariogramas, função que garante pesos iguais aos dois critérios utilizados (valor atribuído ao ponto e distância entre os pontos) para o processo de *krigagem*. Ainda nesta etapa, utilizou-se a função *stable*, a qual propiciou uma maior proximidade entre a linha do variograma e o valor

médio dos pontos. A função *optimize model* não foi utilizada, buscando não atribuir ruídos aos dados matrizes, uma vez que a função recalcula os valores atribuídos para formulação do semivariograma através de técnicas de correção. Por fim, a função *lag* foi definida automaticamente, visto que o *software* busca garantir que o resultado da multiplicação entre os valores de *lag size* e *lag* sejam menores que a metade da maior distância entre dois pontos, parâmetro este considerado adequado pelas descrições do fornecedor do *software*. Por fim, selecionou-se a função *strandard*, a qual possibilitou alguns ajustes de *layout* no produto da *krigagem*. Na função *sector type*, optou-se pela repartição da espacilização em oito setores, visando à formulação de um produto mais detalhado; e, nas correlações máximas entre vizinhos, adotou-se o valor de 10, buscando explorar o máximo de correlações possíveis entre os pontos amostrais.

Os produtos *kriging* foram exportados no formato *raster*, dando origem a dezoito cartas, contendo as variáveis físicas da área de estudo de forma individualizada, sendo estas: resistência do solo à penetração (por camada de amostragem e período úmido e seco), infiltração (por período úmido e seco), permeabilidade e granulometria (areia fina, areia grossa, areia total, silte e argila); contendo os dados de evolução do talude erosivo e de remoção/acumulação de material em superfície por erosão hídrica laminar; por fim, contendo as cartas de características e comportamento dos materiais (úmido e seco).

4.3.2. Carta de Características e Comportamento dos Materiais

Buscando gerar duas cartas de síntese das características e comportamento dos materiais, período úmido e seco, submeteram-se os dados de resistência do solo à penetração (por camada), infiltração, permeabilidade e granulometria a uma análise fatorial. Para tal intento, utilizou-se o *software* IBM SPSS 20, seguindo os parâmetros propostos em Carvalho (2014), com algumas adaptações às especificidades do banco de dados dessa pesquisa. Os dados levantados possuem unidades de medidas diferentes, assim realizou-se um processo de normalização através da técnica de logaritmização de potência de base 10 (SPIEGEL, 1991; OSBORN, 2010).

Em seguida, os dados foram adicionados ao IBM SPSS. Na aba de seleção das especificidades da análise fatorial, na função *dados descritivos*, foram selecionadas as opções *solução inicial*, *coeficientes* e *determinantes*, visando selecionar as variáveis com correlações significativas para formulação dos fatores e gerar um dado diagnóstico das correlações.

Selecionou-se, ainda, como *método de extração dos dados*, uma *análise dos componentes principais*, garantindo o cruzamento de dados heterogêneos, bem como foram selecionadas as opções *solução de fator não rotacionado*, com base no valor próprio igual a 1 e máximo de interações igual à 25, assegurando, respectivamente, a apresentação dos componentes da matriz no relatório do processamento; a exclusão de variáveis com baixa relevância; e um número de tentativas de correlações tido como bom (25 tentativas) de acordo com Carvalho (2014). Por fim, não se utilizaram *métodos de rotação*, buscando destacar as diferenças entre os setores da área de estudo, e optou-se por uma *pontuação dos fatores* através do método de *regressão* e da opção *excluir casos por lista*, assegurando às boas correlações um maior peso na explicação dos índices e a exclusão de possíveis células sem valor atribuído.

Após os processamentos, foram gerados fatores para cada ponto amostral da área de estudo e matrizes de correlação. Os fatores com melhor porcentagem de resposta (Fatores 1) dos períodos úmido e seco foram exportados para o ArcMap e adicionados à tabela de atributos da malha de pontos da bacia hidrográfica, gerando-se, através da técnica *kriging* descrita no tópico 4.3.1, modelos espaciais das características e comportamento dos materiais para ambos os períodos com tamanho de célula igual a 1 metro. Ademais, por considerar o limite entre as classes difuso, empregou-se a função *stretched* à legenda da carta, a qual garantiu uma variação de cores transicional entre os setores.

4.3.3. Carta de Declividade

Inicialmente foram definidas as classes de declividade ($\leq 2\%$, 2-|5%, 5-|12%, 12-|30%, 30-|45% e $\geq 45\%$), buscando manter a proximidade dos valores sugeridos por De Biasi (1992) (Quadro 1). As classes de baixa declividade foram demarcadas por cores claras, escurecendo o tom com o aumento da declividade (DE BIASI, 1970; 1992).

Quadro 1 - Definição e caracterização das classes de declividade.

Classes de declividade (%)	Caracterização
≤ 2%	Constituem-se em áreas alagáveis, nas quais há principalmente perda de materiais em solução pela ação da infiltração e percolação das águas.
2 - 5%	São áreas suscetíveis a alagamentos, nas quais o uso agrícola pode ser intenso pela facilidade de mecanização, processo que pode gerar a obliteração de sulcos erosivos (PINTON; CUNHA, 2015).
5 - 12%	12% é o limite máximo para o emprego de mecanização na agricultura (DE BIASI, 1992).
12 - 30%	São áreas com intensa ocorrência de feições erosivas lineares e que congregam a correlação entre média e alta declividade e usos da terra com baixo emprego de técnicas agrícolas. O limite de 30% também se justifica em função da Lei Lehman, que prevê restrições ao uso urbano a partir desse declive.
30 - 45% ≥45%	De acordo com o Capítulo III Artigo 11 da Lei nº 12.651, os setores com declives entre 45% a 100% são áreas de uso restrito. Nesses “são permitidos o manejo florestal sustentável e o exercício de atividades agrossilvipastoris, bem como a manutenção da infraestrutura física associada ao desenvolvimento das atividades, observadas boas práticas agronômicas, sendo vetada a conversão de novas áreas, excetuadas as hipóteses de utilidade pública e interesse social”. São ainda áreas críticas do ponto de vista da dinâmica erosiva, as quais podem representar as rupturas relacionadas a taludes erosivos das voçorocas (MATHIAS, 2016).

Em relação ao procedimento técnico, destaca-se que, após a formulação do primeiro modelo da carta de declividade no ArcGis 10.1, identificaram-se erros de processamento nos fundos de vale e topos do produto cartográfico. Ambos foram classificados como setores planos, não havendo correlação com os dados obtidos em campo e apresentados por Stefanuto e Lupinacci (2016), que caracterizam o setor com alta declividade, elemento que confere energia as águas dos rios, cujos vales nem sempre são simétricos, como mapeado inicialmente pelo procedimento automático. Além disso, a localização do setor em um ambiente quente e úmido, no qual a ação denudativa da água é intensa, gera uma tendência a convexização do relevo, suavizando os topos.

Desse modo, visando minimizar o erro nos referidos setores, adicionaram-se linhas de elevação com os valores médios de elevação nos fundos de vale e topos. Os valores médios corresponderam à metade da equidistância; por exemplo, trechos do fundo de vale circundados por uma curva de nível de 670 metros, receberam uma linha central com valor de elevação de 667,5 metros (valor correspondente à metade da equidistância entre a curva

traçada e a anterior); nos topos, calculou-se um acréscimo ao valor da última curva de nível registrada pela base topográfica, também na ordem da metade do valor da equidistância das curvas.

A partir dos referidos ajustes na base cartográfica, adicionaram-se as curvas de nível, os pontos cotados e as linhas de elevação ao ArcGis, processando-se um *Triangulated Irregular Network* (TIN) e adicionando-se aos vetores curvas de nível, pontos cotados e linha de quebra às especificações *elevation* e *hard line*. O TIN foi reclassificado, dando origem a 27 classes, as quais surgiram da divisão do intervalo entre o menor e o maior valor de elevação pela equidistância das curvas de nível. Tal procedimento assegurou o detalhamento máximo do terreno oferecido pela base topográfica. Ainda, buscando minimizar as falhas geradas pelo TIN nas proximidades das curvas de nível, submeteu-se o produto à ferramenta *TIN to Raster*, utilizando-se no campo *Sampling Distance* a opção *Cellsize 1* e em *Method* a função *Natural Neighbors*. O arquivo *raster* foi submetido à ferramenta *Slope*, gerando-se a declividade do terreno em graus. Para finalizar, efetuou-se a reclassificação da declividade nas propriedades do arquivo vetorial (*Symbology* → *Classified* → *Classification* → *Method Manual*) em graus, uma vez que o algoritmo do *software* utiliza a referida unidade de medida. Assim, adicionaram-se as seis classes de declividade em graus (0°-1,27°; 1,27°-3,18°; 3,18°-7,6°; 7,6°-18,5°; 18,5° – 26,91°; 26,91° – 90°), sendo a legenda do mapeamento apresentada em porcentagem, buscando facilitar e interpretação dos dados.

4.3.4. Carta de Fluxo Acumulado do Escoamento Superficial

A partir das orientações de Mathias (2011) e Moraes *et al.* (2014), desenvolveram-se os processamentos referentes à carta de fluxo acumulado.

Inicialmente, foi desenvolvido no ArcGis 10.1 um modelo digital do terreno (MDT) a partir da base cartográfica cuja equidistância das curvas de nível é de 5 m. Para tal, utilizou-se a ferramenta *Topo to Raster* e as informações das curvas de nível e dos pontos cotados. Posteriormente, o MDT foi adicionado ao ArcView 3.0, sendo submetido a uma sequência de procedimentos disponíveis na ferramenta *Preparation*. Primeiramente, aplicou-se ao MDT a função *Fillig Sinks*, a qual garantiu o preenchimento de depressões do terreno; em um segundo momento, submeteu-se o produto da função anterior à opção *Flow Direction*, para obtenção da direção do fluxo; e, por fim, aplicou-se ao produto com a direção de fluxo o comando *DEM Correction* para correção de possíveis erros. Para formulação da carta, utilizou-se o algoritmo *MD-Multiple Flow* (MORAES *et al.*, 2014), adicionando ao campo

DEM o produto proveniente da correção e à opção *Weight* o produto com as direções de fluxo. A partir do processamento, gerou-se a carta de fluxos acumulados, a qual foi exportada para o ArcGis 10.1 para ajustes nas classes.

A partir de testes na função *symbolology* e a verificação da correspondência de acumulação de fluxo de acordo com as curvas de nível e as concavidades e convexidades de vertentes, estabeleceu-se o número de 7 classes de fluxo acumulado. Buscando apresentar as classes em m² (MATHIAS, 2016), atribuiu-se o valor de 25m² a cada pixel, uma vez que MDT foi gerado a partir da equidistância de 5 metros das curvas de nível. Assim, foram definidos os intervalos de classe em m² de 25-625; 625,1-2.500; 2.500,1-12.500; 12.500,1 – 25.000; 25.000,1 – 50.000; de 50.000,1 – 250.000; e >250.000,1.

4.3.5. Carta de Uso e Ocupação da Terra

A partir da proposta de mapeamento de uso e ocupação da terra do IBGE (2013) e algumas chaves para fotointerpretação (CERON; DINIZ, 1966), desenvolveram-se as cartas de uso e ocupação da terra dos anos de 2010 e de 2019. Para tal, utilizaram-se, inicialmente, as ortofotos de 2010 da EMPLASA, para elaboração da carta de uso da terra de 2010. No entanto, ao analisar a carta, identificou-se a necessidade de atualização desta, uma vez que os experimentos desenvolvidos em campo foram aplicados em um ambiente com outras características. Assim, atualizaram-se as classes de uso da terra da bacia hidrográfica a partir de imagens do Google Maps de 2019 e reambulações em campo. Destaca-se que as imagens do Google Maps foram conectadas ao ArcGis através da extensão *Portable Basemap Server 3.1*, garantindo uma boa sobreposição com as classes delimitadas em 2010, com a base cartográfica e o limite da área, fatores que auxiliaram na atualização das classes de uso da terra.

No que concerne à formulação das cartas, criaram-se inicialmente os *layers* no formato polígono referentes às classes de uso da terra identificadas. A legenda foi organizada a partir das classes e cores propostas pelo IBGE (2013), utilizando-se da padronização internacional no formato RGB. Ressalta-se que as cores propostas pelo IBGE (2013) não contemplaram todos os elementos de uso identificados nesta pesquisa, assim foi criado um novo grupo de classes de uso e suas respectivas cores. No quadro a seguir são apresentadas as classes e as cores adaptadas para este trabalho:

Quadro 2 – Classes de uso e ocupação da terra adaptadas e suas respectivas cores em RGB.

Uso e ocupação da terra	RGB
Área construída	R: 232 G: 138 B: 255
Cana-de-açúcar	R: 181 G: 255 B: 0
Estrada Rural	R: 130 G: 130 B: 130
Pasto Sujo	R: 137 G: 99 B: 68
Pasto Degradado	R: 255 G: 167 B: 127
Solo Exposto	R: 255 G: 235 B: 175
Vegetação de Área Úmida	R: 0 G: 168 B: 132
Vegetação Invasora	R: 211 G: 255 B: 190

À classe área construída, incorporaram-se setores de construção civil dissociados da malha urbana, como sedes de propriedades rurais; à cana-de-açúcar, foram adicionadas áreas onde se identificou o seu cultivo; à estrada rural, as estradas sem pavimentação; à classe pasto sujo, os setores destinados ao uso da pecuária extensiva; ao pasto degradado, áreas com baixa manutenção, cobertura herbácea deficitária e atingidas, em alguns casos, por feições erosivas; ao solo exposto, setores sem cobertura vegetal; à vegetação de área úmida, setores ocupados por vegetação hidrófila; e à vegetação invasora, áreas com a presença da espécie *Tecoma stans*, classificada por Pedrosa-Macedo e Bredow (2004) como espécie invasora, uma vez que pode substituir a vegetação nativa. Foram ainda identificadas mais cinco classes de uso na área, sendo estas correlacionadas com a proposta de classificação do IBGE (2013). As classes corpo d'água continental, área descoberta (afloramentos rochosos) e silvicultura foram mantidas conforme a proposta do IBGE (2013). No entanto, as classes pastagem e vegetação florestal foram adaptadas. A classe pastagem abarcou os pastos limpos, ou seja, pastos tratados mecanicamente; e a classe vegetação florestal representou a vegetação arbórea presente no setor. Nessa perspectiva, buscando exemplificar as classes de uso da terra descritas, apresenta-se a Figura 12 com as características de cada uso na área de estudo em 2010 e 2019.

Com as classes de uso da terra definidas, iniciou-se o processo de delimitação dos polígonos referentes a cada uso através das ferramentas *Straight Segment Trace*, realizando, em um segundo momento, a quantificação da área das classes através da ferramenta *Calculete Geometry*. As cartas de uso e ocupação da terra foram apresentadas com as classes no formato de polígonos, no entanto, para formulação das cartas de síntese, os polígonos da carta do ano de 2019 foram unidos através da opção *merge* e transformados em um produto *raster* (*Polygon to Raster*) com tamanho de célula de 1m.

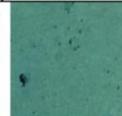
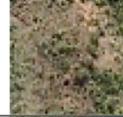
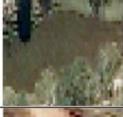
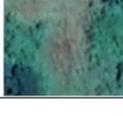
	2010	2019		2010	2019
Área Construída			Pasto Limpo		
Área Descoberta			Pasto Sujo		
Vegetação Invasora			Silvicultura		
Corpo D'Água Continental			Solo Exposto		
Estrada Rural			Vegetação Arbórea		
Pasto Degradado			Vegetação de Área Úmida		
			2010		
Cana-de-Açúcar					

Figura 12 – Características das classes de uso e ocupação da terra em 2010 e 2019. A classe cana-de-açúcar foi registrada somente em 2010.

4.3.6. Carta de Feições Erosivas Lineares

A identificação e o mapeamento das feições erosivas partiram do princípio de que essas são expressas nas fotografias aéreas a partir de mudanças de tonalidades e de texturas (Figura 13). Para isso, utilizaram-se as fotografias aéreas de 1962, em escala aproximada de 1:25.000, adquiridas junto ao Instituto Agrônomo de Campinas; as de 1988, em escala aproximada de 1:40.000, obtidas junto ao acervo de fotografias aéreas do DEPLAN/IGCE; as ortofotos digitais de 2010, em escala aproximada de 1:25.000, obtidas via requerimento enviado à Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA), e as imagens orbitais de 2019 do Google Maps, conectadas ao ArcGis através da extensão *Portable Basemap Server 3.1*. Buscando auxiliar no processo de fotointerpretação, as fotografias aéreas de 1962 e 1988 foram digitalizadas e submetidas à técnica do anáglifo (SOUZA; OLIVEIRA, 2012).

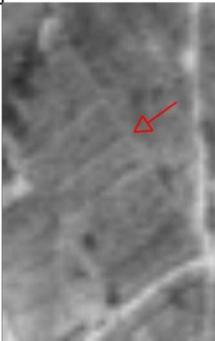
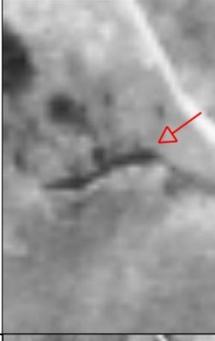
Feições Erosivas	1962	1988	2010	2019
Sulco Erosivo				
Ravina				
Voçoroca				

Figura 13 – Chave de interpretação das feições erosivas lineares identificadas nos anos de 1962, 1988, 2010 e 2019 a partir dos diversos produtos de sensoriamento remoto utilizados.

Ainda para a identificação e o mapeamento, utilizaram-se as descrições e simbologias de feições erosivas de Tricart (1965) e Verstappen e Zuidan (1975) para formulação de mapas geomorfológicos, as quais auxiliaram na fotointerpretação. Empregaram-se também as definições apresentadas por um conjunto bibliográfico (FURLANI, 1980; GOUDIE, 2004; AUGUSTIN; ARANHA, 2006; SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2008), que embasou a identificação e a classificação das formas erosivas em sulcos, ravinas e voçorocas. Assim, os sulcos erosivos foram entendidos como feições lineares rasas, passíveis de serem obliteradas por maquinário agrícola, que se apresentaram como linhas de coloração esbranquiçada ou escura; já as ravinas foram compreendidas como feições mais profundas que os sulcos, impossíveis de serem obliteradas por técnicas conservacionistas tradicionais, com coloração esbranquiçada ou escura, além de

apresentar textura granulada. As voçorocas destacaram-se nas fotografias pela presença de taludes erosivos íngremes e vales mais alargados. Convém esclarecer que tais princípios também foram estabelecidos a partir de reconhecimento de campo.

Para vetorização das feições erosivas, atribuíram-se *layers* do tipo linha aos sulcos e ravinas, por não evidenciarem áreas extensas no setor estudado; e *layers* do tipo polígono para as erosões classificadas como voçorocas, por ocuparem áreas maiores. Após as feições erosivas serem mapeadas nos quatro anos de análise, atribui-se um *buffer* às erosões delimitadas como linha, uma vez que o objetivo era quantificar a extensão da área de ocorrência de cada fenômeno erosivo. Assim, atribuiu-se um *buffer* de 10 cm aos sulcos erosivos e um *buffer* de 50 cm as ravinas, medidos em terreno. Essas medidas se devem às características das formas erosivas constatadas pela análise das fotografias aéreas e em campo.

As feições erosivas mapeadas foram ainda utilizadas para identificação das classes de características e comportamento dos materiais, de declividade, de fluxo acumulado de superfície e de uso da terra com maior ocorrência de feições erosivas lineares. A quantificação das feições erosivas em relação às características e comportamentos dos materiais, ao fluxo acumulado de superfície e ao uso da terra, foram feitas através das ferramentas *Clip* e *Caculate Geometry*, uma vez que as informações de materiais e fluxo foram convertidas para o formato polígono. As informações das cartas de características e comportamentos dos materiais foram ainda organizadas em seis classes, a partir da variação nas cores do modelo gerado pela função *stretched*. Já o dado de declividade foi gerado no formato *raster*, sendo, neste caso, difícil a sobreposição por polígonos, em função da quantidade de informações e a fragmentação espacial das classes. Assim, através da ferramenta *raster dataset* → *copy raster*, foi possível ativar a tabela de atributos do produto, recortar as áreas de intersecção entre as feições erosivas e as classes de declividade (*Extract by Mask*), assim como acessar a coluna *Count* da tabela de atributos, a qual disponibilizou a informação do número de *pixels* em cada classe. Desta forma, pelo tamanho de célula do material ser de 1 m, obteve-se o valor da área de intersecção em m².

Por fim, os dados provenientes da quantificação foram exportados ao Excel para aplicação da densidade normalizada, na qual se dividiu a área ocupada pela feição erosiva pela área total de cada classe. Por exemplo, a área de 2.061m² de voçoroca que ocorre na classe de uso da terra Pasto Degradado em 2019 foi dividida por 21.018m² que se constitui na

área total desta classe de uso da terra. Esse procedimento visou eliminar o efeito da dimensão das classes dos diferentes parâmetros avaliados. Os valores se apresentaram reduzidos; assim, buscando melhorar a interpretação dos dados e destacar as variações numéricas, tais valores foram submetidos a um coeficiente com intervalo de 0-1. O valor máximo, representado por 1, indica a classe de maior área de ocorrência de feição erosiva.

4.3.7 Cartas de Potencial ao Avanço Erosivo Linear

A construção das cartas de síntese de potencial ao avanço erosivo linear constituiu-se em um processo que envolveu uma etapa de preparação dos dados e uma série de testes, a fim de obter a melhor combinação entre as variáveis: declividade, fluxo acumulado de superfície, características e comportamentos dos materiais (nos períodos úmido e seco), e o uso e ocupação da terra em 2019. Em um primeiro momento, destaca-se a metodologia de cruzamento dos dados, buscando facilitar a compreensão das etapas posteriores.

Para combinação das variáveis, utilizou-se a opção *Weighted Overlay*, presente na seção *Spatial Analyst Tools* do ArcGis 10.1, conforme orientações de Zanatta (2018), que, ao estudar os fenômenos erosivos no Planalto Ocidental Paulista, obteve bons resultados a partir do uso da mesma. Tal ferramenta permitiu a atribuição de uma influência percentual a cada produto *raster*, sendo os pesos multiplicados por sua influência percentual e os resultados de cada *raster* somados (ESRI, 2016). Por exemplo, na Figura 14, que ilustra o procedimento, as células superiores à esquerda dos *raster* de entrada, nas quais os pesos das duas entradas são 2 (InRas1) e 3 (InRas2), tem-se o seguinte cálculo: $(2*0,75) = 1,5$ e $(3*0,25) = 0,75$; a soma de 1,5 e 0,75 é 2,25, no entanto, como a saída é ponderada, a sobreposição é um número inteiro, sendo o valor arredondado igual a 2 (OutRas). Destaca-se, ainda, que os produtos *raster* (variáveis) que estavam na função *stretch* (carta de características e comportamento dos materiais) foram organizados em classes através da função *Classified*, sendo possível assim atribuir um peso a cada classe (Figura 15).

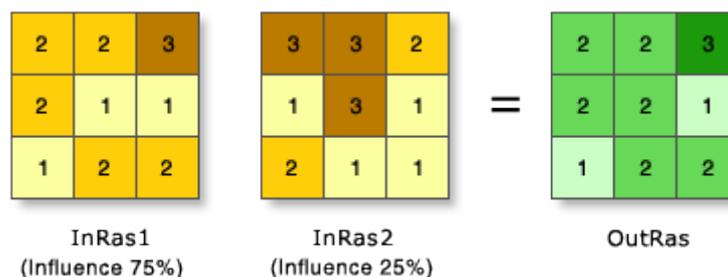


Figura 14 – Exemplificação do processamento realizado pela ferramenta *Weighted Overlay*. Fonte: ESRI (2016).

Raster	% Influence	Field	Scale Value
class_merge_2	100	VALUE	
		1	1
		2	13
		3	26
		4	38
		5	51
		6	63
		7	75
		NODATA	NODATA

Figura 15 – Funções da ferramenta *Wighted Overlay*. Destacada em azul a porcentagem de influência da variável no modelo; destacadas em vermelho as classes da variável; e em amarelo os pesos de cada classe para o processo de multiplicação e somatória dos *pixels*.

Para a atribuição dos pesos, utilizaram-se os dados referentes à área ocupada pelas feições erosivas lineares, mapeadas em 1962, 1988, 2010 e 2019, em cada classe, de cada variável. Através disso, foi possível compreender quais classes apresentam maior tendência ao desenvolvimento de feições erosivas (Tabela 1). Para isso, a quantificação das feições erosivas e o peso de cada classe foram processados de duas formas diferentes:

A) Considerando a área ocupada pelas feições erosivas em cada classe, a partir da densidade normalizada dos dados para impedir a interferência da dimensão das classes. Os dados de área das feições sulco, ravina e voçoroca em relação à cada classe das variáveis foram somados, aplicando-se o coeficiente de 0 a 1 ao resultado para estabelecerem-se os pesos. Dessa forma, a área ocupada pelas voçorocas se sobressaiu visto ter área superior às demais feições;

B) Considerando a área ocupada pelas feições erosivas em cada classe, a partir da normalização dos dados para impedir a interferência da dimensão das classes com a aplicação do coeficiente de 0 a 1 em duas etapas. Assim, com os dados já normalizados, foi aplicado o coeficiente para a área ocupada de cada tipo de feição (sulco, ravina e voçoroca) em relação às classes das variáveis. Os coeficientes iniciais de **cada feição** foram somados, aplicando-se, novamente, o coeficiente ao resultado da soma para obtenção do peso final. Nesse caso, o peso da área ocupada pela voçoroca, muito superior às demais, foi equalizado.

Tabela 1 – Pesos atribuídos às classes de cada variável. Os valores foram gerados originalmente através do coeficiente de 0 a 1 e multiplicados por 100 para fins de inserção do ArcGis. A escala de valores varia de 1 a 100.

Variável	Classe	Peso Procedimento A	Peso Procedimento B
Materiais (Período Úmido)	1	8	28
	2	36	73
	3	100	100
	4	30	57
	5	1	22
	6	1	32
Materiais (Período Seco)	1	12	33
	2	48	85
	3	91	100
	4	100	87
	5	2	33
	6	3	38
Fluxo Acumulado	25-625	40	75
	625,1-2.500	16	61
	2.500,1-12.500	32	80
	12.500,1 – 25.000	20	75
	25.000,1 – 50.000	16	53
	50.000,1 – 250.000	100	100
	>250.000,1	11	45
Declividade	≤ 2%	20	54
	2 5%	22	42
	5 12%	19	59
	12 30%	49	100
	30 45%	95	97
	>45%	100	81
Uso e Ocupação da Terra	Estrada Rural	1	1
	Pasto Degradado	88	100
	Pasto Limpo	4	7
	Pasto Sujo	1	6
	Solo Exposto	35	60
	Vegetação Arbórea	22	8
	Vegetação de Área Úmida	100	36
	Vegetação Invasora	7	4

Destaca-se que, nesta etapa, o peso atribuído à cada classe de uso e ocupação da terra foi estabelecido considerando somente as feições erosivas mapeadas em 2019, uma vez que se entende que desconsiderar uma possível recuperação ou a redução de processos erosivos em uma determinada área a partir da mudança no uso da terra é tirar a sua importância nas cartas de síntese. Ressalta-se, ainda, que as classes área construída, área descoberta, corpo d'água continental e silvicultura não apresentaram feições erosivas mapeadas, sendo desconsideradas e atribuindo-se o valor mínimo 1 aos pixels correspondentes.

Com os pesos atribuídos a cada classe (Tabela 1), foram geradas oito cartas através da ferramenta *Weighted Overlay*. Em quatro dessas, trabalhou-se com a influência igual para cada uma das variáveis (25% de influência); nas outras 4, pautando-se em uma perspectiva antropogeomorfológica, atribuindo influência de 50% para as variáveis físicas (declividade, fluxo acumulado de superfície e características e comportamento dos materiais durante os períodos úmido ou seco) e 50% para o uso e ocupação da terra, variável representativa da ação antrópica na área de estudo.

Os dados das cartas geradas foram organizados em seis classes de potencial ao avanço erosivo linear (Muito Fraco, Fraco, Médio, Forte, Muito Forte e Extramente Forte). O número de classes foi estabelecido, inicialmente, a partir do uso da função *Standard Deviation*. No entanto, como havia a necessidade de se comparar os 8 documentos cartográficos produzidos e o número de classes sugerido pelo *Standard Deviation* apresentava pequena variação (entre 5 e 7), estabeleceu-se um número médio de classes a ser utilizado em todos os documentos. Para definir o intervalo das seis classes, optou-se pela função *Natural Breaks*, a qual buscou identificar variações numéricas relevantes para gerar os limites das classes e apresentou bons resultados em estudos sobre erosão desenvolvidos por Zanatta (2018).

Tais cartas foram submetidas a procedimentos de verificação através das feições erosivas lineares e dos dados de evolução do talude erosivo da voçoroca monitorada. Para tal, quantificou-se a área de ocorrência das feições erosivas e a evolução do talude em relação às classes de potencial ao avanço erosivo linear. A análise dos dados pautou-se na hipótese de que as áreas com maior potencial à erosão linear deveriam coincidir com os setores de maior ocorrência de feições erosivas e de maior valor de evolução do talude. Nessa situação, considerou-se como de melhor acurácia as cartas de síntese que apresentaram melhor ajuste à hipótese.

Para validação, quantificou-se a área de ocorrência das feições erosivas em relação às classes das cartas de síntese através da ferramenta *Extract by mask*, classificando posteriormente os valores extraídos em m² por tipo de feição erosiva em cada classe de potencial ao avanço erosivo. Já para validação da voçoroca, quantificou-se o número de estacas em cada classe de potencial ao avanço erosivo, somando os milímetros de recuo do talude ao longo do período analisado. A somatória foi dividida pelo número de estacas por

classe, fato que propiciou identificar as classes com valores de evolução do talude mais elevados.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados, inicialmente, os dados utilizados para a formulação da carta de características e comportamento dos materiais (granulometria, infiltração, resistência do solo à penetração e permeabilidade), assim como a carta em si. Ainda, serão expostas e analisadas as cartas de declividade, de fluxo acumulado de superfície e de uso e ocupação da terra de 2010 e 2019. Por fim, tal seção será finalizada com a análise, discussão e validação das cartas de potencial ao avanço erosivo linear, assim como uma discussão da dinâmica evolutiva da voçoroca monitorada.

5.1. Análise das variáveis físicas dos solos

Com base na espacialização dos dados granulométricos, identificaram-se setores de concentração de algumas frações específicas dos solos (Figura 16).

No que corresponde à fração areia, as areias finas concentram-se nos setores sul e sudeste, possuindo uma área de destaque no centro da bacia hidrográfica; as areias grossas se aglomeraram nos setores centro-sul e leste, possuindo um ponto de destaque no setor norte; e a areia total, correspondente à soma das frações areia fina e grossa, concentraram-se na porção centro-sul. De acordo com a carta pedológica de Koffler *et al.* (1992; Figura 3), no setor sul da bacia hidrográfica são identificados LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO Álico e NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos. Os LATOSSOLOS deste setor são classificados com textura média, estrutura subangular fraca e com teor de argila inferior a 20% (OLIVEIRA; PRADO, 1984). Já os NEOSSOLOS são classificados com baixo teor de argila (3% a 7%) e composição granulométrica predominante de areia fina (57% a 61%) e areia grossa (34% a 37%) (OLIVEIRA; PRADO, 1984). Tais solos estão vinculados aos substratos do setor sul, caracterizados pelas formações Pirambóia, Botucatu e Santa Rita do Passa Quatro (IG, 1984; Figura 2), as quais são compostas, respectivamente, por arenitos finos ou médios (AZEVEDO *et al.*, 1981; MASSOLI, 2007); arenitos silicificados e rochas eruptivas nas parcelas mais altas do relevo (IPT, 1981a); e sedimentos de areias finas, compostos majoritariamente por quartzo (MASSOLI, 1981).

A fração silte apresentou uma área de ocorrência reduzida (Figura 16), sendo possível identificar um setor de concentração a leste, estando o mesmo em uma área de domínio da associação NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e NITOSSOLOS Eutróficos ou Distróficos (KOFFLER *et al.*, 1992). No entanto, os referidos solos não apresentam

relevância na fração granulométrica silte (OLIVEIRA; PRADO, 1984). Assim, ao analisar os pontos amostrais, localizados no setor (15, 16, 17, 18 e 19), identifica-se que as porcentagens de silte (22,5%; 7,5%; 19%; 15%; 12,5%, respectivamente) não são relevantes se comparadas às outras frações granulométricas. No que se refere à litologia, esse setor localiza-se em uma área de contato entre as formações Botucatu e Serra Geral (IG, 1984), o qual ocorre por interdigitação (IPT, 1981a). Portanto, tal contato apresenta em sua composição arenitos intertrápicos, os quais podem apresentar-se pontualmente como argilosos, sílticos e arenosos (MILANI *et al.*, 2007).

Por fim, as argilas apresentam-se concentradas no setor norte e nordeste, região a qual apresenta predominância de ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELO Distróficos, NITOSSOLOS Eutróficos ou Distróficos e da associação formada por LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO e PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários (KOFFLER *et al.*, 1992). Os ARGISSOLOS apresentam elevado teor de minerais primários facilmente intemperizáveis, tendo como material de origem as fáceis conglomeráticas da Formação Itaqueri (OLIVEIRA; PRADO, 1984). Já os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO do setor norte se diferenciam dos do setor sul, apresentados anteriormente, uma vez que possuem textura do horizonte B argilosa ou muito argilosa em função do material de origem ser suprabasáltico (OLIVEIRA; PRADO, 1984). Os PLINTOSSOLOS são compostos por material mineral no qual se identificam horizontes litoplínticos ou concrecionários, com mais de 30% de terra fina argilosa ou muito argilosa (OLIVEIRA; PRADO, 1984). Por fim, os NITOSSOLOS Eutróficos ou Distróficos apresentam argila em quantidade suficiente para serem classificados como solos argilosos (OLIVEIRA; PRADO, 1984). Em relação à litologia, identificam-se neste setor as formações Botucatu, Serra Geral e Itaqueri (IG, 1984). O contato superior da Formação Botucatu ocorre de forma interdigitada com os derrames basálticos da Formação Serra Geral, sendo que a primeira pode apresentar em sua composição arenitos intertrápicos (MILANI *et al.*, 2007); assim, é possível compreender uma associação entre o setor com solos argilosos e os basaltos vinculados tanto à Formação Serra Geral como aqueles presentes na Formação Botucatu. Já a Formação Itaqueri constitui-se em uma formação pós-basáltica, dotada de arenitos com cimentação argilosa, carapaças ferruginosas, folhelhos e conglomerados (FACINCANI, 2000).

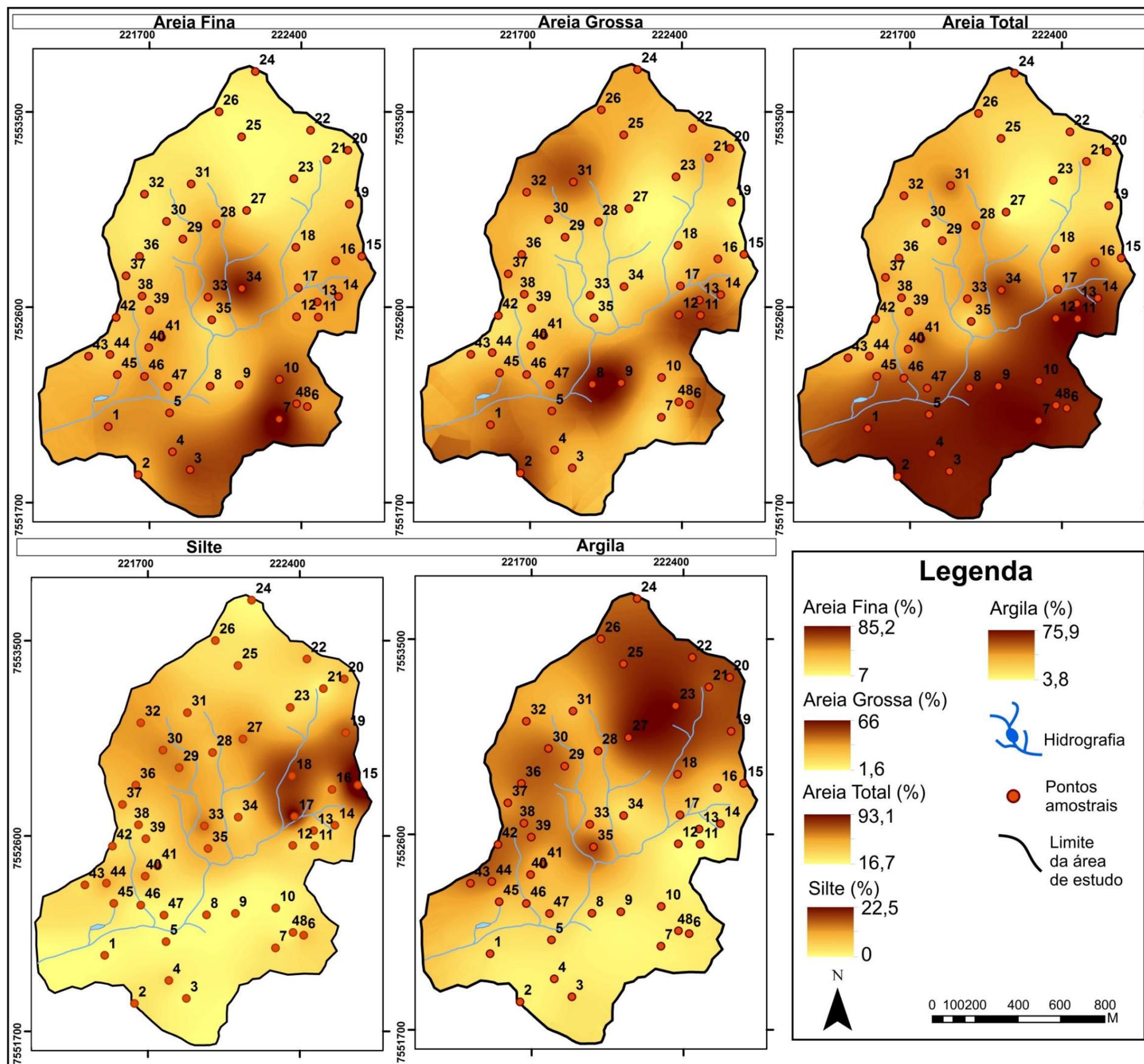


Figura 16 – Distribuição espacial das características granulométricas na bacia hidrográfica.

Desta forma, as frações granulométricas identificadas apresentaram boa correspondência com os solos mapeados por Koffler *et al.* (1992) e seus referidos substratos litológicos (IG, 1984), havendo um destaque para os materiais arenosos e argilosos, os quais são mais representativos no setor analisado.

Em relação à taxa média de infiltração, identifica-se uma nítida variação de comportamento durante o período úmido e seco (Figura 17) representada por taxas de infiltração até cinco vezes maiores no período seco.

Durante o período úmido, o setor sul da área apresentou taxas de infiltração superiores às registradas no setor centro-norte (Figura 17). Identificou-se, assim, uma associação entre os setores com maior taxa de infiltração e os solos com granulometria arenosa, questão amplamente apresentada e constatada por diferentes estudos (SILVA, 1999; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012; MATHIAS, 2016). Os setores ao sul possuem ainda um domínio de LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO Álico e NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos, os quais se apresentam condizentes com a infiltração identificada (KOFFLER *et al.*, 1992; OLIVEIRA; PRADO, 1984).

Já durante o período seco, ocorre uma concentração marcante das maiores taxas de infiltração no setor noroeste e alguns pontos de destaque nos setores sudeste e nordeste (Figura 17). Os pontos amostrais 6, 7, 10 e 48, por exemplo, caracterizam-se pelo domínio de areias (85%, 94%, 87,5% e 85,5%, respectivamente), granulometria a qual propicia maiores taxas de infiltração (SILVA, 1999; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012; MATHIAS, 2016). Entretanto, ao analisar os demais pontos (18, 19, 29 e 30), verifica-se que estes são majoritariamente compostos por argilas, apresentando, respectivamente, porcentagens da referida fração de 54,5%; 59,5%, 53,5% e 58,5%, podendo ser identificados como NITOSSOLOS Eutróficos ou Distróficos. A alta taxa de infiltração em solos argilosos não é algo esperado (FENDRICH *et al.*, 1997; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012), constituindo-se em uma resposta não linear do sistema e que agrega complexidade à análise (CHRISTOFOLLETTI, 1999, MURRAY, *et al.*, 2009). Assim, através de análises em campo, verificou-se que tais pontos estão localizados em áreas com formação de gretas em superfície e fendas em subsuperfície (Figura 18).

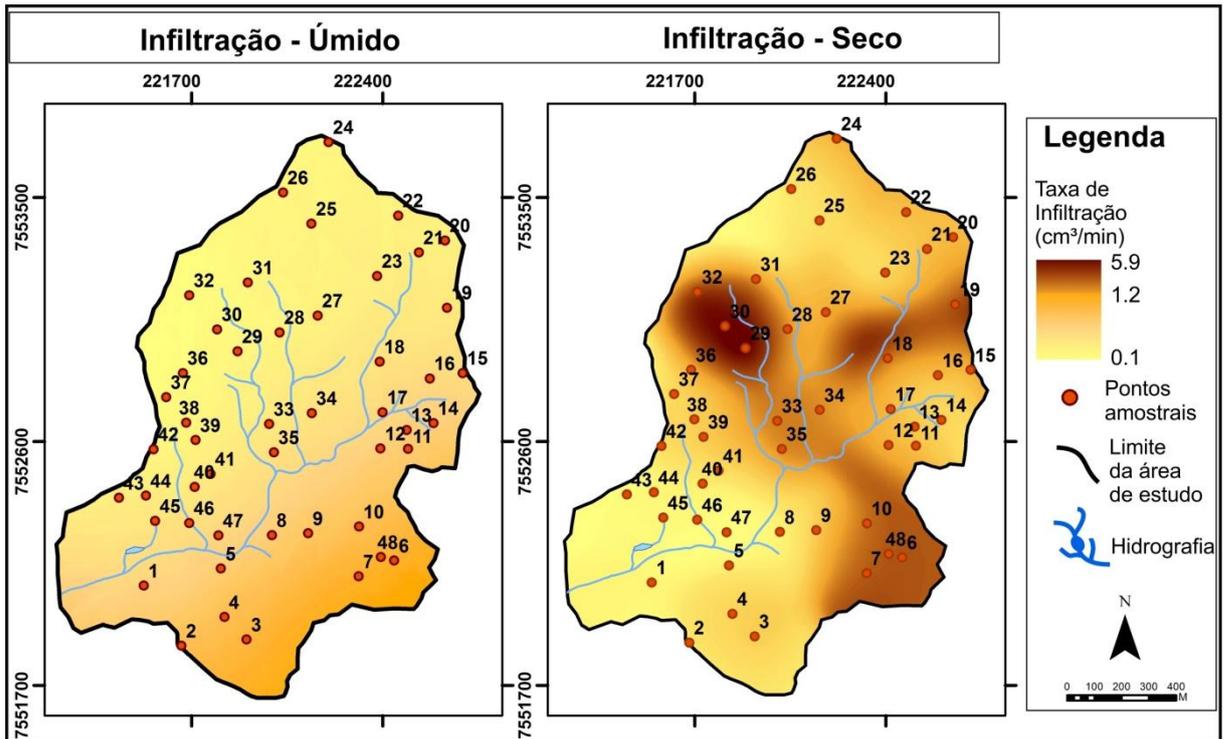


Figura 17 - Distribuição espacial da taxa média de infiltração na bacia hidrográfica.



Figura 18 – Fendas de ressecamento em perfil exposto em campo. Foto tirada em área próxima ao Ponto 19.

Com isso, as gretas e fendas tornam-se caminhos preferenciais para a infiltração da água, podendo justificar a associação entre altas taxas de infiltração e solos argilosos, sendo tal fato confirmado ao analisar estatisticamente a relação entre infiltração e a fração argila (Tabela 2), na qual, durante o período úmido, registra-se uma correlação negativa moderada, fato que, durante o período seco, é minimizado e passa a apresentar correlação nula. Assim, no período seco, em função das fendas e gretas, tem-se maior infiltração, alterando a correlação estatística registrada no período de chuvas.

Tabela 2 – Correlações estatísticas das variáveis físicas dos solos.

Período Úmido										
Variáveis	RP - 10 a 15 cm	RP - 25 a 30 cm	RP - 60 cm	Infiltração	Permeabilidade	Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Silte	Argila
RP - 10 a 15 cm	1									
RP - 25 a 30 cm	0.817	1								
RP - 60 cm	0.526	0.790	1							
Infiltração	-0.193	-0.387	-0.536	1						
Permeabilidade	-0.091	-0.016	0.140	-0.133	1					
Areia Grossa	-0.113	-0.286	-0.400	0.195	-0.427	1				
Areia Fina	-0.520	-0.548	-0.594	0.337	-0.104	0.088	1			
Areia Total	-0.427	-0.552	-0.644	0.443	-0.389	0.619	0.785	1		
Silte	0.282	0.331	0.463	-0.168	0.330	-0.436	-0.325	-0.529	1	
Argila	0.383	0.528	0.735	-0.584	0.358	-0.464	-0.693	-0.845	0.402	1

RP - Resistência à Penetração

Período Seco										
Variáveis	RP - 10 a 15 cm	RP - 25 a 30 cm	RP - 60 cm	Infiltração	Permeabilidade	Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Silte	Argila
RP - 10 a 15 cm	1									
RP - 25 a 30 cm	0.858	1								
RP - 60 cm	0.770	0.845	1							
Infiltração	-0.076	-0.178	0.079	1						
Permeabilidade	0.097	0.061	0.211	0.099	1					
Areia Grossa	-0.176	-0.207	-0.371	-0.355	-0.427	1				
Areia Fina	-0.636	-0.541	-0.428	0.020	-0.104	0.088	1			
Areia Total	-0.608	-0.552	-0.573	-0.161	-0.389	0.619	0.785	1		
Silte	0.374	0.447	0.541	0.175	0.330	-0.436	-0.325	-0.529	1	
Argila	0.684	0.626	0.569	-0.021	0.358	-0.464	-0.693	-0.845	0.402	1

RP - Resistência à Penetração

Intensidade da Correlação

+	Muito Forte	Muito Forte
	Forte	Forte
	Moderada	Moderada
	Fraca	Fraca
	Nula	Nula
-		

Intensidade da Correlação

+	Muito Forte	Muito Forte
	Forte	Forte
	Moderada	Moderada
	Fraca	Fraca
	Nula	Nula
-		

No que se refere à resistência do solo à penetração, identificaram-se, através das correlações estatísticas (Tabela 2) e tratamentos geoestatísticas (Figura 19), variações na taxa de resistência de acordo com a característica granulométrica do material, com o período de amostragem (úmido ou seco) e com a profundidade e camada de amostragem (10-15 cm, 25-30 cm ou 60 cm).

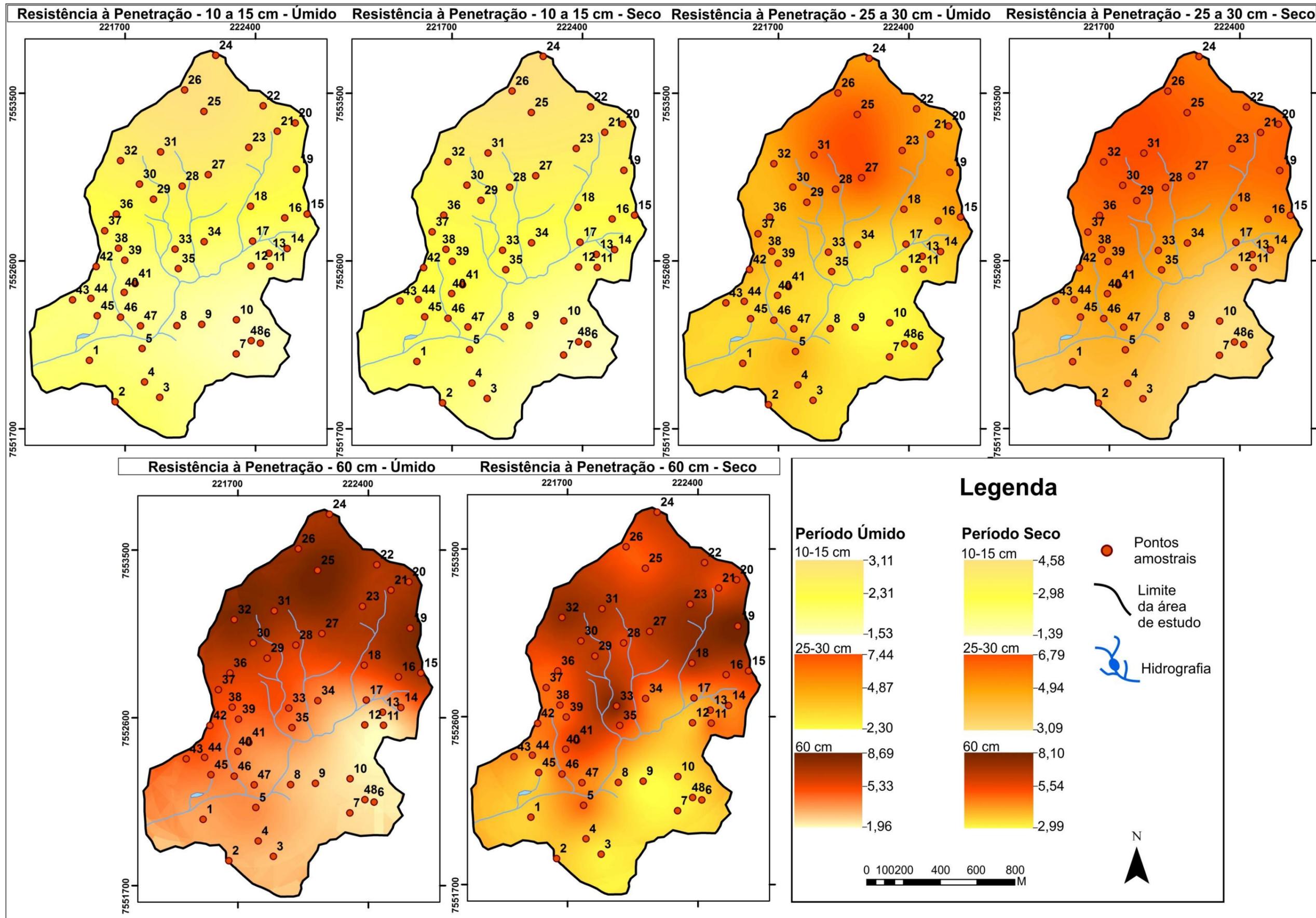


Figura 19 - Distribuição espacial da resistência do solo à penetração na bacia hidrográfica.

Em relação à granulometria, foi possível identificar uma correlação positiva (Tabela 2) entre a resistência à penetração e a fração argila no setor norte (Figura 19), além de correlações negativas (Tabela 2) entre a resistência e solos com granulometria arenosa no sul (Figura 19). Os solos com textura argilosa podem apresentar maior grau de agregação entre as partículas, diferentemente do que ocorre em solos com predominância de granulometria arenosa (FENDRICH *et al.*, 1997; BRYK, 2018). No entanto, identificou-se neste estudo que tais materiais apresentaram comportamentos variados a depender do período do ano (úmido ou seco), fato responsável por agregar complexidade à análise da interação.

Assim, de acordo com Imhoff *et al.* (2000), Vaz *et al.* (2011) e Torres *et al.* (2012), predominantemente durante o período úmido, as taxas de resistência à penetração tendem a ser menores em comparação ao período seco, uma vez que a umidade do solo pode apresentar correlação negativa com a resistência. Nesta pesquisa, tal fato é identificado somente na camada de superfície (10-15 cm), na qual se registram taxas de resistência mais baixas durante o período úmido (Figura 19) e correlações entre resistência da camada superficial e a fração argila de 0,685, durante o período seco, e 0,383, durante o período úmido.

Já na camada de subsuperfície e de profundidade, identificou-se algo interessante: de acordo com a geoespacialização, o setor norte apresenta maior resistência durante o período úmido (máximo de 7.44 Mpa e 8.69 Mpa, respectivamente). As maiores taxas de resistência durante o período úmido estão associadas ao setor argiloso da bacia, período em que tais argilas estão hidratadas e apresentam uma porosidade reduzida. Já no período seco, a partir do processo de origem das fendas (GOMES, 1986), as argilas podem formar vazios, o que acarreta menos atrito à haste do equipamento utilizado neste estudo, fato que justifica a menor resistência identificada em algumas camadas durante o período seco.

Por fim, em relação à análise da resistência à penetração por camada de amostragem, constatou-se, através dos dados estatísticos (Tabela 2), que, em ambos os períodos, ocorrem correlações moderadas e fortes entre os estratos. Isso quer dizer que ao registrar-se um aumento de resistência em uma das camadas, há alta probabilidade das outras faixas apresentarem comportamento similar, atestando a homogeneidade da resistência ao longo do perfil. Observa-se, também, através dos dados espaciais (Figura 19), uma relação positiva entre resistência à penetração e profundidade da camada, constituindo-se em um dado esperado, uma vez que camadas inferiores tendem a estar submetidas à maior pressão devido ao pacote de material que as recobre.

No que se refere à permeabilidade, identificou-se uma associação entre baixas taxas e o setor argiloso ao norte da bacia e altas taxas e o setor arenoso ao sul, fato que aponta para uma possível associação geoespacial entre material e permeabilidade (SILVEIRA; LUPINACCI, 2018; Figura 20). No entanto, estatisticamente (Tabela 2), registram-se apenas correlações fracas e nulas entre a variável permeabilidade e as demais. Tal fato pode ser entendido, em relação às variáveis infiltração e resistência, como consequência do procedimento de permeabilidade ser desenvolvido em laboratório e os outros dois serem aplicados em campo, fato que atribui outras características aos materiais, principalmente por influência do uso da terra.

Assim, constata-se que o setor norte da bacia, apesar da baixa permeabilidade vinculada à presença de argilas (Figura 20), apresenta altas taxas de infiltração (Figura 17), fato atribuído às gretas e fendas de ressecamento; e têm-se os maiores valores de resistência à penetração (Figura 19), contudo com variações significativas destes do período seco para o úmido, fato também relacionado à hidratação das fendas e gretas de ressecamento. Em contrapartida, no setor sul, identifica-se alta permeabilidade associada ao material arenoso (Figura 20) assim como as maiores taxa de infiltração no período úmido. No período seco, tal fato torna-se mais complexo, uma vez que no contexto geral da área o setor sul apresenta taxas de infiltração menores em relação ao setor norte, onde ocorre uma taxa excessiva de infiltração em função das fendas e gretas de ressecamento.

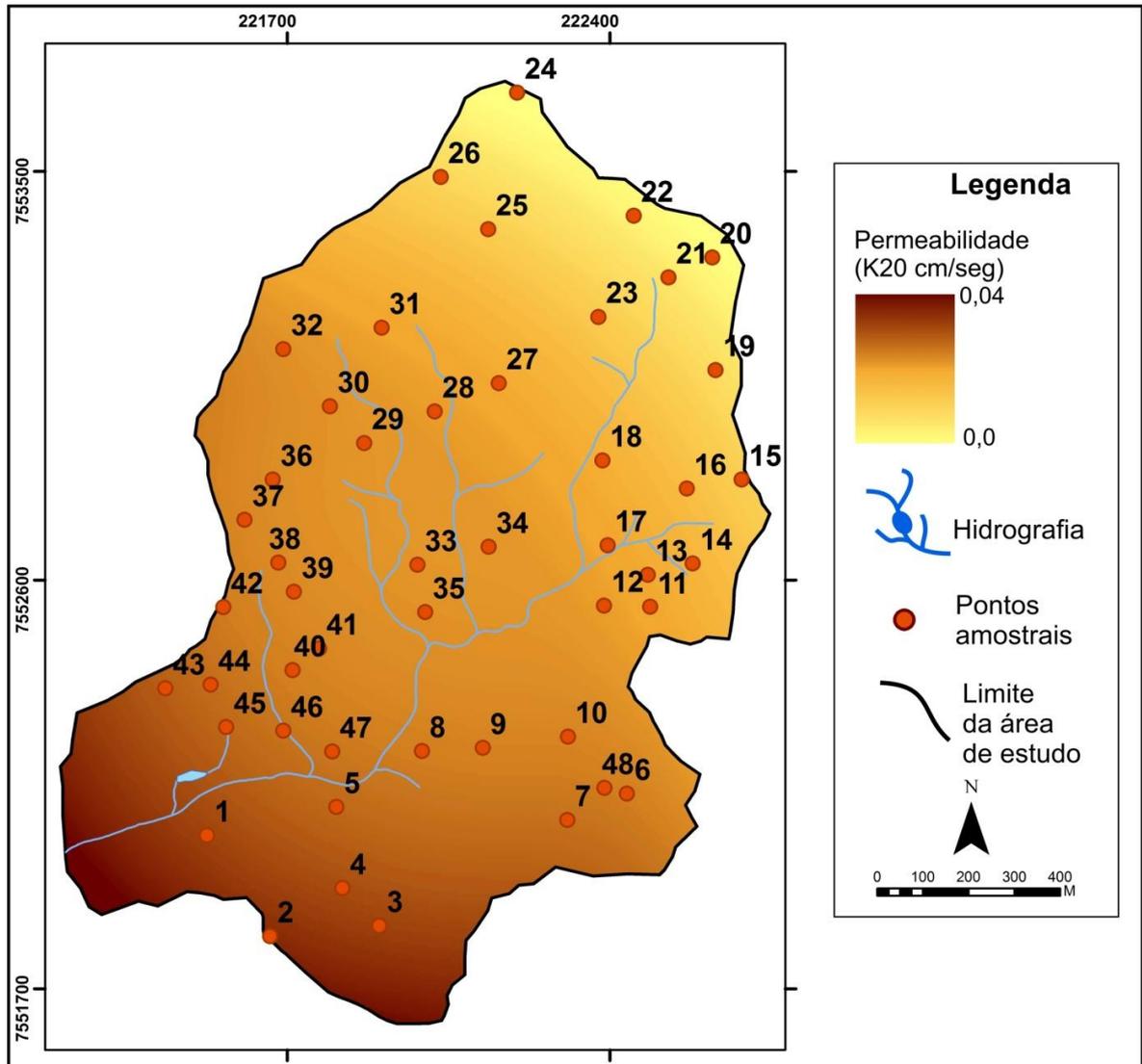


Figura 20 - Distribuição espacial da taxa de permeabilidade na bacia hidrográfica.

5.2. A integração das variáveis físicas dos solos para composição das cartas de características e comportamento dos materiais

Para a construção das cartas de características e comportamento dos materiais, foi aplicada uma análise fatorial às variáveis apresentadas no tópico anterior. Em ambos os períodos (úmido e seco), foram constatados pesos positivos, com relevância estatística acima de 0,5 para as variáveis: resistência do solo à penetração, em todas as camadas, e para as frações granulométricas argila e silte. Já os fatores com relevância negativa foram atribuídos aos dados de granulometria arenosa (areia fina, areia grossa, areia total) e, no período úmido, ao dado de infiltração. Os dados de permeabilidade não apresentaram relevância no modelo. Assim, destaca-se que os pesos atribuídos às variáveis oscilaram de acordo com o período, como, por exemplo, com a variável resistência à penetração (Figura 21 e 22).

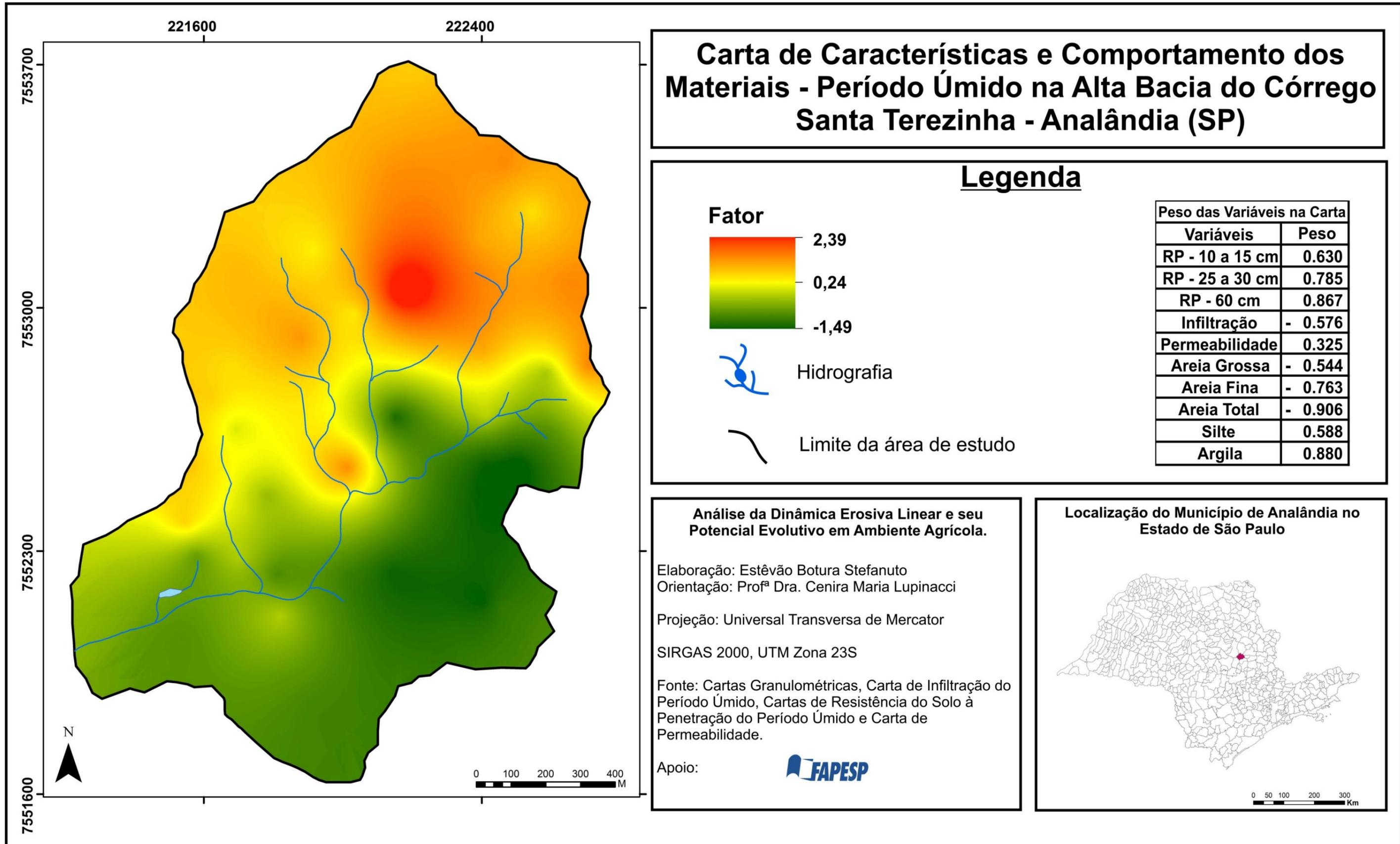


Figura 21 - Modelo espacial das características e comportamento dos materiais com o peso fatorial atribuído a cada variável. O fator do período úmido representa 50,1% das correlações possíveis na área de estudo.

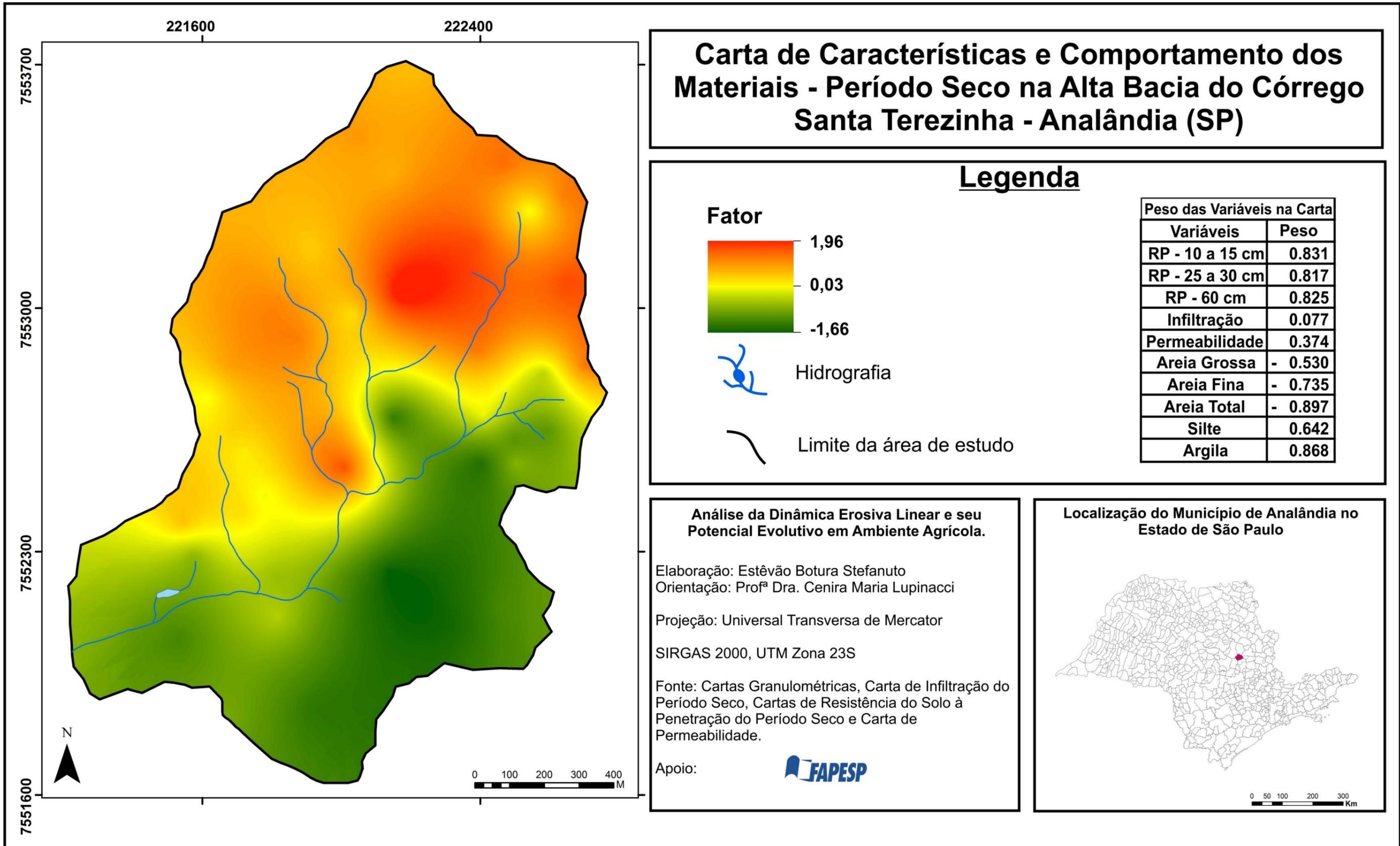


Figura 22 - Modelo espacial das características e comportamento dos materiais com o peso fatorial atribuído a cada variável. O fator do período seco representa 49,7% das correlações possíveis na área de estudo.

Desta forma, os setores representados pelos tons de laranja e vermelho são classificados como áreas de resistência à penetração marcante e quantidade de argila relevante, estando provavelmente alocados sobre ARGISSOLOS, LATOSSOLOS VERMELHO AMARELO presentes no setor norte, PLINTOSSOLOS e NITOSSOLOS. Por outro lado, setores em tons de verde representam áreas com domínio de granulometria arenosa, com destaque para as areias finas, podendo ser relacionados aos LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO do setor sul e aos NEOSSOLOS LITÓLICOS. Ademais, buscou-se avaliar a relação entre as classes das cartas de materiais com a ocorrência de feições erosivas (Tabela 3) nos períodos de 1962, 1988, 2010 e 2019 (Figura 23).

Tabela 3 – Coeficiente de 0-1 da área ocupada pelas feições erosivas lineares em cada classe das cartas de características e comportamentos dos materiais.

Período Úmido						
Feições erosivas	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
Sulcos Erosivos	0.393	0.909	1	0.303	0.393	0.636
Ravinas	0.306	0.774	0.758	1	0.209	0.258
Voçorocas	0.068	0.343	1	0.284	0.004	0
Período Seco						
Feições erosivas	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
Sulcos Erosivos	0.518	0.925	1	0.851	0.592	0.629
Ravinas	0.295	1	0.885	0.557	0.327	0.409
Voçorocas	0.104	0.43	0.869	1	0.001	0.006

A partir da análise da Tabela 3, identificou-se uma associação marcante entre as feições erosivas lineares e os setores denominados como de transição (Classes 2, 3 e 4). Os sulcos erosivos apresentam-se concentrados principalmente na Classe 3, ocorrendo uma propensão de evolução no setor transicional com fração granulométrica mais arenosa e índices de resistência à penetração reduzidos, representados pela Classe 2. Já as ravinas concentram-se, durante o período úmido, na Classe 4 e, durante o período seco, na Classe 2, no entanto, em ambos os períodos, registra-se índice relevante na Classe 3. Por fim, as voçorocas apresentam-se concentradas, durante o período úmido, na Classe 3 e, durante o período seco, na Classe 4. As áreas de transição e de propensão ao desenvolvimento de feições erosivas, caracterizam-se, como já mencionado, pela ocorrência de LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO Álico típicos do setor sul e NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos. Tal afirmação ganha força a partir dos dados litológicos (Figura 2) da área de estudo (IG, 1984), os quais apontam como substrato predominante às formações Santa Rita do Passa Quatro e Botucatu, podendo ser a primeira associada aos LATOSSOLOS do setor sul (MASSOLI, 1981) e a segunda como substrato fornecedor de areias finas (IPT, 1981b) para os NEOSSOLOS (OLIVEIRA; PRADO, 1984).

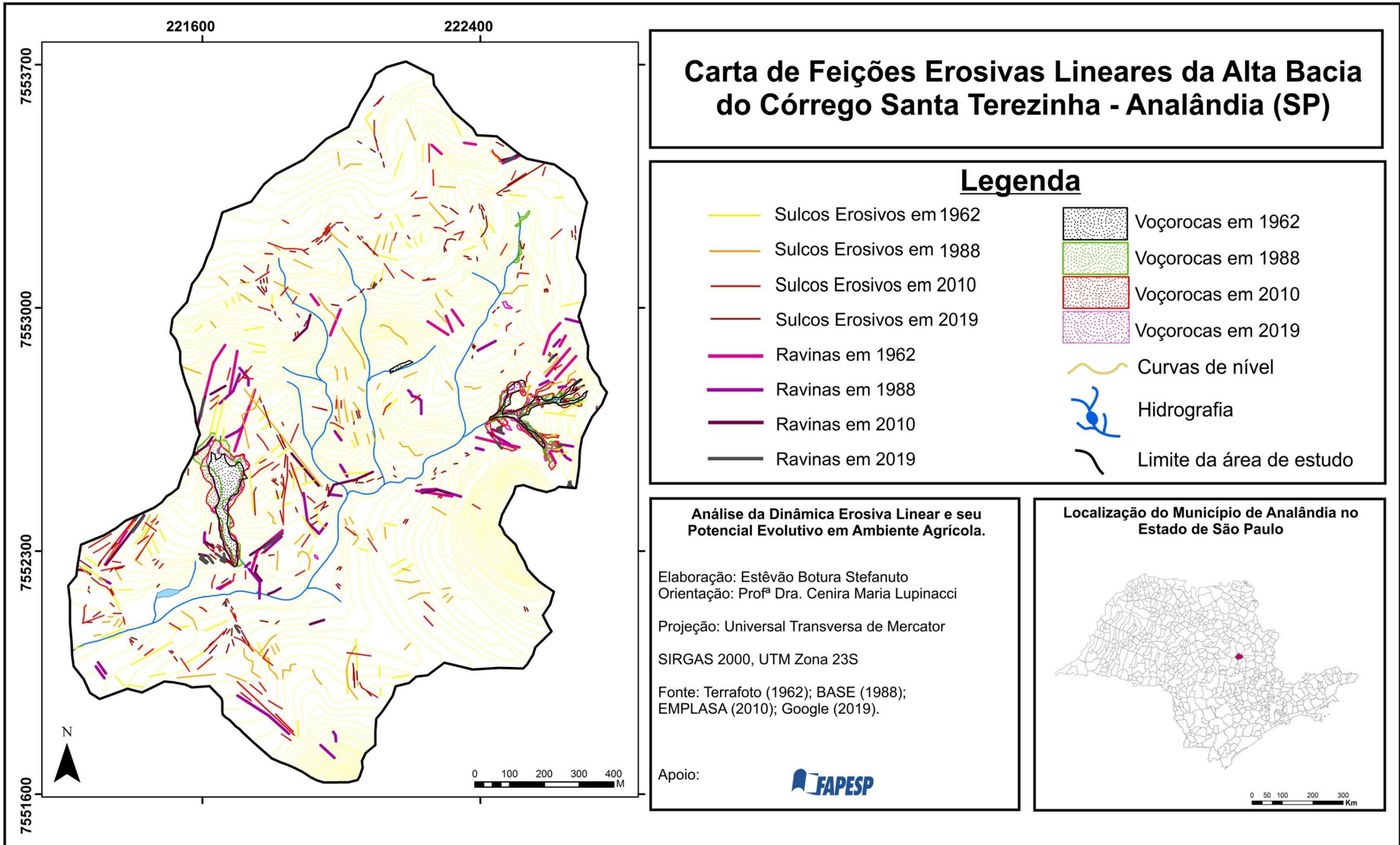


Figura 23 – Carta de Feições Erosivas Lineares da Alta Bacia do Córrego Santa Terezinha – Analândia (SP).

Assim, considera-se que o contato entre os setores norte e sul constitui-se em uma área de maior fragilidade erosiva do ponto de vista dos materiais, fato comprovado por 95% (período úmido e período seco) das feições erosivas mapeadas ocorrerem em classes identificadas como setores de transição (Classes 2, 3 e 4, Tabela 3). Entende-se que a relação de vizinhança entre os setores norte e sul colabora para tal fragilidade e agrega complexidade ao entendimento do sistema, visto que vertentes ao norte apresentam maior resistência, menor permeabilidade e, portanto, no período úmido, menor infiltração, estabelecendo um contato com setores mais arenosos e de menor resistência ao sul. Com isso, as vertentes ao norte, localizadas em *front cuestasiforme*, que podem alcançar até 79° de inclinação, agregam energia cinética às águas das chuvas, as quais direcionam o fluxo de água para o fundo de vale da bacia (setor sul) e encontram um tálus composto por solos mais friáveis, arenosos e pouco agregados. Com isso, compreende-se tal comportamento como típico de sistemas em sequência, no qual se evidenciam uma cadeia de subsistemas que se inter-relacionam (CHORLEY; KENNEDY, 1971).

5.3. Análise da declividade e do comportamento do escoamento superficial

A declividade do relevo constitui-se em um elemento de suma importância para o entendimento da origem e evolução de feições erosivas, uma vez que pode agregar energia gravitacional às águas das chuvas, possibilitando um aumento na energia de escoamento superficial e de fluxos direcionados (SHEN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2019). A partir da carta de declividade (Figura 24), identificaram-se as grandes estruturas da bacia hidrográfica, como o *front* da *cuesta* e os morros residuais do Cuscuzeiro ao sul, e do Camelo a sudeste. Nesse sentido, ao analisar os dados de declividade com maior relevância em área ocupada, confirmou-se o relevo marcante do setor (STEFANUTO; LUPINACCI, 2016), sendo 14,6% caracterizado por declividade de 30-45%; 53,7% por terrenos com declividade de 12-30%; e 17,7% do terreno com declividade de 5-12%.

Ao avaliar a distribuição espacial das feições erosivas pelas classes de declividade (Tabela 4), constatou-se que os sulcos erosivos apresentam-se bem distribuídos, com destaque para as classes $\leq 2\%$ e 12-30%, sendo que esta última também apresentou concentração de ravinas. As voçorocas concentraram-se nas classes de declividade mais elevadas da bacia, 30-45% e $\geq 45\%$. Em função da inclinação do terreno, os setores identificados pela classe de declividade $\leq 2\%$ são áreas passíveis de uso agrícola, que, a depender do manejo, podem apresentar o desenvolvimento de processos erosivos como os sulcos (PINTON; CUNHA,

2015). Não obstante, a classe de 12-30% representa dificuldades para o manejo, sendo em grande parte da bacia hidrográfica destinada à pecuária, prática a qual possui estreita relação com o desenvolvimento de sulcos erosivos (CASANELLAS *et al.*, 2003), os quais, sob a atuação do escoamento superficial e concentração da energia da água, podem atingir e desenvolver dimensões e características de ravinas (ZUQUETTE *et al.*, 2007). Por fim, as classes de 30-45% e $\geq 45\%$ agregam alta energia às águas do escoamento, fato que aumenta a capacidade de erodirem de forma acelerada setores extensos, como das voçorocas (FENDRICH *et al.*, 1997), os quais são compostos por taludes erosivos íngremes, caracterizados por quebras abruptas no terreno e, conseqüentemente, alta declividade.

Tabela 4 - Coeficiente de 0-1 da área ocupada por feições erosivas lineares em cada classe de declividade.

Feições Erosivas	Declividade					
	< 2%	2 - 5%	5 - 12%	12 - 30%	30 - 45%	>45%
Sulcos Erosivos	1	0.675	0.675	0.916	0.541	0.358
Ravinas	0.136	0.136	0.561	1	0.767	0.506
Voçorocas	0.108	0.158	0.1	0.375	0.916	1

Outro elemento que pode influenciar no desenvolvimento de feições erosivas é fluxo acumulado de superfície (Figura 25), o qual se apresenta em destaque nas vertentes do setor sul e mais ameno nos setores central e norte da bacia hidrográfica. As três principais classes de fluxo acumulado, em área, são as de 25 – 625; de 625,1 – 2.500; e de 2.500,1 – 12.500, sendo que ocupam, respectivamente, 12%, 29,9% e 34,1% da bacia. Já as classes mais elevadas, de 25.000,1 – 50.000; de 50.000,1 – 250.000; e $\geq 250.000,1$, ocupam menor área, apresentando respectivamente 6%, 4,7% e 2,9%. Portanto, compreende-se que a bacia hidrográfica estudada apresenta em grande parte da sua extensão fluxos acumulados com valores pouco elevados no universo da área de estudo, o que pode ser explicado pela presença de vertentes pouco extensas, principalmente no setor norte, onde se tem a ação de entalhamento das drenagens obsequentes sobre os setores do *front cuestasiforme*.

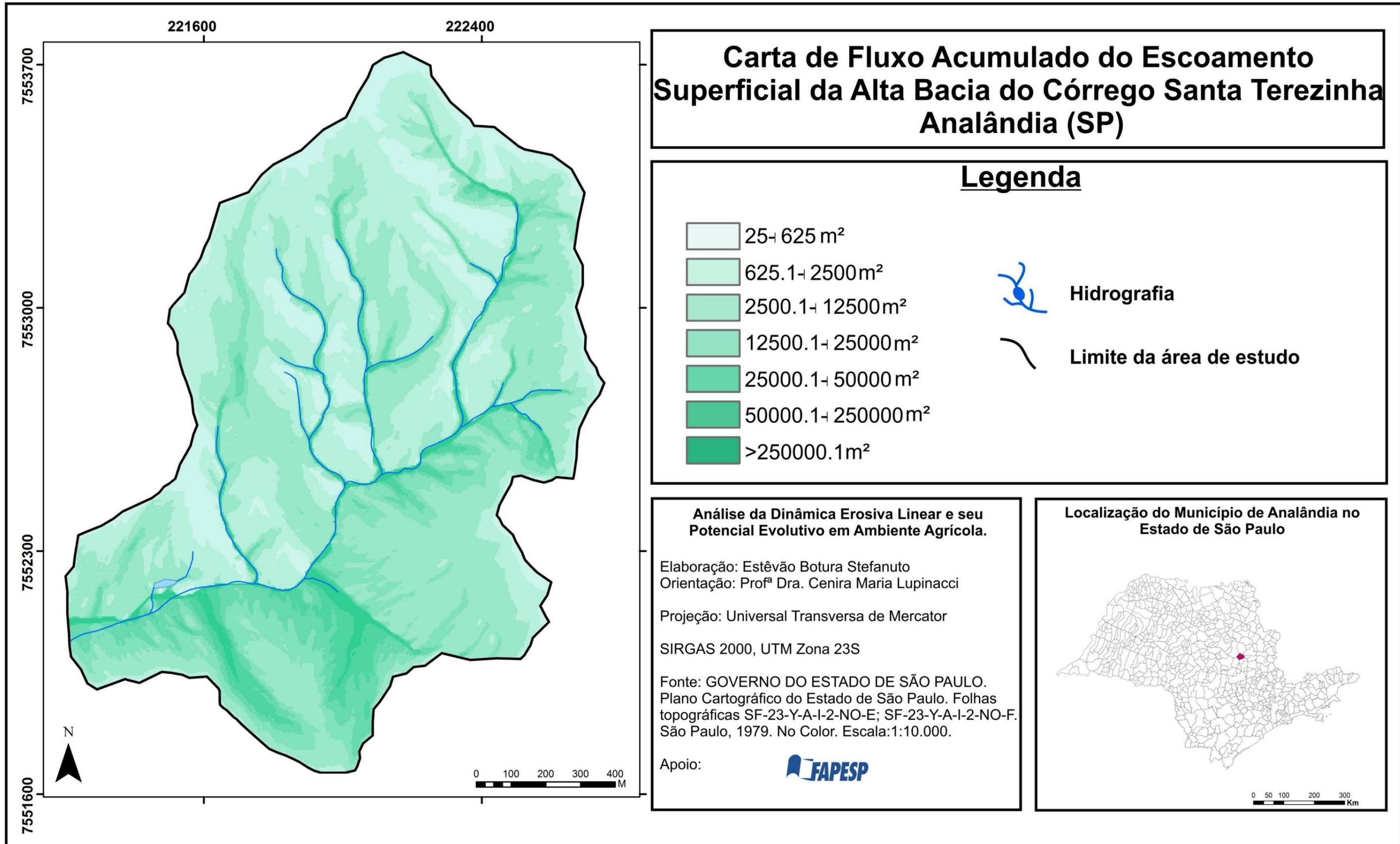


Figura 25 – Carta de Fluxo Acumulado do Escoamento Superficial da Alta Bacia do Córrego Santa Terezinha – Analândia (SP).

Ainda, ao comparar a disposição das feições erosivas lineares em relação às classes de fluxo acumulado (Tabela 5), identificou-se uma disposição equilibrada de sulcos e de ravinas na maioria das classes de fluxo, sendo que os índices de concentração máxima ocorreram nas Classes 3 e 4, respectivamente. Em um primeiro momento, registrou-se uma concentração de feições erosivas em classes de fluxo médias e baixas para o contexto da bacia, algo que não é esperado. No entanto, ao comparar os valores das classes (2.500,1 – 12.500 e 25.000,1 – 50.000) aos valores obtidos em outras pesquisas (MATHIAS, 2016; MORAES *et al.*, 2014), averiguou-se que estes são expressivos. Constatou-se, ainda, que a concentração de sulcos e ravinas em classes com valores relativamente baixos, está submetida à influência de valores extremamente altos de algumas vertentes localizadas ao sul da bacia hidrográfica (50.000,1 – 250.000; e $\geq 250.000,1$). Já as feições do tipo voçoroca, por suas grandes dimensões, tendem a gerar áreas de canalização do fluxo de superfície, algumas vezes com o afloramento do lençol freático, que permitiu uma concentração em classes de fluxo elevado (Classe 6). Com isso, constatou-se um aumento das classes de fluxo acumulado, de acordo com a intensidade da erosão linear, fato refletido pelo tipo de feição erosiva.

Tabela 5 – Coeficiente de 0-1 da área ocupada por feições erosivas lineares em cada classe da carta de fluxo acumulado. Valores das classes: classe 1 (25-625); classe 2 (625,1-2.500); classe 3(2.500,1-12.500); classe 4(12.500,1-25.000); classe 5(25.000,1 – 50.000); classe 6(50.000,1 – 250.000) e classe 7 (>250.000,1).

Feições Erosivas	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7
Sulcos Erosivos	0.681	0.727	1	0.818	0.772	0.954	0.545
Ravinas	0.921	0.736	0.815	1	0.473	0.684	0.552
Voçorocas	0.373	0.136	0.294	0.168	0.147	1	0.089

Portanto, compreende-se que os dados de declividade e fluxo acumulado ratificam a atuação de um escoamento laminar dotado de energia e proveniente do setor norte sobre a área de fragilidade, identificada pela carta de características e comportamento dos materiais. As vertentes íngremes e com valores de fluxo acumulado baixos e médios no contexto desta bacia, quando comparados a estudos aplicados a setores *cuestiformes* (MATHIAS, 2016) e à Depressão Periférica (MORAES *et al.*, 2014), possuem dimensões até cinco vezes maiores contribuindo para a distribuição espacial das feições erosivas lineares.

5.4. Análise do uso e ocupação da terra de 2010 e de 2019

No que se refere ao uso da terra em 2010 (Figura 26), identificou-se uma predominância de pastagens, com destaque para os pastos limpos (51%) e uma relevância na área ocupada pela classe vegetação arbórea (29,7%). Destacaram-se ainda as classes pasto

degradado (1,7%), pasto sujo (3,12%), solo exposto (1,1%) e vegetação invasora (2,34%), as quais são responsáveis por caracterizarem áreas com baixo uso de técnicas conservacionistas, fato atestado em campo, em diversos setores da bacia hidrográfica. A partir da carta de uso e ocupação da terra de 2019 (Figura 27) também se identificaram as classes pasto limpo (43,1%) e vegetação arbórea (28,4%) como predominantes, sendo que as classes pasto sujo (6,5%) e vegetação invasora (7,8%) obtiveram expressivos aumentos, registrando-se uma redução na área de pasto degradado (1,1%) e solo exposto (0,9%). Assim, ao analisar o uso da terra em comparação às feições erosivas, identificaram-se algumas similaridades entre os anos analisados e algumas variações (Tabela 6).

Tabela 6 – Coeficiente de 0-1 da área ocupada por feições erosivas em cada classe de uso da terra nos anos de 2010 e 2019.

Feições Erosivas	Uso e Ocupação da Terra em 2010			
	Estrada Rural	Pasto Degradado	Pasto Limpo	Pasto Sujo
Sulcos Erosivos	0.158	1	0.502	0.249
Ravinas	0	0.046	0.034	0.325
Voçorocas	0	0.003	0.034	0.036
	Solo Exposto	Vegetação Arbórea	Vegetação Área Úmida	Vegetação Invasora
Sulcos Erosivos	0.767	0	0	0.172
Ravinas	1	0	0.014	0
Voçorocas	0.405	0.018	1	0.094
Feição erosiva	Uso e Ocupação da Terra em 2019			
	Estrada Rural	Pasto Degradado	Pasto Limpo	Pasto Sujo
Sulcos Erosivos	0.003	1	0.11	0.099
Ravinas	0	1	0.053	0.071
Voçorocas	0	0.791	0.032	0.007
	Solo Exposto	Vegetação Arbórea	Vegetação Área Úmida	Vegetação Invasora
Sulcos Erosivos	0.613	0.004	0.011	0.019
Ravinas	0.783	0.007	0	0.042
Voçorocas	0.293	0.216	1	0.064

A partir da Tabela 6, no que corresponde aos sulcos erosivos, identificou-se em 2010 uma associação relevante com as classes pasto degradado, solo exposto e pasto limpo. Já em 2019 ocorreram algumas mudanças, registrando-se concentração de sulcos somente nas classes pasto degradado e solo exposto. A associação de sulcos erosivos a pastos degradados e solos expostos deve-se ao déficit ou ausência de cobertura vegetal (NORTCLIFF *et al.*, 1990; BHATTACHARYYA *et al.*, 2011), fato que permite a atuação direta de processos geomorfológicos como o *splash* e o *runoff*. Nestes casos, o déficit ou ausência de cobertura vegetal estão associados a setores de pastagens voltadas para pecuária com baixo grau de manutenção e de manejo, sendo tal prática agrícola responsável por desenvolver sulcos erosivos mesmo em áreas de pasto limpo, como registrado em 2010, fato que não se repete em 2019. No último cenário, algumas áreas que se caracterizavam como pasto limpo em 2010,

com a presença de sulcos erosivos, apresentaram-se mais degradadas, originando uma área de pastagens caracterizada pela presença de sulcos e déficit na cobertura herbácea, fato que possibilitou a caracterização de tais setores como pastos degradados em 2019.

Em relação às ravinas, destacam-se as classes solo exposto em 2010 e 2019, e pasto degradado somente em 2019. A ligação entre ravinas e solo exposto pode estar associada à evolução erosiva acelerada, característica que não permite a instalação de vegetação no interior ou entorno das ravinas, deixando o solo desnudo. Em relação aos pastos degradados, registra-se em 2010 uma baixa relação com as feições do tipo ravina, fato que ganha expressiva relevância em 2019. Os pastos degradados foram caracterizados por áreas com déficit na cobertura herbácea, informação que nos permite compreender que, em 2019, algumas ravinas passaram a apresentar uma evolução menos acelerada do que em 2010, elemento que permitiu a instalação de gramíneas no *interrill*, característica que, pela escala de trabalho, permitiu o mapeamento de tais áreas como pastos degradados.

Em relação às voçorocas, ocorre uma nítida associação dessas com as classes vegetação de área úmida (2010 e 2019) e pasto degradado (2019). O registro da relação com a vegetação de área úmida se deve à voçoroca leste, associando-se ao aprofundamento do seu canal até o lençol freático, fazendo com que espécies típicas se instalassem no local com maior umidade (Figura 28). Em 2019, porém, ganha força a classe pasto degradado, dado que ratifica a problemática gerada por áreas de pastagem sem manutenção, elemento que pode propiciar a evolução de feições erosivas de grandes dimensões.

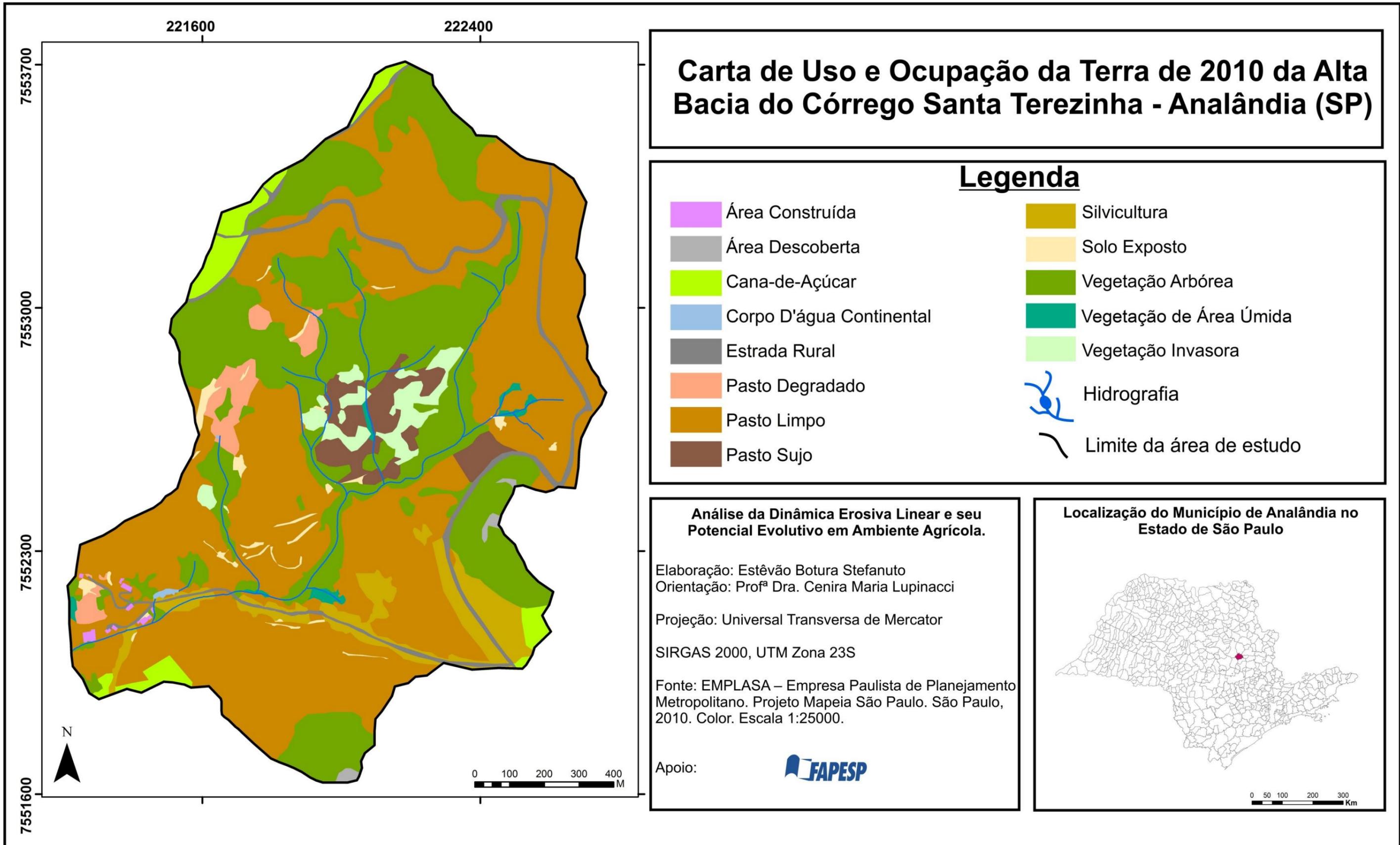


Figura 26 – Carta de Uso e Ocupação da Terra de 2010 da Alta Bacia do Córrego Santa Terezinha – Analândia (SP).

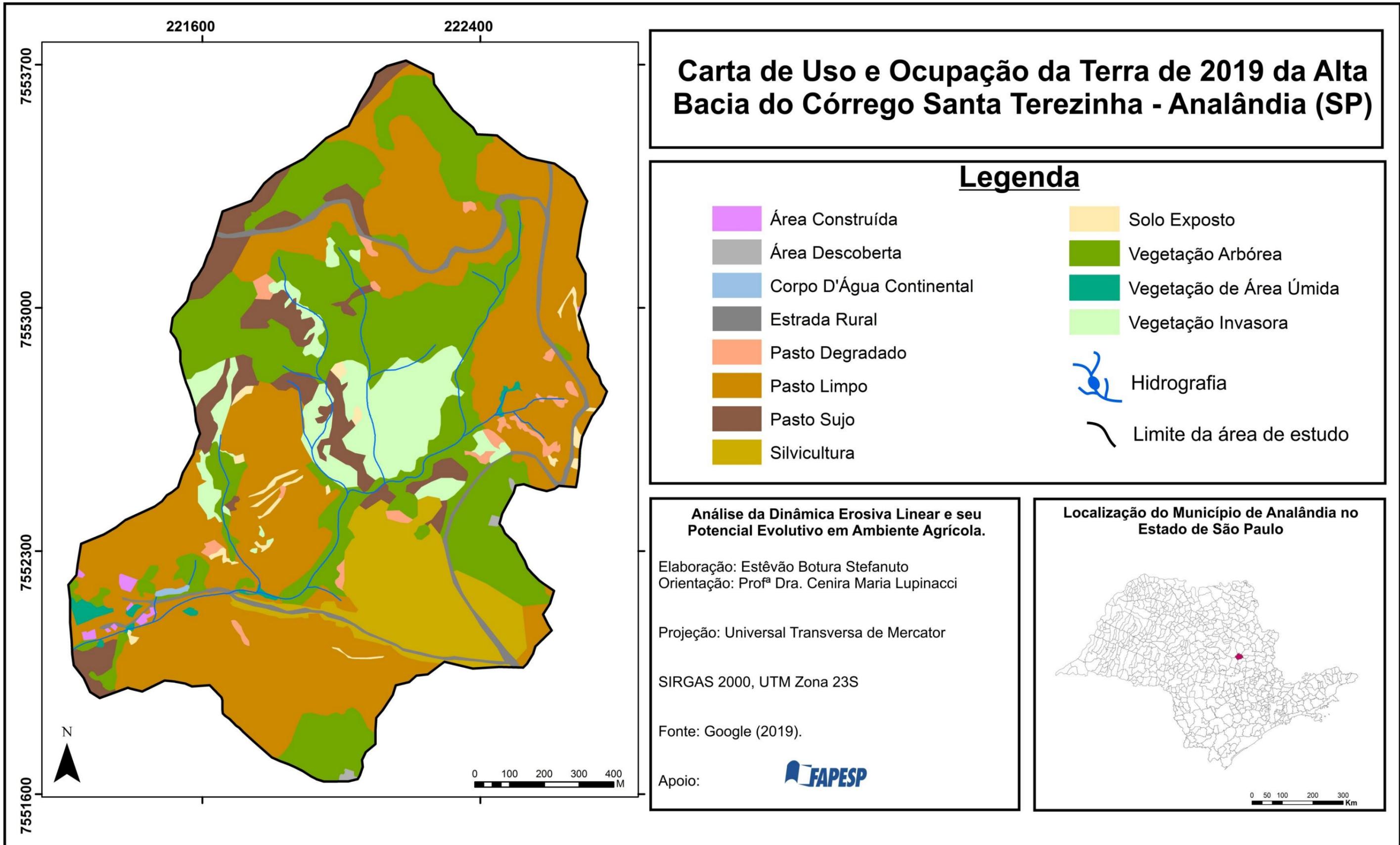


Figura 27- Carta de Uso e Ocupação da Terra de 2019 da Alta Bacia do Córrego Santa Terezinha – Analândia (SP).

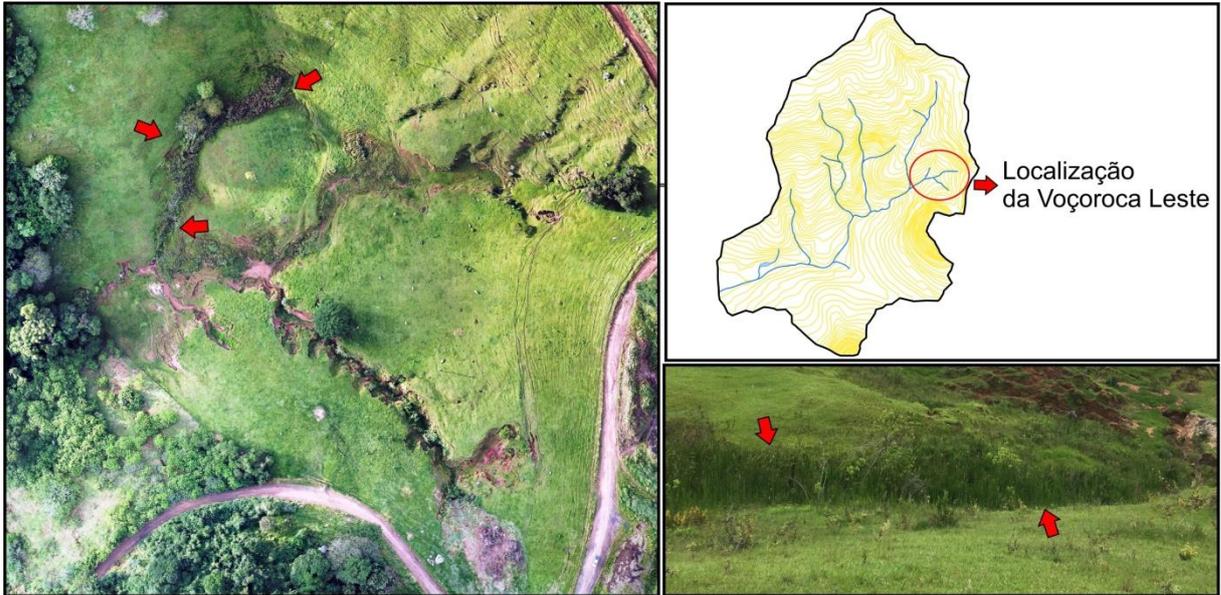


Figura 28 – À esquerda, setor da voçoroca leste dominado por vegetação típica de área úmida. À direita, foto em campo do setor.

Portanto, identificou-se entre os anos de 2010 e 2019 uma congruência entre as áreas de ocorrência de feições erosivas e o uso da terra, além de compreender que os usos da terra como maior relevância na análise apresentam uma relação intrínseca com as feições erosivas lineares. Destaca-se, também, que os usos da terra com maior ocorrência de feições erosivas (solos exposto, pasto degradado e vegetação de área úmida), conjuntamente com o aumento das classes pasto sujo e vegetação invasora de 2010 para 2019, atestam o baixo grau de manutenção das pastagens voltadas para pecuária na área de estudo, fato que pode ser entendido como um impulsionador ao desenvolvimento de processo erosivos (DIAS-FILHO, *et al.*, 2014). Elucida-se ainda que o uso da terra mapeado como pasto limpo possui algumas características de manejo específicas na área de estudo, sendo a roçada a principal técnica empregada. No entanto, outras técnicas conservacionistas efetivas, como a manutenção de curvas de nível, a rotação de pastagens com uma quantidade específica de animais e a adubação (VASQUES *et al.*, 2019), não foram identificadas em campo, como é possível observar na Figura 29. Desta forma, compreende-se a atividade pecuária como nociva ao setor estudado devido à ausência de técnicas conservacionistas aplicadas com regularidade, fator que pode desencadear processos erosivos em pastagens e a degradação da cobertura herbácea, elementos que propiciam o desenvolvimento dos setores mapeados, neste estudo, como pastos degradados ou solo exposto.



Figura 29 – Curvas de nível sendo desmanteladas por feições erosivas em função da ausência de manutenção.

5.5. Cartas de potencial ao avanço erosivo linear

Nesta subseção, analisam-se os resultados da integração das cartas apresentadas anteriormente, buscando as respectivas validações através do histórico de ocorrência de feições erosivas instaladas na área de estudo e da dinâmica evolutiva do talude da voçoroca oeste. Mediante as validações, buscou-se elencar as cartas de síntese com melhor correspondência espacial ao potencial de avanço erosivo linear da área de estudo (Figura 30).

Em uma análise preliminar, identificou-se que as cartas de síntese A e B demarcaram uma faixa de maior potencial ao avanço erosivo similar ao setor classificado como de transição nas cartas de características e comportamentos dos materiais, registrando-se, durante o período seco (Carta A), um aumento relevante na área de abrangência das classes forte e muito forte. Ainda, identificou-se no setor norte, em ambas as cartas, fraca tendência ao avanço erosivo, relacionada aos baixos valores de fluxo acumulado, ao uso da terra voltado para pastos limpos e materiais compostos por argilas com alta resistência.

As cartas de síntese C e D, em comparação às anteriores, apresentaram áreas mais extensas de alta tendência ao avanço, principalmente no setor sudoeste, fato que pode ser entendido pela concentração de feições erosivas e pela dupla aplicação do coeficiente de 0 a 1, procedimento o qual permitiu pesos iguais para todas as feições erosivas. Em relação às zonas de fraco potencial ao avanço erosivo, identificou-se a extremidade do setor norte e nordeste como área de destaque, sendo grande parte da extensão destas caracterizada por classes baixas de fluxo acumulado e declividade e uso da terra vinculado a pasto limpo e sujo.

Já as cartas de síntese E e F apresentaram os setores fortes e extremamente fortes relacionados às classes de uso da terra pasto degradado e vegetação de área úmida, fato atribuído à influência de 50% para o uso da terra empregado nos modelos com uma única aplicação do coeficiente 0 a 1, opção que valoriza os setores de voçorocamento, como pode ser observado no setor da voçoroca oeste. Também vale destacar que, nas cartas E e F, registraram-se setores de baixa tendência ao avanço relacionados ao uso da terra silvicultura (sudeste, sopé do Moro do Camelo), pastos limpos sobre setores argilosos com alta resistência (norte) e pastos limpos associados a setores de declividade de 5-12% (sudoeste).

Já as cartas G e H apresentaram os setores muito forte e extremamente forte relacionados às classes de uso da terra pasto degradado e solo exposto, identificando, em relação às cartas E e F, uma generalização da voçoroca oeste, fato atribuído à dupla aplicação do coeficiente de 0 a 1 e a consequente homogeneização no peso das feições erosivas. Por fim, as cartas G e H apresentaram um aumento por toda área de estudo das classes fraca e média de tendência ao avanço erosivo linear.

Buscando avaliar e validar quantitativamente as cartas geradas, sobrepuseram-se as informações da área de ocorrência de feições erosivas lineares e dos dados de evolução do talude erosivo da voçoroca monitorada aos dados de potencial ao avanço erosivo linear. Para isso, o estudo pautou-se na hipótese de que as áreas com maior potencial ao avanço erosivo devem coincidir com os setores de maior evolução do talude e de maior ocorrência de feições erosivas. Nessa situação, consideraram-se as cartas de síntese com melhor acurácia as que apresentaram melhor ajuste à hipótese.

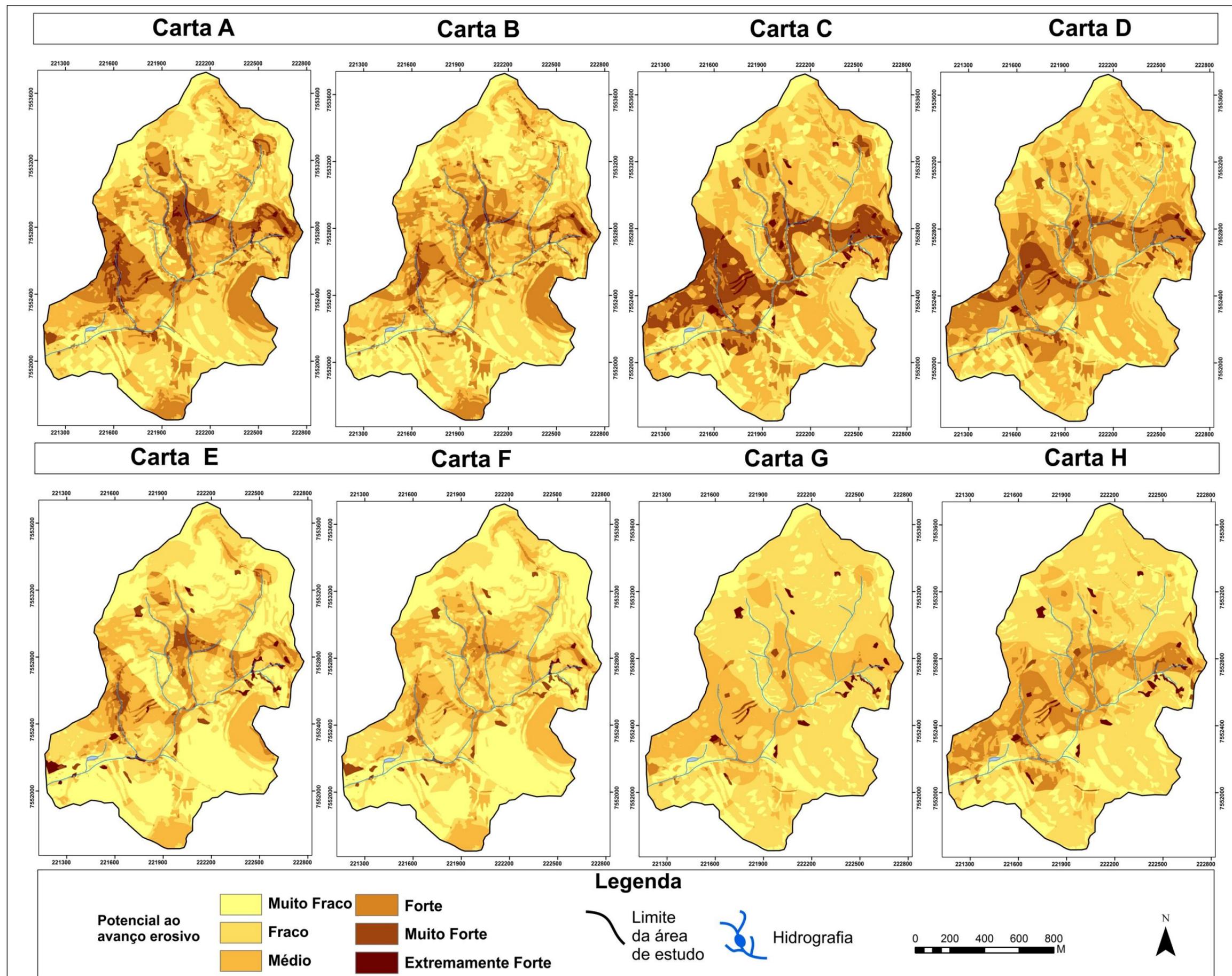


Figura 30 – Cartas de potencial ao avanço erosivo linear. Cartas A e B com influência de 25% para cada variável, considerando a área das feições, em período seco e úmido, respectivamente. Cartas C e D com influência de 25% para cada variável, utilizando a dupla aplicação do coeficiente de 0-1, em período seco e úmido, respectivamente. Cartas E e F com influência de 50% para o uso da terra, utilizando área. G e H com dupla aplicação do coeficiente de 0-1 e 50% para o uso da terra.

Primeiramente, validaram-se as cartas através da área de ocorrência de feições erosivas lineares na bacia hidrográfica. Tal procedimento permitiu identificar duas cartas de síntese com boa qualidade, uma para o período úmido e outra para o período seco (Tabela 7). Para análise, as cartas foram verificadas em duplas, considerando conjuntamente o comportamento erosivo nos períodos úmido e seco.

Tabela 7 – Área normalizada das feições erosivas por classe de potencial ao avanço erosivo linear. Em vermelho os maiores valores. Cartas A e B com influência de 25% para cada variável, considerando a área das feições. Cartas C e D com influência de 25% para cada variável, utilizando a dupla aplicação do coeficiente de 0-1. Cartas E e F com influência de 50% para o uso da terra, utilizando a área das feições. G e H com dupla aplicação do coeficiente de 0-1 e 50% de influência para o uso da terra.

CARTA A - Período seco						
Feição Erosiva	Potencial ao Avanço Erosivo Linear					
	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Sulco Erosivo	0,0091	0,0088	0,0095	0,0097	0,0110	0,0108
Ravina	0,0052	0,0118	0,0205	0,0185	0,0153	0,0111
Voçoroca	0,0027	0,0037	0,0118	0,0325	0,1580	0,3440
CARTA B - Período úmido						
Feição Erosiva	Potencial ao Avanço Erosivo Linear					
	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Sulco Erosivo	0,0080	0,0093	0,0104	0,0095	0,0115	0,0094
Ravina	0,0041	0,0137	0,0207	0,0176	0,0161	0,0174
Voçoroca	0,0037	0,0062	0,0194	0,0434	0,2234	0,5058
CARTA C - Período seco						
Feição Erosiva	Potencial ao Avanço Erosivo Linear					
	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Sulco Erosivo	0,0069	0,0062	0,0096	0,0109	0,0144	0,0307
Ravina	0,0015	0,0107	0,0135	0,0184	0,0256	0,0653
Voçoroca	0,0018	0,0028	0,0055	0,0578	0,0856	0,2203
CARTA D - Período úmido						
Feição Erosiva	Potencial ao Avanço Erosivo Linear					
	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Sulco Erosivo	0,0056	0,0068	0,0079	0,0147	0,0187	0,0429
Ravina	0,0023	0,0088	0,0118	0,0274	0,0328	0,0453
Voçoroca	0,0023	0,0034	0,0138	0,0465	0,1459	0,3303
CARTA E - Período seco						
Feição Erosiva	Potencial ao Avanço Erosivo Linear					
	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Sulco Erosivo	0,0099	0,0091	0,0075	0,0084	0,0184	0,0235
Ravina	0,0095	0,0181	0,0149	0,0155	0,0217	0,0356
Voçoroca	0,0037	0,0095	0,0213	0,1055	0,2415	0,2596
CARTA F - Período úmido						
Feição Erosiva	Potencial ao Avanço Erosivo Linear					
	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Sulco Erosivo	0,0089	0,0107	0,0069	0,0091	0,0276	0,0164
Ravina	0,0080	0,0204	0,0129	0,0157	0,0431	0,0317
Voçoroca	0,0041	0,0141	0,0291	0,1652	0,1619	0,5779
CARTA G - Período seco						
Feição Erosiva	Potencial ao Avanço Erosivo Linear					
	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Sulco Erosivo	0,0059	0,0082	0,0127	0,0137	0,0385	0,0343
Ravina	0,0038	0,0120	0,0230	0,0137	0,0676	0,0645
Voçoroca	0,0034	0,0040	0,0734	0,1365	0,1542	0,2211
CARTA H - Período úmido						
Feição Erosiva	Potencial ao Avanço Erosivo Linear					
	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Sulco Erosivo	0,0056	0,0073	0,0114	0,0164	0,0243	0,0369
Ravina	0,0029	0,0086	0,0274	0,0231	0,0501	0,0583
Voçoroca	0,0046	0,0041	0,0352	0,0925	0,1288	0,2418

A partir da Tabela 7, foi possível compreender que a dupla formada pelas cartas C (Figura 31) e D (Figura 32) (influência de 25% para cada variável, utilizando a dupla aplicação do coeficiente de 0 a 1, em período úmido e seco) apresentou os melhores resultados na análise comparativa. Os dados das cartas de síntese C e D exibiram ótima resposta em relação à área ocupada pelas feições erosivas, apresentando uma concordância entre a área de maior ocorrência e a classe máxima de potencial erosivo. Analisando os outros materiais cartográficos, identificou-se que as cartas A e B (influência de 25% para cada variável, considerando a área das feições, em período seco e úmido) evidenciaram o peso atribuído a partir da área, uma vez que a única feição a atingir boa correspondência foi a voçoroca, a qual apresenta maior extensão.

Já as cartas E, F, G e H, as quais foram geradas considerando 50% de influência para a variável uso da terra, evidenciaram comportamento similar. Os setores de voçorocamento foram valorizados em todas as cartas, identificando algumas variações nas feições do tipo sulco e ravina nas cartas F e G, causadas principalmente pela aplicação dos pesos das variáveis através da área, no caso da carta F, e pelo uso vegetação de área úmida ter uma boa aderência apenas com as voçorocas, fato que pode justificar a variação nos sulcos e ravinas identificada na carta G. Por fim, ressalva-se que as cartas E e H apresentaram ótima resposta à validação, no entanto, neste estudo, optou-se em analisar os documentos cartográficos dos períodos úmido e seco conjuntamente, impossibilitando classificar as cartas E e H como adequadas à hipótese em função de seus pares (cartas F e G, respectivamente).

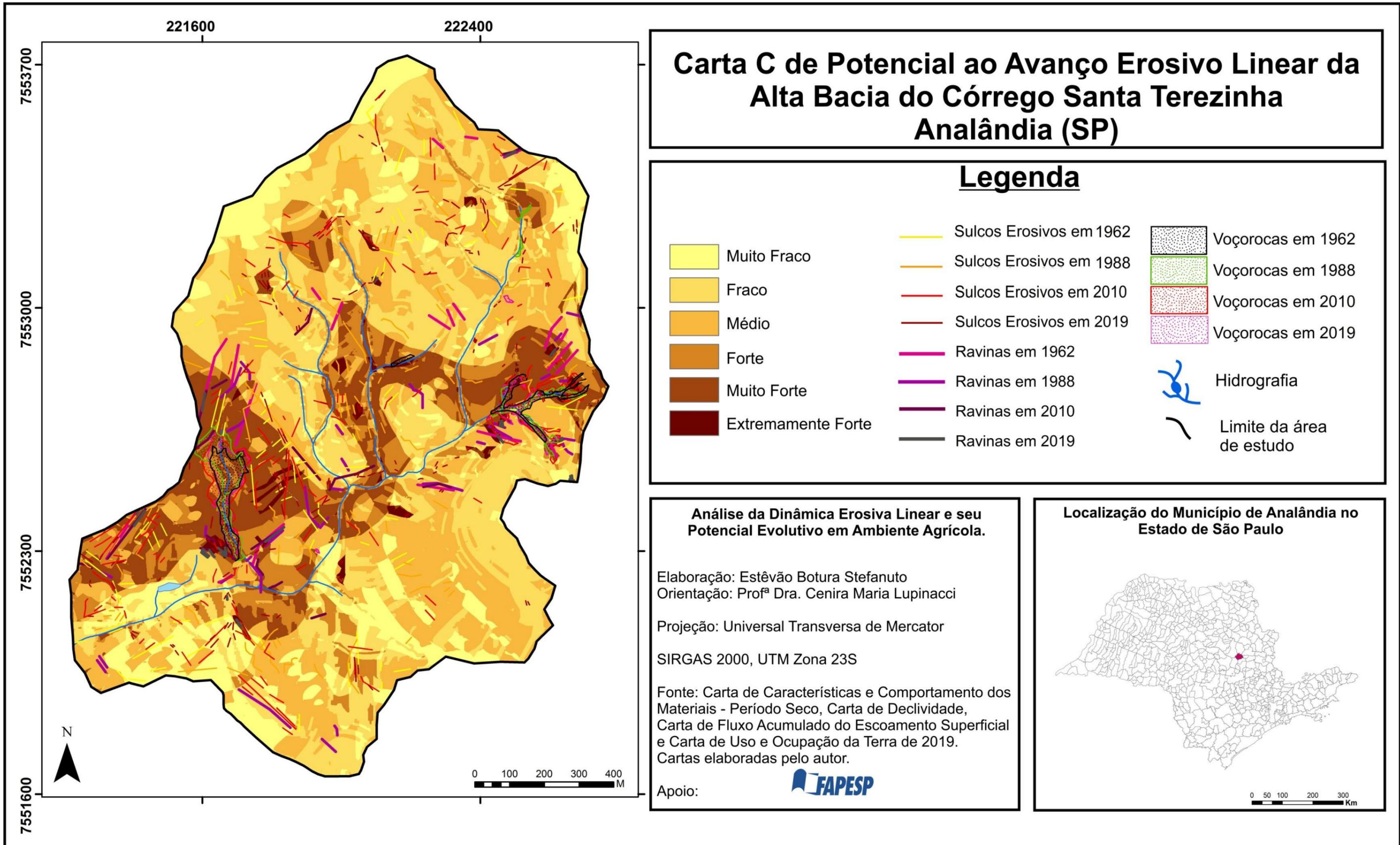


Figura 31 – Carta C de Potencial ao Avanço Erosivo Linear.

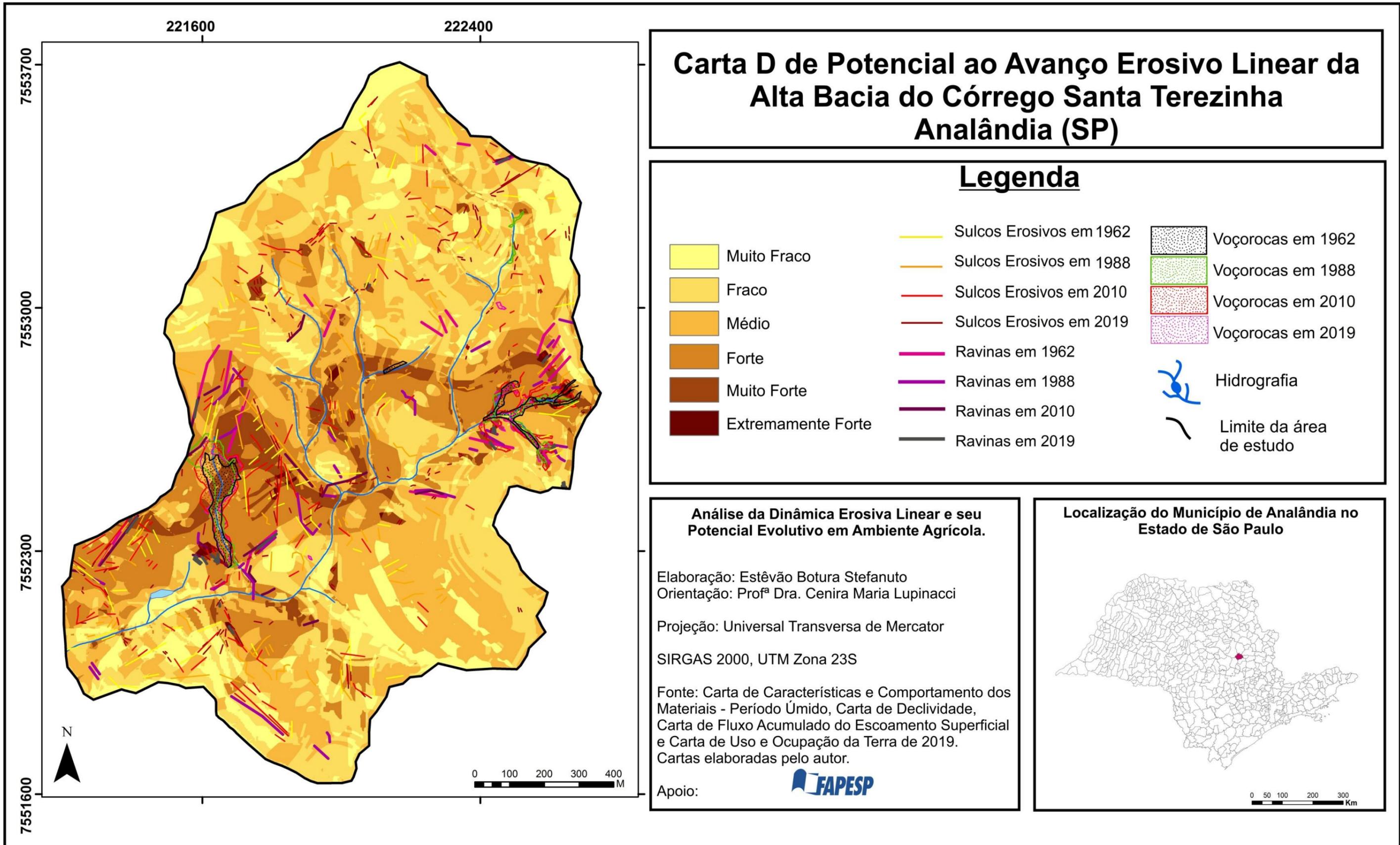


Figura 32 – Carta D de Potencial ao Avanço Erosivo Linear

Feito o primeiro procedimento de validação através das feições erosivas instaladas na área, submeteram-se às cartas de síntese a validação através dos dados de evolução do talude erosivo (Tabela 8). Neste processo, as cartas C e D não apresentaram uma resposta detalhada o suficiente para refletir o recuo do talude (Figura 33). Na carta C, as estacas de erosão concentraram-se na classe muito forte, sendo que os dados em milímetros apresentados na Tabela 8 na classe extremamente forte se devem somente a duas estacas presentes nessa classe. A carta D apresentou algumas estacas na classe de potencial ao avanço média, fato que não é esperado em um setor de expansão erosiva como o talude da voçoroca.

Já as cartas A (Figura 34) e B (Figura 35) foram as que obtiveram melhor ajuste à hipótese, apresentando uma distribuição significativa de recuo do talude entre as classes de tendência ao avanço forte, muito forte e extremamente forte (Tabela 8). Destaca-se, ainda, a boa correspondência espacial registrada nas cartas A e B (Figura 33), uma vez que se identificou uma concentração das estacas de menor evolução na classe forte e as de maior evolução na classe muito forte. No entanto, ressalva-se que as estacas localizadas na classe extremamente forte (carta A) estão submetidas a uma zona de interferência antrópica, a qual é marcada pela construção de uma barragem, fato que será discutido a seguir.

Por fim, as cartas E, F, G e H apresentaram uma série de pontos na classe média, além de baixa representatividade nas classes de tendência ao avanço muito forte e extremamente forte, características, como já mencionado, que não são esperadas para frente de evolução de uma voçoroca.

Vale destacar, como mencionado anteriormente, um setor do talude erosivo, o qual não apresentou boa resposta no cruzamento das variáveis, gerando uma área de distorção (Figura 36), atribuída, principalmente, aos dados da variável fluxo acumulado, na qual a área atinge valores de fluxo típicos de um canal pluvial, recebendo, em algumas cartas de síntese, peso relevante. No entanto, ao comparar tal zona com os dados de campo, identificou-se que o setor em questão não se caracteriza, desde o início do monitoramento da voçoroca, como um canal pluvial, em função de uma pequena barragem feita pelo proprietário (Figura 37). Contudo, as curvas de nível presentes na base cartográfica ainda indicam grande concavidade no local, influenciando diretamente na carta de fluxo acumulado, o que gerou distorções nas cartas de síntese.

Tabela 8 – Distribuição das estacas de monitoramento e dos valores de evolução do talude erosivo em cada classe de potencial ao avanço erosivo linear. A densidade normalizada foi obtida a partir da divisão entre os milímetros de recuo do talude pelo número de estacas em cada classe.

CARTA A						
Classe	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Recuo do talude (mm)	0	0	0	1267	1834	434
Densidade Normalizada	0	0	0	74.52	107.88	108.5
Coeficiente 0-1	0	0	0	0.686	0.994	1
CARTA B						
Classe	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Recuo do talude (mm)	0	0	0	1555	1980	0
Densidade Normalizada	0	0	0	70.68	123.75	0
Coeficiente 0-1	0	0	0	0.571	1	0
CARTA C						
Classe	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Recuo do talude (mm)	0	0	0	0	3249	286
Densidade Normalizada	0	0	0	0	90.25	143
Coeficiente 0-1	0	0	0	0	0.631	1
CARTA D						
Classe	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Recuo do talude (mm)	0	0	219	595	2721	0
Densidade Normalizada	0	0	73	85	97.17	0
Coeficiente 0-1	0	0	0.751	0.874	1	0
CARTA E						
Classe	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Recuo do talude (mm)	0	0	1175	1003	1357	0
Densidade Normalizada	0	0	73.43	77.15	150.77	0
Coeficiente 0-1	0	0	0.487	0.511	1	0
CARTA F						
Classe	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Recuo do talude (mm)	0	0	1555	1980	0	0
Densidade Normalizada	0	0	70.68	123.75	0	0
Coeficiente 0-1	0	0	0.571	1	0	0
CARTA G						
Classe	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Recuo do talude (mm)	0	0	3249	286	0	0
Densidade Normalizada	0	0	90.25	143	0	0
Coeficiente 0-1	0	0	0.631	1	0	0
CARTA H						
Classe	Muito Fraco	Fraco	Médio	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Recuo do talude (mm)	0	0	432	3103	0	0
Densidade Normalizada	0	0	61.71	100.09	0	0
Coeficiente 0-1	0	0	0.616	1	0	0

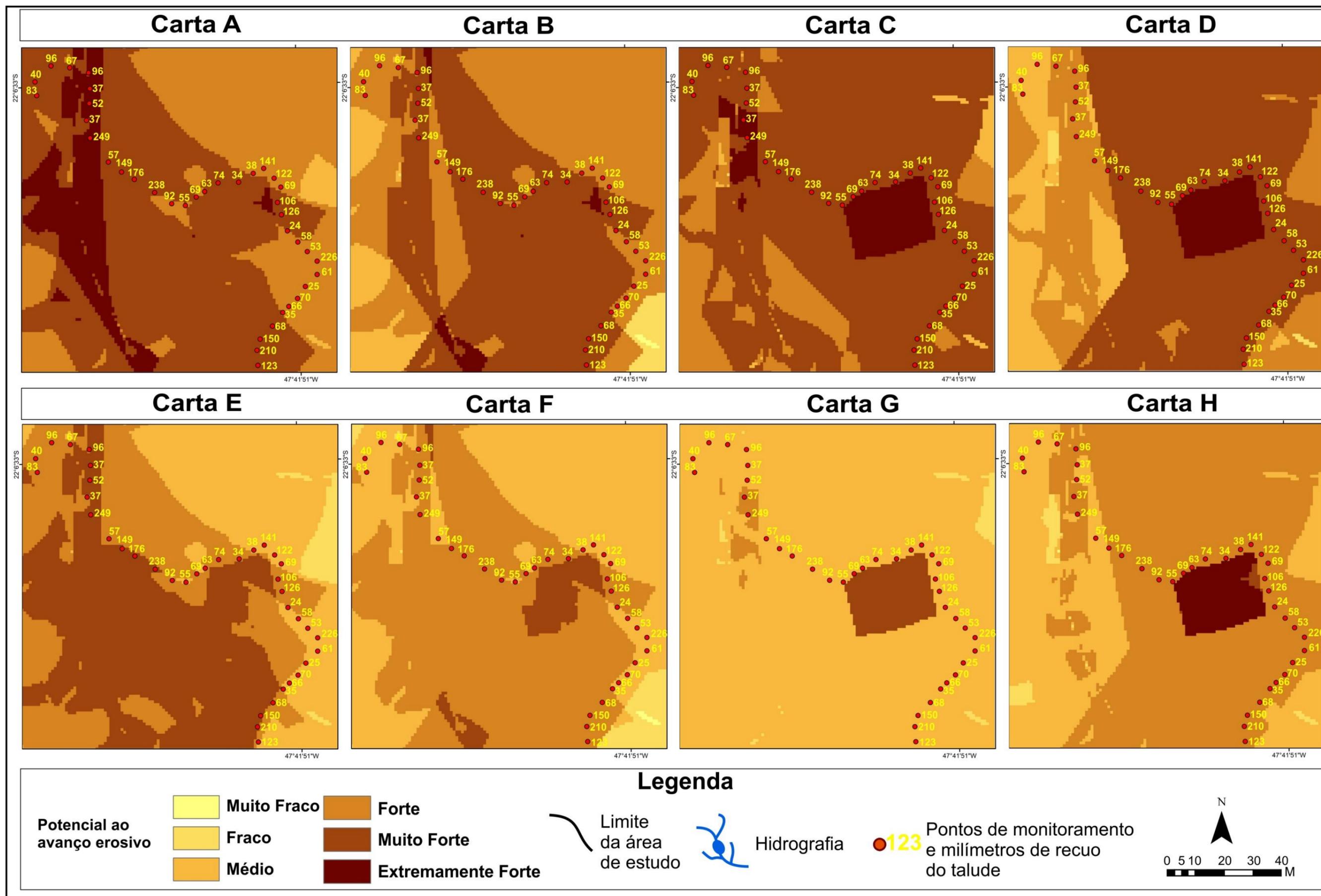


Figura 33 – Evolução do talude erosivo sobreposto às classes de potencial ao avanço erosivo linear.

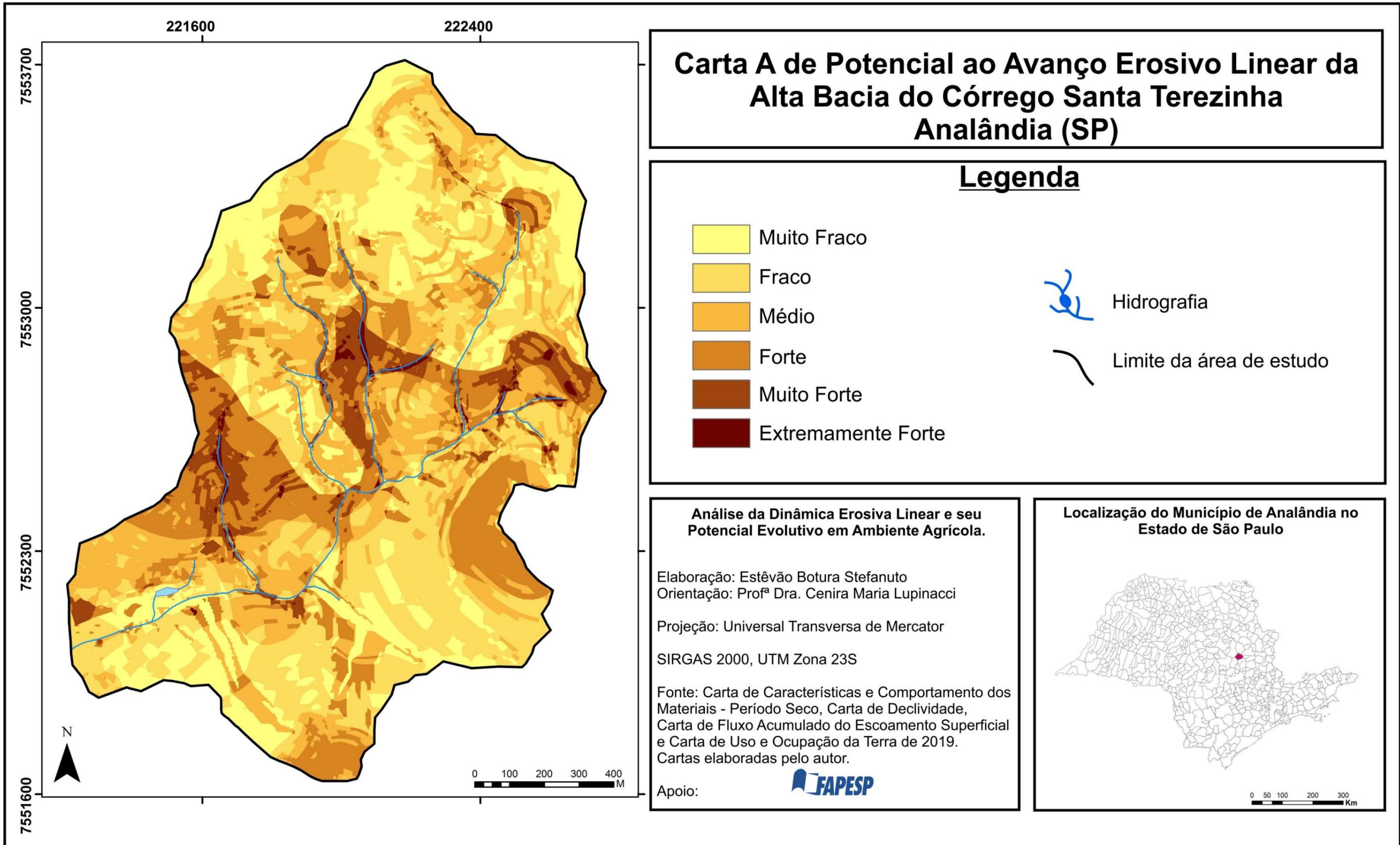


Figura 34 – Carta A de Potencial ao Avanço Erosivo Linear.

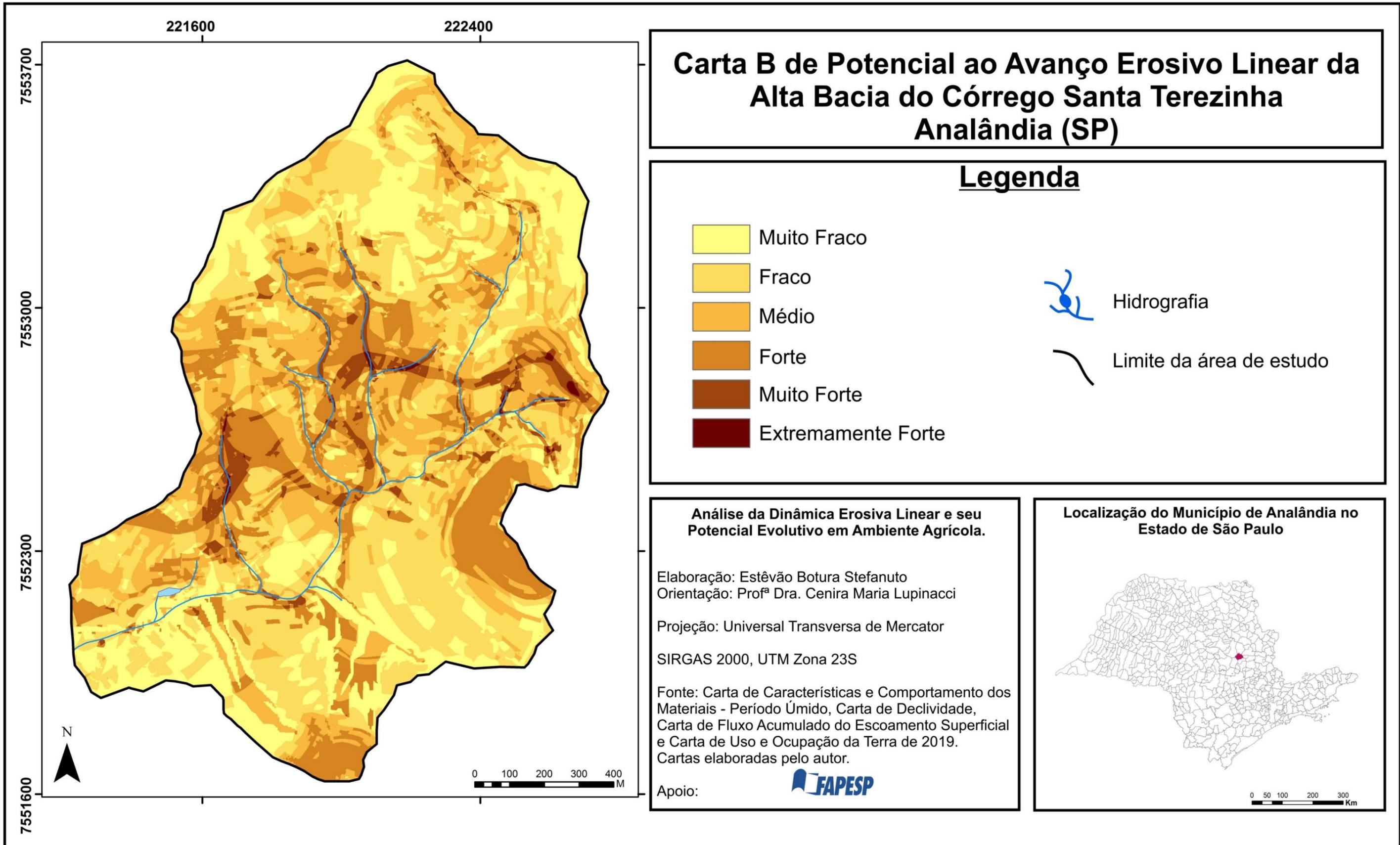


Figura 35 – Carta B de Potencial ao Avanço Erosivo Linear.

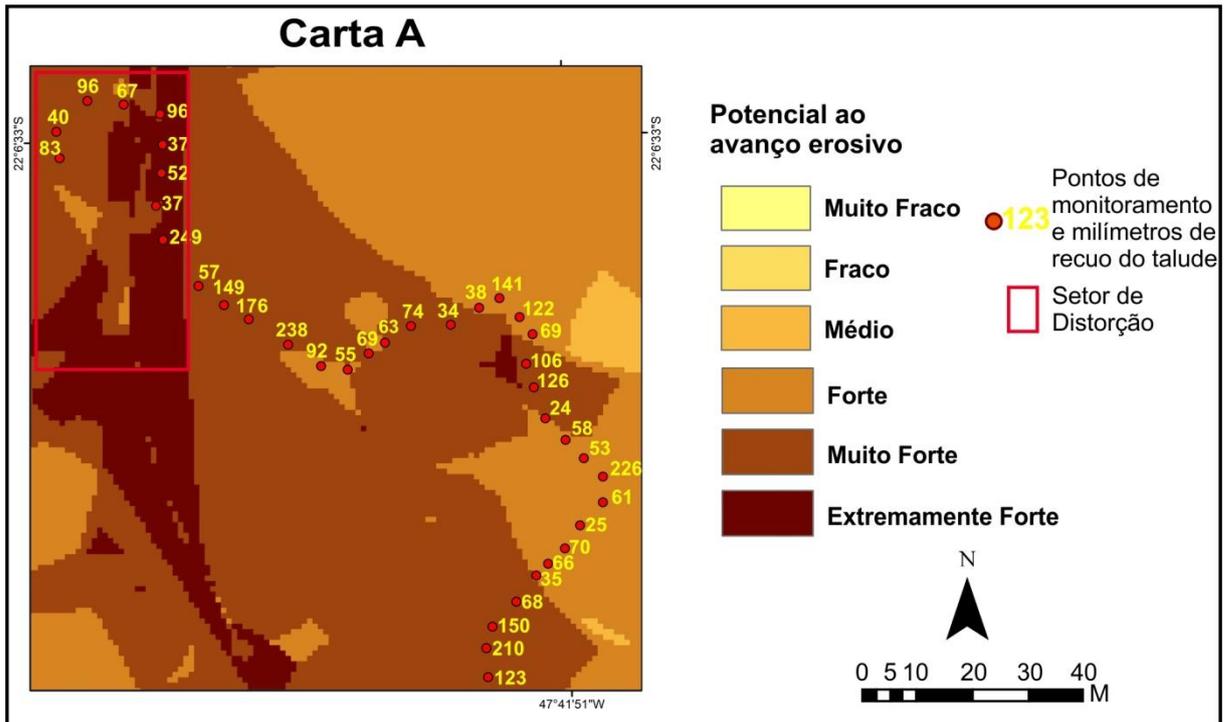


Figura 36 – Identificação do setor de distorção da voçoroca na Carta A de potencial ao avanço erosivo.

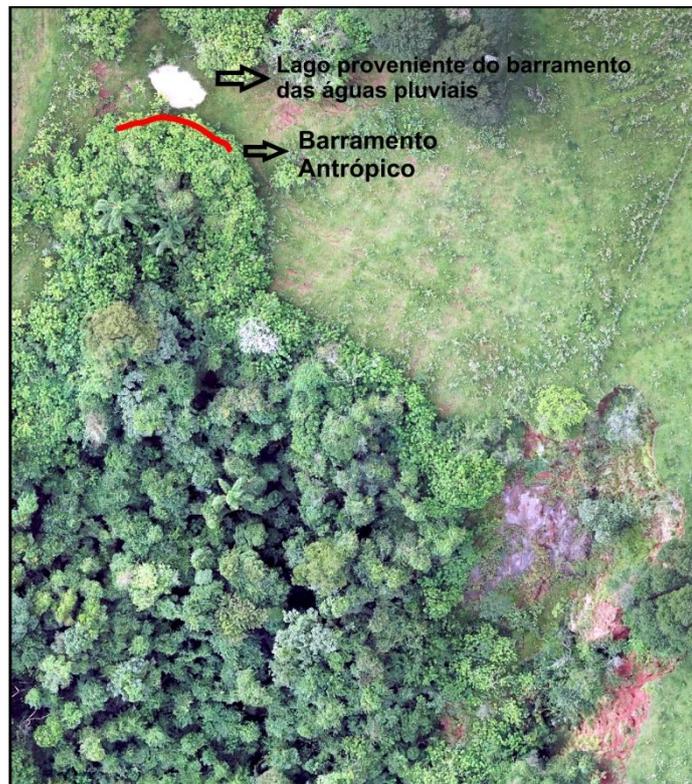


Figura 37 – Barragem construída pelo proprietário que, durante os períodos de chuva, contém o escoamento do canal pluvial, formando um lago.

Nesse contexto, é possível ratificar a consistência dos dados de evolução do talude erosivo a partir das informações de perda ou acúmulo de material de superfície no entorno do talude, monitorada por pinos (Figura 38). Através da comparação dos dados, foi possível

reconhecer uma boa correspondência entre setores de evolução significativa do talude erosivo e setores de remoção de materiais. Destaca-se que não houve uma sobreposição espacial perfeita entre as áreas dos dados espacializados, contudo há uma boa correspondência em relação às zonas de maior recuo e de perda de material em superfície. Outro fator atribuído à variação espacial é que os pinos de erosão estão sujeitos a condições locais, como caminhos, pisoteio do gado, irregularidades da vegetação, elementos que interferem nos dados finais.

Os dados de perda ou acúmulo de material apresentam ainda uma variação entre o setor do talude recoberto por vegetação arbórea/arbustiva e o recoberto por cobertura herbácea. Sob a vegetação arbórea/arbustiva identificaram-se os valores mais elevados de perda de materiais, fato associado ao setor receber um fluxo laminar proveniente de vertentes com declividade de 30 a 45% e possuir cobertura herbácea deficitária, em função do sombreamento gerado pelas espécies arbustivas e arbóreas. Já o talude recoberto por cobertura herbácea, recebe um fluxo laminar também proveniente de inclinações de 30% a 45% de declividade, no entanto a cobertura do solo por gramíneas apresenta-se contínua e consolidada, permitindo a contenção e acúmulo de materiais de superfície, fato que atesta a complexidade dos dados, uma vez que teoricamente a vegetação de maior porte deveria conter a ação das águas de superfície.

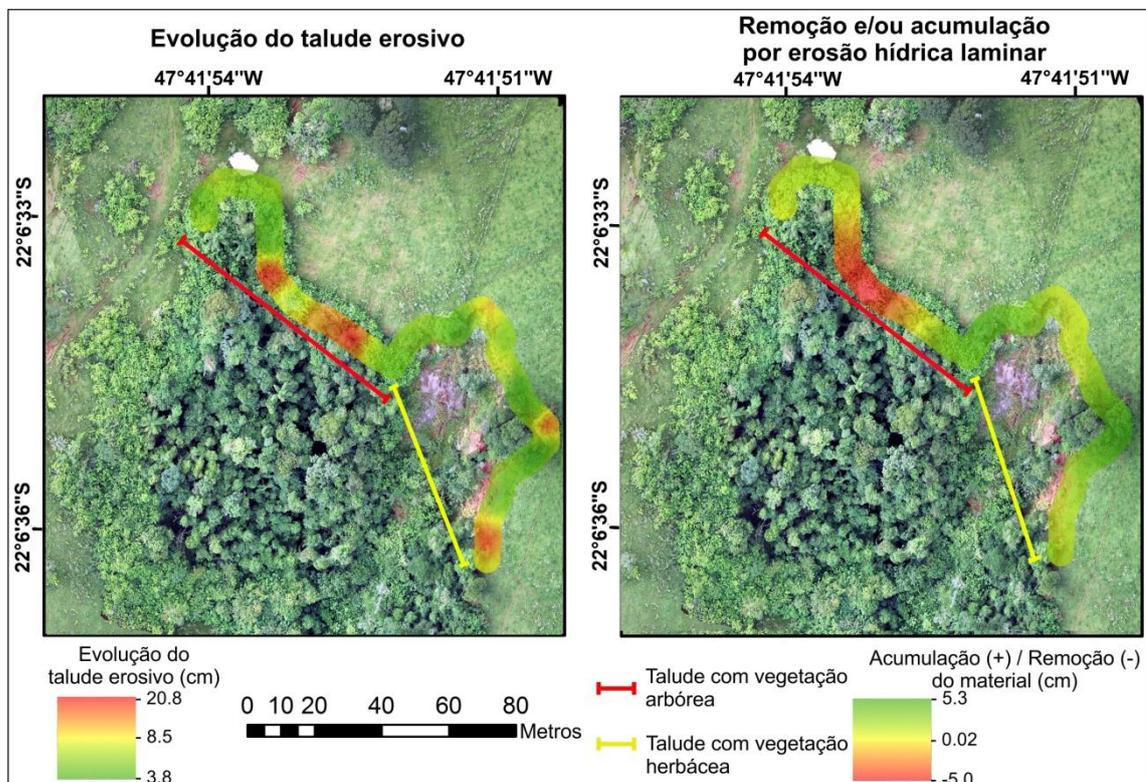


Figura 38 – Comparação entre os dados de evolução do talude e remoção/acumulação de material no setor circundante ao talude.

Também se considerou importante avaliar a dinâmica erosiva do talude da voçoroca e de remoção ou acúmulo de material em comparação aos dados pluviométricos da área de estudo (Tabelas 9 e 10).

Tabela 9 – Período de análise do talude erosivo em comparação à precipitação. Destaque para os períodos de maior evolução do talude e menor volume de precipitação.

Período de análise	Evolução do talude erosivo (cm)	Precipitação total no período (mm)
De 03/07/2017 a 03/10/2017	104,5	42,3
De 03/10/2017 a 03/01/2018	54,1	516
De 03/01/2018 a 04/04/2018	32,6	400,8
De 04/04/2018 a 27/06/2018	83,7	13,6
De 27/06/2018 a 09/10/2018	9,2	129,4
De 09/10/2018 a 04/01/2019	34,7	406,8
De 04/01/2019 a 09/04/2019	25,2	470,6

Tabela 10 - Período de análise da dinâmica de superfície dos materiais em comparação à precipitação. Destaque para os períodos de maior perda ou acúmulo de material e dinâmica de superfície.

Período de análise	Perda de Material (cm)	Acúmulo de Material (cm)	Total (cm)	Precipitação total no período (mm)
De 03/07/2017 a 03/10/2017	-2,1	2,2	0,1	42,3
De 03/10/2017 a 03/01/2018	-1	16	15	516
De 03/01/2018 a 04/04/2018	-9,6	10,6	1	400,8
De 04/04/2018 a 27/06/2018	-7,5	1,5	-6	13,6
De 27/06/2018 a 09/10/2018	-0,9	9	8,1	129,4
De 09/10/2018 a 04/01/2019	-3,8	5,2	1,4	406,8
De 04/01/2019 a 09/04/2019	-4,8	5	0,2	470,6

A partir de uma análise integrada dos dados (Tabela 9), identificou-se uma não congruência direta entre o período mais chuvoso e o de maior evolução do talude erosivo. Para o primeiro caso (de 03/07/2017 à 03/10/2017), destaca-se o trabalho de Mendes (1993), o qual afirma que a transição entre o período seco e úmido constitui-se em um período de evolução de feições erosivas, principalmente em solos com maior teor de argila, como os NITOSSOLOS, identificados na área de voçorocamento. Tais solos podem apresentar gretas de ressecamento, fator que contribui para a fragmentação do pacote de solo e maior friabilidade do material (MENDES, 1993). Assim, as primeiras chuvas do verão, após um

período de baixa precipitação, encontram um material suscetível à evolução erosiva, os quais, sob a atuação de eventos chuvosos intensos, podem gerar a regressão do talude de setores de voçorocamento (VALENTIM *et al.*, 2005). Ainda, os dados em destaque na primeira linha da Tabela 9, podem estar associados a eventos intensos ocorridos nos três primeiros dias do mês de outubro de 2017, nos quais se registraram 27,4 mm de precipitação, sendo que, no dia 02/10/2017, foi registrado um evento de maior intensidade, caracterizado por 13,8 mm de precipitação em um período de 6h10 min.

Já os dados referentes ao período de 04/04/2018 à 27/06/2018 (Tabela 9), podem estar associados ao uso da terra do setor voltado para pecuária. Durante o período seco, a espécie invasora (*Tecoma Stans*), que ocupa grande parte do talude com vegetação arbórea/arbustiva, apresenta comportamento caducifólio (Figura 39), fato que possibilitou a maior circulação do gado na área do talude e garantiu a evolução de alguns pontos ali localizados, como as estacas 38, 41 e 46, representadas por 23,8 cm, 10,1 cm e 17,1 cm de evolução durante o período.



Figura 39 – Espécie *Tecoma Stans* (Vegetação Invasora) durante os períodos seco e úmido na frente de evolução do talude da voçoroca oeste.

Por fim, os demais períodos de análise apresentaram volume de chuvas relevante, fato que atenuou a atuação erosiva em função da umidade antecedente retida nas gretas e fendas de ressecamento, minimizando a fragilidade erosiva representada por essas feições.

Ademais, com exceção do período de 27/06/2018 à 09/10/2018, a espécie exótica (*Tecoma Stans*) não apresentou comportamento caducifólio, elemento que limitou o pisoteio de animais próximo ao talude erosivo sob vegetação arbórea/arbustiva. Ambos os fatores refletiram em valores de evolução do talude erosivo amenos (Tabela 9).

Em relação à Tabela 10, destaca-se primeiramente o período de 03/10/2017 a 03/01/2018, no qual se constataram os maiores valores de acúmulo total de material (15 cm) e milímetros de chuva (516 mm). Neste período, identificou-se uma dinâmica de deposição relevante no setor, a qual pode ser associada a eventos de precipitação intensa, como registrado em outubro e dezembro (Figura 40), na ordem de 4,5 mm em 5 minutos, e, em novembro, 6,5 mm/5min.

No período seguinte (03/01/2018 a 04/04/2018), também se registrou um volume de chuva expressivo (400,8 mm) e uma dinâmica de materiais de superfície mais marcante que no cenário anterior, com perda (9,6 cm) e acúmulo (10,6 cm) relevantes (Tabela 10). Neste período, as chuvas fortes foram mais intensas e frequentes, atingindo 5,7 mm/5min em janeiro, 7,2 mm/5min em fevereiro e 6,5 mm/5min em março (Figura 40), eventos os quais ultrapassaram a capacidade de contenção da vegetação herbácea presente em parte do talude, fazendo com que os valores de perda aumentassem em relação ao trimestre anterior.

Já no terceiro período de destaque (04/04/2018 a 27/06/2018), identificou-se precipitação reduzida e perda de material relevante. Neste período, ao analisar a intensidade da chuva a cada 5 minutos, não se identificou relevância (Figura 40); no entanto, para um intervalo de 30 minutos, a maior intensidade registrada foi de 9 mm de precipitação durante o mês de maio de 2018, fato que pode ser associado à perda de material identificada.

Por fim, no último período destacado (27/06/2018 a 09/10/2018), não se identificaram chuvas com grande intensidade, mas registrou-se um aumento na frequência de eventos chuvosos. O aumento na frequência pode ser responsável pela maior dinamização dos materiais de superfície e o acúmulo total de material (8,1 cm), uma vez que setores próximos ao talude com vegetação arbórea/arbustiva não se apresentaram fechados para a passagem do gado (Figura 39), fato que, através do pisoteio dos animais, pode ter acarretado maior disponibilidade de material solto em superfície.

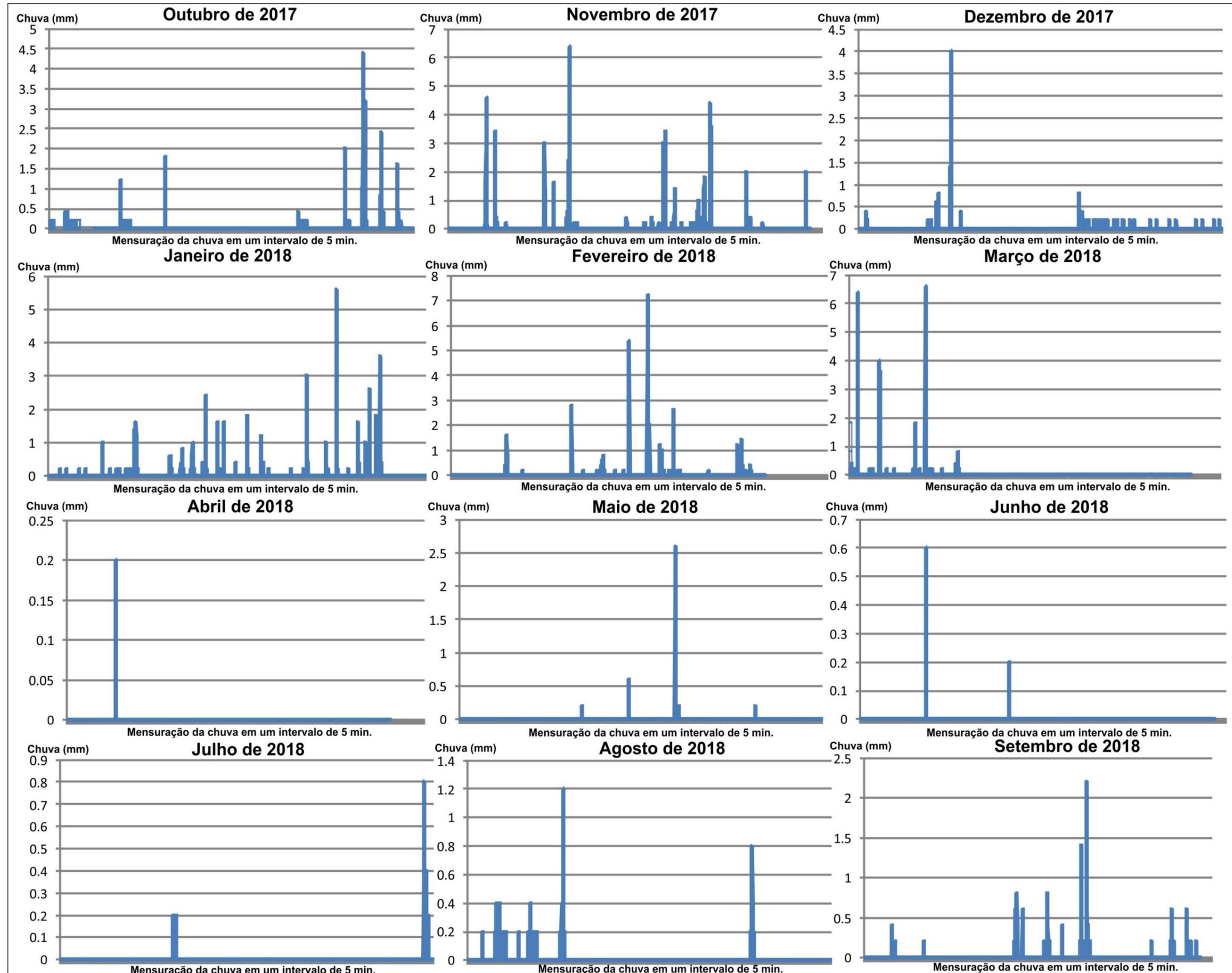


Figura 40 - Gráficos de chuva dos períodos destacados na Tabela 10.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das cartas de características e comportamento dos materiais, identificou-se uma área de contato entre os solos argilosos e arenosos como o setor de maior desenvolvimento de feições erosivas lineares, sendo essas ativas, como demonstrou o estudo em detalhe da voçoroca monitorada. A hipótese do setor de contato, representado pelas Classes de materiais 2, 3 e 4, ser uma área de potencial ao avanço erosivo ganhou força ao analisarmos que 95% da área ocupada por feições lineares estão no referido setor. Ainda, pode-se associar a área potencialmente erosiva como uma resposta ao relevo da bacia hidrográfica, uma vez que, no setor centro-norte, o *front* da *cuesta*, com inclinações de até 79°, é responsável por agregar energia ao escoamento superficial, acelerando a dinâmica erosiva no setor central da bacia, onde ocorre a transição entre os solos argilosos e arenosos.

No que corresponde à interação declividade e feições erosivas, identificou-se que os sulcos erosivos se apresentam bem distribuídos na bacia hidrográfica, cabendo destaque para as classes $\geq 2\%$ e de 12-30%, sendo a última também identificada como uma classe de concentração de ravinas. A ocorrência de sulcos na classe de $\geq 2\%$ pode ser estar associada ao uso agrícola com técnicas de manejo não adequadas, fato que pode desencadear feições erosivas. Já o registro de sulcos e ravinas na classe de 12-30% demonstra as dificuldades de manejo destas áreas para a pecuária, prática a qual possui estreita relação com o desenvolvimento de feições erosivas, fruto da combinação de tal uso da terra em áreas com declive significativo, gerando inclusive feições de maior magnitude, como as ravinas. Já as voçorocas concentraram-se nas classes de declividade mais elevadas da bacia (30-45% e $>45\%$), fato que atesta o alto grau de energia das águas e o aumento na capacidade erosiva. Vale destacar que as voçorocas são compostas por taludes erosivos íngremes, os quais representam quebras abruptas no terreno que dão origem a declives acentuados.

No que se refere à dinâmica do fluxo de superfície, constatou-se que os sulcos erosivos estão distribuídos em várias classes de fluxo acumulado visto que, conforme constatado *in loco*, associam-se à dinâmica de uso da terra. Tanto os sulcos como as ravinas ocorrem também em classes médias e baixas, visto que as vertentes ao norte são relativamente curtas quando comparadas àquelas posicionadas ao sul; assim, na bacia estudada, os valores mais altos de fluxo acumulado estão diretamente influenciados pelas vertentes ao sul, fato que gerou proporcionalmente classes baixas e médias no setor centro-norte, cujos valores absolutos são relativamente altos se comparados, por exemplo, aos dados de Mathias (2016) e

Moraes (2014). Já, ao analisar a interação com as voçorocas, tal relação ganha força, uma vez que há uma concentração explícita da referida feição sobre a segunda maior classe de fluxo acumulado, fato compreendido pela morfologia da feição constituir-se em uma área de significativa concentração de fluxo no terreno.

Em relação ao uso e ocupação da terra, identificou-se entre os anos de 2010 e 2019 uma congruência entre as áreas de ocorrência de feições erosivas e o uso da terra. As classes de uso da terra com maior ocorrência de feições (solos exposto, pasto degradado e vegetação de área úmida), conjuntamente com o aumento das classes pasto sujo e vegetação invasora de 2010 para 2019, atestaram o baixo grau de manutenção das pastagens voltadas para pecuária na área de estudo. Os terrenos mapeados como pasto degradado e solos exposto foram, em alguns casos, provenientes de setores de pastagens com baixo grau de manutenção, fato confirmado em algumas pastagens da bacia hidrográfica analisada, uma vez que se identificou em campo somente a roçadura com a principal técnica de manutenção empregada. Desta forma, compreende-se a atividade pecuária como nociva ao setor estudado devido à ausência de técnicas conservacionistas aplicadas com regularidade, fato que propiciou a expressiva ocorrência de feições erosivas, como nos setores de pastos degradados e solos expostos.

Assim, ao analisarmos a interação das referidas variáveis através das cartas de potencial ao avanço erosivo linear, constatou-se que as cartas C e D (influência de 25% para cada variável, utilizando a dupla aplicação do coeficiente de 0-1, em período seco e úmido, respectivamente) apresentam uma melhor resposta quando se pretende analisar e gerar prognósticos do potencial ao avanço erosivo de todos os tipos de formas vinculadas à erosão linear. Já as cartas A e B (influência de 25% para cada variável, utilizando a área das feições, em período seco e úmido, respectivamente) representaram uma melhor resposta à dinâmica evolutiva do talude erosivo, sendo instrumento importante quando já se tem voçorocas instaladas.

Portanto, entende-se que a dinâmica erosiva atuante no setor evolui e avança a partir da interação de elementos físicos e das ações humanas, fato comprovado pela validação das cartas de síntese com melhor resposta às hipóteses do estudo, nas quais se empregaram influência igual (25%) às variáveis físicas e ao uso da terra. Tal afirmação aponta para uma análise dos ambientes rurais a partir dos princípios da antropogeomorfologia e da complexidade dos ambientes, as quais entendem a necessidade de interação das variáveis naturais e humanas para a pesquisa dos diferentes sistemas terrestres.

Ainda, sobre a interação dos dados de evolução do talude erosivo com os pinos de erosão, verificou-se que há certa correspondência espacial entre setores de maior remoção de material com os de maior evolução do talude; contudo, os dados de evolução do talude apresentam variações intensas não registradas nos pinos. Convém também chamar a atenção para a complexidade da relação entre a chuva e o avanço do talude erosivo em voçorocas. Constatou-se que os períodos de maior avanço ocorrem predominantemente na transição entre os períodos seco e chuvoso, comprovando fato já apontado por outros autores. Em relação aos pinos de erosão, identificou-se ainda uma associação positiva entre o aumento da dinâmica de superfície com a intensidade dos eventos chuvosos.

Em relação ao uso do arcabouço técnico apresentado por Mathias (2016), foram utilizadas variáveis avaliadas por esse autor como relevantes para o estudo de feições erosivas lineares, contudo o processamento dos dados foi diferenciado em virtude da experiência obtida junto ao *Grup de Recerca Ambiental Mediterrània* (GRAM) da *Universitat de Barcelona*. Considera-se, portanto, que houve um avanço na questão do processamento e validação dos dados nessa pesquisa.

Com isso, conclui-se que os dados levantados nesta pesquisa responderam ao objetivo proposto e apontam para o potencial ao avanço erosivo linear da bacia hidrográfica analisada.

Por fim, considera-se que os procedimentos desenvolvidos nessa pesquisa necessitam ser testados em outras áreas, de relevos *cuestiformes*, a fim de comprovar a efetividade desses no levantamento das tendências erosivas, sem necessariamente recorrer ao histórico de desenvolvimento das feições erosivas, como realizado neste trabalho, uma vez que se compreende que nem todas as áreas possuem produtos de sensoriamento remoto que viabilizem esse tipo de levantamento. Além disso, o desenvolvimento da pesquisa permite inferir que, para estudos futuros, variáveis químicas dos solos e dados geológicos estruturais podem também ser empregados neste tipo de análise, visando gerar uma cartografia de síntese que permita a identificação rápida e precisa de setores de potencial ao desencadeamento de processos erosivos lineares.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ABNT. **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. **NBR 14545**: Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- AB’SÁBER, A. N. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário. **Geomorfologia**. São Paulo, 1969.
- AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. A ocorrência de voçorocas em Gouveia, MG: Características e Processos Associados. **Geonomos**. n.14, p.75-86, 2006.
- ALHO, D. R. et al. Caracterização física, química e mineralógica de Neossolos Litólicos de diferentes materiais de origem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.2 n.2 p.117-122, 2007.
- ALMEIDA, F. F. M. de. **Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista**. São Paulo: IGEOG, 1974.
- ALMEIDA, F. F. M. de. Relevo de “Cuestas” na Bacia Sedimentar do Rio Paraná. **Boletim Paulista de Geografia**. n. 3, p. 21-33, 1949.
- ALMEIDA, R. J. de. **Análise da relação vegetação-solo em três cotas altimétricas na floresta estacional semidecidual ocorrente em cuesta basáltica (“Parque Rawitscher” Fazenda Pedra Vermelha, município de Analândia – SP)**. Rio Claro, 2001.
- AYRES, Q. C. **La Erosión del Suelo y su Control**. Barcelona: Ediciones Omega S. A., 1960.
- AZEVEDO, A. A. B. de.; PRESSINOTTI, M. M. N.; MASSOLI, M. Estudos Sedimentológicos das Formações Botucatu e Pirambóia na Região de Santa Rita do Passa Quatro, SP. **Revista do Instituto Geológico**. v.2, n.1, p.31-39, 1981.
- BABAEI, F.; ZOLFAGHARI, A. A.; YAZDANI, M. R.; SADEGHIPOUR, A. Spatial analysis of infiltration in agricultural lands in arid areas of Iran. **Catena**, n. 170, p. 25–35, 2018.
- BAYAT, H.; SHEKLABADI, M.; MORADHASELI, M.; EBRAHIMI, E. Effects of slope aspect, grazing, and sampling position on the soil penetration resistance curve. **Geoderma**, n. 303, p. 150–164, 2017.
- BASE – BASE Aerofotogrametria e Projetos S/A. **Levantamento aéreo do Estado de São Paulo de 1988**. São Paulo, 1988. No color. Escala 1:40000.
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda do solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 24, n. 3, p.657-668, 2000.

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 8. ed. São Paulo: Ícone, 2012.
- BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. Tradução Olga Cruz – **Caderno de Ciências da Terra**. Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo, nº13, 1972.
- BHATTACHARYYA, R.; FULLEN, M. A.; BOOTH, C. A. Using palm-mat geotextiles on a arable soil for water erosion control in the UK. **Earth Surface Processes and Landforms**. n. 36, p. 933-945, 2011.
- BONTA, J. V. **Precipitation, Watershed Analysis**. In: **Hillel, D. (Org.)**. Encyclopedia of Soils in the Environment. Academic Press, p. 314-322, 2005.
- BÓRIO, N. J. **Geologia da Área de São Pedro**. 1973. 125 f. Tese – Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Rio Claro, Rio Claro, 1973.
- BRASIL. **Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm>. Acesso em: 11 de julho de 2018.
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm#art83>. Acesso em: 10 de abril de 2018.
- BRINO, W. C. **Contribuição à definição climática da Bacia do Corumbataí e adjacências (SP), dando ênfase à caracterização dos tipos de tempo**. 1973. 119 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, Rio Claro, 1973.
- BRYK, M. Resolving compactness index of pores and solid phase elements in sandy and silt loamy soils. **Geoderma**, v. 318, p. 109–122, 2018.
- CAMPOS, S.; CAMPOS, M. de.; GOBB, T. T. A. Espacialização do Conflito de Uso da Terra em Áreas de Preservação Permanentes da Bacia do Rio Capivara - Botucatu/SP. In: CAMPOS, S.; PISSARRA, T. C. T.; CAMPOS, M (Org.). **Geotecnologia Aplicada no Planejamento Ambiental de Bacias Hidrográficas**. Tupã: ANAP, 2015. p. 91-114.
- CARVALHO, F.; SCHULTE, L. Morphological control on sedimentation rates and patterns of delta floodplains in the Swiss Alps. **Geomorphology**. v.198, p.163-176, 2013.
- CARVALHO, R. F. F de. **Análisis multi-proxy paleoambiental y modelización de registros sedimentarios fluviales en los Alpes Suizos**. 2014. 259 f. Tese (Doutorado em Geografía, Planificación Territorial y Gestión ambiental) - Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona, Barcelona, 2014.
- CASANELLAS, J. P.; REGUERÍN, M. L. A.; LABURU, C. R. de. **Edafología: para la agricultura y el medio ambiente**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2003.
- CASSETI, V. **Elementos de Geomorfologia**. Goiânia: Editora UFG, 2001.

CERON, A. O.; DINIZ, J. A. F. O uso das fotografias aéreas na identificação das formas de utilização agrícola da terra. **Revista Brasileira de Geografia**. n. 2, v. 28, p. 161-173, 1966.

CHAUÍ, M. **Convite à Filosofia**. São Paulo: Ática, 1994.

CHOLLEY, A. Observações sobre alguns pontos de vista geográficos. **Boletim Geográfico**. Rio de Janeiro, v. 22, n. 179, 1964.

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

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia – Introdução**. São Paulo: HUCITEC, 1979.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CHRISTOFOLETTI, A.; QUEIROZ NETO J. P. Estudos Geomorfológicos a respeito da Serra de Santana, SP. **Boletim Paulista de Geografia**. n. 38, p. 3-20, jun/1961

CORRÊA, E. A. **Perdas de solo e índice de vegetação: Proposta metodológica para determinação do fator C (Meups) em pastagens e cana-de-açúcar**. 2016. 187f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro, 2016.

DE BIASI, M. Cartas de declividade: confecção e utilização. **Geomorfologia**. São Paulo, n. 21, p. 8-13, 1970.

DE BIASI, M. A carta clinográfica: Os métodos de representação e sua confecção. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**. São Paulo, n. 6, p. 45-60, 1992.

DEUSCHLE, D.; MINELLA, J. P. G.; HORBE, T. A. N.; LONDERO, A. L.; SCHNEIDER, F. J. A. Erosion and hydrological response in no-tillage subjected to crop rotation intensification in southern Brazil. **Geoderma**, v. 340, p. 157–163, 2019.

DIAS-FILHO, M. B. Diagnóstico das Pastagens no Brasil. **Embrapa Documentos**. n.402, 2014.

DREW, D. **Processos Interativos Homem-Meio Ambiente**. Tradução de: João Alves dos Santos. São Paulo: DIFEL, 1986.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO - EMPLASA . **Projeto Mapeia São Paulo**. São Paulo, 2010. Color. Escala 1:25000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Brasília, 2006.

ESRI. **Weighted Overlay**. 2016 Disponível em:
<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/weighted-overlay.htm>.
Acesso em: 03 de julho de 2019.

FACINCANI, E. M. **Morfotectônica da depressão periférica paulista e cuesta basáltica: regiões de São Carlos, Rio Claro e Piracicaba, SP**. 2000. 222 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M.; GARCIAS, C. M. **Drenagem e Controle da Erosão Urbana**. Curitiba: Champagnat, 1997.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Status of the World's Soil Resources**. Roma, 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Food Balance Sheets for 2013**. 2013. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>> Acesso em: 18 de abril de 2018.

FRANCOS, M.; ÚBEDA, X.; PEREIRA, P.; ALCÁÑIZ, M. Long-term impact of wildfire on soils exposed to different fire severities. A case study in Cadiretes Massif (NE Iberian Peninsula). **Science of the Total Environment**. n. 615, p. 664–671, 2018a.

FRANCOS, M.; PAULO, P.; MATAIX-SOLERA, J.; ARCENEGUI, V.; ALCÁÑIZ, M.; ÚBEDA, X. How clear-cutting affects fire severity and soil properties in aMediterranean ecosystem. **Journal of Environmental Management**. n. 206, p. 625-632, 2018b.

FRASER, G. W.; STONE, G. S. The effect of soil and pasture attributes on rangeland infiltration rates in northern Australia. **The Rangeland Journal**. n.38, v.3, p. 245-259, 2016

FURLANI, G. M. **Estudo geomorfológico das boçorocas de Casa Branca – São Paulo**. 1980. 379f. Dissertação. Departamento de Geografia (FFLCH), São Paulo, 1980.

GALE, S. J.; HAWORTH, R. J. Catchment-wide soil loss from pre-agricultural times to the present: transport- and supply-limitation of erosion. **Geomorphology**. n. 68, p. 314-333, 2005.

GHOSH, R.; SRIVASTAVA, P.; SHUKLA, U. K.; SINGH, I.; CHAMPATI RAY, P. K.; SEHGAL, R. K. Tectonic forcing of evolution and Holocene erosion rate of ravines in the Marginal Ganga Plain, India. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 162, p. 137–147, 2018.

GOMES, C. F. **Argilas: O que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986.

GOOGLE. [Analândia-SP]. 2019. Imagens Orbitais Extraídas do Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Anal%C3%A2ndia,+SP,+13550-000/@-22.1091752,-47.6976248,2140m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x94c7f1a10f3ad337:0xea4d0436c3844ae2!8m2!3d-22.1292695!4d-47.6626925>>. Acesso em: 05 de set. de 2019.

GOUDIE, A. S. **The human impact on the natural environment**. Cambridge: MIT Press, 1986.

GOUDIE, A. S. **Encyclopedia of Geomorphology (Volume 1)**. London and New York: Routledge, 2004.

GUERRA, A. T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. 7 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1987.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. 8 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. **Geomorfologia Ambiental**. 2 ed. Rio de Janeiro: Bertrnad Brasil, 2009.

GUERRA, A. J. T. O Início do Processo Erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 17-50.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. In: CUNHA, S. B. da.; GUERRA, A. J. T. (Org.). **Geomorfologia: Exercícios, Técnicas e Aplicações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002. p. 139-155.

GUERRA, A. J. T. **Erosão dos Solos e Movimentos de Massa: Abordagens Geográficas**. Curitiba: CRV, 2016.

HOBSBAWM, E. J. **A Era das Revoluções: Europa 1789-1848**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1981.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. de.; TORMENA, C. A. Aplicação da Curva de Resistência no Controle da Qualidade Física em um Solo Sob Pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.35, n.7, p.1493-1500, 2000.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS - IAC. **Solos do Estado de São Paulo**. 2014. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solosp/> Acesso em: 19 de fevereiro de 2018.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA - IEA. **Estatísticas da Produção Paulista**. 2017. Disponível em: < http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1 > Acesso em: 02 de abril de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra**. Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA): Produção Agrícola Municipal (PAM)**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 02 de abril de 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo: Nota Explicativa**. São Paulo: IPT, 1981a. Escala 1:500.000.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT.
Mapa geológico do estado de São Paulo: Nota Explicativa. São Paulo: IPT, 1981b. Escala 1:500.000.

INSTITUTO GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – IG. **Folha Geológica de Corumbataí (SF-23-Y-A-I-2):** Formações Geológicas de Superfície. São Paulo: Instituto Geológico, 1984. Escala 1:50.000.

KIRKBY, M. J.; MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion.** Jhon Wiley & Sons, 1980.

KOFFLER, N. F. et. al. **Solos da bacia do Rio Corumbataí. Rio Claro: Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica** - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 1992. Escala: 1:50.000

LAL, R. **Soil Erosion Research Methods.** Wageningen: Soil and Water Conservation Society, 1988.

LAL, R. **Soil Erosion in the Tropics: Principles and Management.** New York: McGraw-Hill, Inc., 1990.

LANDIM, P. M. B.; SOARES, P. C.; GAMA JR, E. G. **Estratigrafia do Nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná.** Rio Claro: IGCE, 1980.

LEAL, P. C. B.; RODRIGUES, S. C. Uso e comparação do método de estaqueamento, o método DGPS e geoprocessamento no monitoramento de uma área erosiva na Fazenda do Glória – Uberlândia, MG. **GEOUSP – Espaço e Tempo.** n. 29, p. 18-35, 2011.

LI, T.; LI, S.; LIANG, C.; HE, B.; BUSH, R. T. Erosion vulnerability of sandy clay loam soil in Southwest China: Modeling soil detachment capacity by flume simulation. **CATENA**, v. 178, p. 90–99, 2019.

LI, Y.; REN, X.; HILL, R.; MALONE, R.; ZHAO, Y. Characteristics of Water Infiltration in Layered Water-Repellent Soils. **Pedosphere.** v.28, p. 775–792, 2018.

LIMBERGER, L. Abordagem Sistêmica e Complexidade na Geografia. **Geografia.** v.15, n.2, p. 95-109, 2006.

LUFFMAN, I. E; NANDI, A.; SPIEGEL, T. Gully morphology, hillslope erosion, and precipitation characteristics in the Appalachian Valley and Ridge province, southeastern USA. **Catena.** n. 133, p. 221-232, 2015.

MAEDA E. E.; PELLIKKA P. K. E.; SILJANDER, M.; CLARK, J. F. Potential impacts of agricultural expansion and climate change on soil erosion in the Eastern Arc Mountains of Kenya. **Geomorphology.** n. 123, p. 279-289, 2010.

MAFRA, N. M. C. Erosão e Planificação de Uso do Solo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 301-320.

MAHMOODABADI, M.; SAJJADI, S. A. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion. **Geomorphology**, v. 253, p. 159–167, 2016.

MASSOLI, M. Geologia do Município de Santa Rita do Passa Quatro. **Revista do Instituto Geológico**. n. 2, p. 35-45, 1981.

MASSOLI, M. **Caracterização Litofaciológica das formações Pirambóia e Botucatu, em subsuperfície, no município de Ribeirão Preto (SP), e sua Aplicação na Prospecção de Águas Subterrâneas**. 2007. 175f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro, 2007.

MATHIAS, D. T. **Propostas de Recuperação de Áreas Peri-urbanas Erodidas com base em Parâmetros Hidrológicos e Geomorfológicos: Córrego Tucunzinho (São Pedro/ SP)**. 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro, 2011.

MATHIAS, D. T. **Contribuição Metodológica para o Diagnóstico da Dinâmica Erosiva Linear e seu Prognóstico Evolutivo visando subsidiar Projetos de Recuperação**. 2016. 178 f. Tese (Doutorado em Geografia). Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Presidente Prudente, 2016.

MENDES, I. A. **A dinâmica erosiva do escoamento pluvial na bacia do córrego Lafon – Araçatuba – SP**. 1993. 171f. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G. de; SOUZA, P. A. de; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**. v.15, n.2, p. 265-287, 2007.

MORAES, I. C.; CONCEIÇÃO, F. T. da; LUPINACCI, C. M.; MORUZZI, R. B. Comparação de Metodologias na Definição de Fluxos Acumulados a Partir de Modelos Digitais de Elevação do Terreno Aplicado a Suscetibilidade de Inundações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.19, n.2, 223-235, 2014.

MOREIDA CÂNDIDO, B.; NAVES SILVA, M. L.; CURI, N.; VELLOSO, P. G. B. Erosão Hídrica Pós-Plantio em Florestas de Eucalipto na Bacia do Rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 38, n. 5, p. 1565-1575, 2014.

MURRAY, A. B.; LAZARUS, E.; ASHTON, A.; BAAS, A.; COCO, G.; COULTHARD, T.; FONSTAD, M.; HAFF, P.; MACNAMARA, D.; PAOLA, C.; PELLETIER, J.; REINHARDT, L. Geomorphology, complexity, and the emerging science of the Earth's Surface. **Geomorphology**. v.103, p.496-505, 2009.

NADAL-ROMERO, E; GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C.; CORTESI, N.; DESIR, G.; GÓMEZ, J. A.; LASANTA, T.; LUCÍA, A.; MARÍN, C.; MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; PACHECO, E. RODRÍGUEZ-BLANCO, M. L.; ROMERO DÍAZ, A.; RUIZ-SINOGA, J. D.; TAGUAS, E. V. TABOADA-CASTRO, M. M.; TABOADA-CASTRO, M. B. ÚBEDA, X.; ZABALETA, A. Relationship of runoff, erosion and sediment yield to weather types in the Iberian Peninsula. **Geomorphology**. n. 228, p. 372–381, 2015.

NIR, D. **Man, a geomorphological agent: an introduction to anthropic geomorphology.** Jerusalem: Katem Pub, House, 1983.

NORTCLIFF, S; ROSS, S. M.; THORNES, J. Soil Moisture, Runoff and Sediment Yield from Differentially Cleared Tropical Rainforest Plots. In: THORNES, J. B. **Vegetation and Erosion: Processes and Environments.** Chichester: Jhon Wiley & Sons, 1990.

OLIVEIRA, J. B. de; PRADO, H. do. Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de São Carlos – II Memorial Descritivo. **Boletim Técnico Nº 98.** Campinas: Instituto Agrônômico, 1984.

OSBORNE, J. W. Improving your data transformations: Applying the Box-Cox transformation. **Practical Assessment, Research & Evaluation.** v. 15, p. 1-9, 2010.

OUTEIRO, L.; ASPERÓ, F.; ÚBEDA, X. Geostatistical methods to study spatial variability of soil cations after a prescribed fire and rainfall. **Catena.** n.74, p.310-320, 2008.

PEDROSA-MACEDO, J. H.; BREDOW, E. A. **Princípios e rudimentos do controle biológico de plantas: coletânea.** Curitiba: [s.n.], 2004.

PEREIRA, P.; CERDÀ, A.; ÚBEDA, X.; MATAIX-SOLERA, J.; MARTIN, D.; JORDÁN, A., BURGNET, M. Spatial models for monitoring the spatio-temporal evolution of ashes after fire a case study of a burnt grassland in Lithuania. **Solid Earth.** n. 4, p. 152-165, 2013.

PINTON, L. de G. **A Antropogeomorfologia na bacia do Córrego do Cavalheiro – Analândia/SP: Uma avaliação da dinâmica de uso da terra e sua adequabilidade a legislação ambiental e a capacidade de uso.** 2011. 102 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto de Geociência e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

PINTON, L. de G. **Evolução dos processos morfogênicos em relevo cuestasiforme: a bacia do Córrego do Cavalheiro – Analândia (SP).** 2016. 129 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociência e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.

PINTON, L. de G.; CUNHA, C. M. L. O Uso de Geoindicadores em Paisagem Rural: Subsídios à Análise das Mudanças Morfológicas Antropogênicas da Bacia do Córrego Do Cavalheiro - Analândia (SP). **Revista do Departamento de Geografia – USP.** v.29, p. 1-19, 2015.

POPIT, T.; ROZIC, B.; SMUC, A.; KOKALJ, Z.; VERBOVSEK, T; KOSIR, A. A lidar, GIS and basic spatial statistic application for the study of ravine and palaeo-ravine evolution in the upper Vipava valley, SW Slovenia. **Geomorphology,** v. 204, p. 638–645, 2014.

RICCOMINI, C. Considerações sobre a posição estratigráfica e tectonismo deformador da Formação Itaqueri na porção centro-leste do estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico de São Paulo.** v.18, p. 41-48, 1997.

- RODRIGUES, C. Morfologia Original e Morfologia Antropogênica na definição de unidades espaciais de planejamento urbano: Exemplo na Metrópole Paulista. **Revista do Departamento de Geografia**. n. 17, p. 101-111, 2005.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**: Nota Explicativa: IPT, 1997. Escala 1:500.000.
- ROSSI, M. J.; ARES, J.O.; JOBBÁGY, E. G.; VIVONI, E. R.; VERVOORT, R. W.; SCHREINER-MCGRAW, A. P.; SACO, P. M. Vegetation and terrain drivers of infiltration depth along a semiarid hillslope. **Science of the Total Environment**. v.644, p.1399–1408, 2018.
- SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 229 e 265.
- SCHNEIDER, R. L. et. al. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA. 28. 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1974, p. 41-65.
- SHEN, H.; ZHENG, F.; WEN, L.; HAN, Y.; HU, W. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 429–436, 2016.
- SHIN, S. S.; PARK, S. D.; PIERSON, F. B.; WILLIAMS, C. J. Evaluation of physical erosivity factor for interrill erosion on steep vegetated hillslopes. **Journal of Hydrology**, v. 571, p. 559–572, 2019.
- SILVA, A. S. da. Análise Morfológica dos Solos e Erosão. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da. BOTELHO, R. G. M. **Erosão e Conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 101-124.
- SILVA, R. F. da et al. Aplicação metodológica para seleção de áreas para disposição de resíduos sólidos industriais cerâmicos. Estudo de caso: Porto Ferreira – SP. **Geociências**. v. 24, n.3, p. 305-317, 2005.
- SILVEIRA, A.; LUPINACCI, C. M. Carta de Materiais Inconsolidados: uma proposta visando à identificação da fragilidade do meio físico em área de expansão urbana. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.11, n.04, p.1371-1383, 2018.
- SOIL SCIENCI SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of Soil Scienci Terms**. Madison: Soil Scienci Society of America, 2008.
- SOUZA, T. de A. de.; OLIVEIRA, R. C. de. Avaliação da potencialidade de imagens tridimensionais em meio digital para o mapeamento geomorfológico. **Revista Geonorte**. v. 2, N.4, p.1348-1355, 2012.
- SPIEGEL, M. R. **Estadística**. 2 ed. Tradução de Rafael Hernandez Heredero. Madrid: McGraw-Hill, 1991.

STEFANUTO, E. B.; LUPINACCI, C. M. Análise da dinâmica erosiva presente no setor cuestasiforme de Analândia (SP). In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPEGE. 12. 2017, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2017a. p. 11625-11636.

STEFANUTO, E. B.; LUPINACCI, C. M. Atuação dos sistemas de forçamento nos sistemas terrestres a partir da ação antrópica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA e CONGRESSO NACIONAL DE GEOGRAFIA. 17 e 1. 2017, Campinas **Anais...** Campinas, 2017b. p. 6151-6161.

STEFANUTO, E. B.; LUPINACCI, C. M. Aspectos Morfoestruturais do Relevo em Setor de Cuestas: Um Estudo em Analândia (SP). **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 9, n. 4, 2016

STOLF, R. Operação do Penetrômetro de Impacto Modelo IAA/Planalsucar – Stolf. **Série Penetrômetro de Impacto – Boletim N°2**. 1984.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v.15, p. 229-235, 1991.

STOLF, R. **Penetrômetro de Impacto Stolf – programa de manipulação de dados em Excel- VBA**. UFSCar, 2011. Disponível em: <
<http://www.cca.ufscar.br/drnpa/hprubismar.htm>>. Acesso em: 08 de outubro de 2017.

TERRAFOTO - TERRAFOTO S/A Aerolevantamentos. **Levantamento aéreo do Estado de São Paulo de 1962**. São Paulo, 1962. No color. Escala 1:25000.

TORRES, J. L. R.; RODRIGUES JUNIOR, D. J.; SENE, G. A.; JAIME, D. G.; VIERIA, D. M. da S.; Resistência à penetração em área de pastagem de *Capim Tifitom*, influenciada pelo pisoteio e irrigação. **Bioscience Journal**. v.28, p.232-239, 2012.

TREWARTHA, G. T. **Geografia da população: padrão mundial**. Tradução de Veneranda Barreto Hellmeister. São Paulo: Atlas, 1974.

TRICART, J. **Principes et méthodes de la géomorphologie**. Paris: Masson, 1965.

TROPPEMAIR, H. **Geossistemas e geossistemas paulistas**. Rio Claro: Helmut Troppmair, 2000.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; YONG LI. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**. n. 63, p.132-153, 2005.

VASQUES, I. C. F.; SOUZA, A. A.; MORAIS, E. G.; BENEVENUTE, P. A. N. SILVA, L. C. M.; HOMEM, B. G. C.; CASAGRANDE, D. R.; SILVA, B. M. Improved management increases carrying capacity of Brazilian pastures. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 282, p. 30–39, 2019.

VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; MARIA, I. C. de.; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**. v.166, 92-101, 2011.

VERSTAPPEN, H. T.; ZUIDAN, R. A. van. **ITC System of geomorphological survey.** Manual ITC Textbook, Netherlands: Enschede. V. 1, cap. 8, 1975.

ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP).** 1994. 98 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1994.

ZANATTA, F. A. S.; LUPINACCI, C. M.; BOIN, M. N.; MORUZZI, R. B. Antropogeomorfologia e Problemática Erosiva em Área Rural Degradada, Marabá Paulista (SP). **Revista do Departamento de Geografia (USP).** Volume Especial Eixo 10 – XVII SBGFA / I CNGF, p. 199-207, 2017.

ZANATTA, F. A. S. **Limitação Física em área rural degradada: busca metodológica para definir o uso adequado das terras.** 2018. 164 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2018.

ZUQUETTE, L. V.; CARVALHO, J. A. R.; YAMANOUTH, G. R. de B. Feições erosivas na bacia do córrego do Espriado, São Pedro (SP), seus tipos e evolução entre 1972-2002. **Revista Brasileira de Geociências.** v.37, n.2, p.414-425, 2007.

ANEXO A

Evolução do Talude Erosivo da Voçoroca Oeste (cm)								
Período	De 03/07/2017 a 03/10/2017	De 03/10/2017 a 03/01/2018	De 03/01/2018 a 04/04/2018	De 04/04/2018 a 27/06/2018	De 27/06/2018 a 09/10/2018	De 09/10/2018 a 04/01/2019	De 04/01/2019 a 09/04/2019	Evolução Total por Ponto
Ponto 1	0	8,9	1,8	-2,5	4,8	1,2	-1,9	12,3
Ponto 4	9,4	0	2,8	0	-2,1	0	10,9	21
Ponto 5	8,9	2,9	0	-1,4	0	4,6	0	15
Ponto 7	1,7	0	0	1,8	0	0	0	3,5
Ponto 10	1,8	1,6	2,3	0	0	0,4	0,5	6,6
Ponto 11	2	0	0	0	3	0	2	7
Ponto 12	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5
Ponto 13	0	4,8	0	0	0	0	1,3	6,1
Ponto 16	0	0	0	22,3	0	0,3	0	22,6
Ponto 17	0	3	1	0	0	1,3	0	5,3
Ponto 18	1,6	1,9	0	0	0	2,3	0	5,8
Ponto 19	0,6	1,8	0	0	0	0	0	2,4
Ponto 22	8,5	3	0	0	0	1,1	0	12,6
Ponto 23	5,8	4,2	0	0,3	0	2,1	-1,8	10,6
Ponto 24	4,9	0	0	0	2	0	0	6,9
Ponto 25	5,2	0	2,4	2,9	0	1,7	0	12,2
Ponto 28	4,9	3	0	0	0	2,2	4	14,1
Ponto 29	1,5	2,3	0	0	0	0	0	3,8
Ponto 30	0	0	2,1	0	0	0	1,3	3,4
Ponto 31	5,1	2,3	0	0	0	0	0	7,4
Ponto 34	2,7	0	0	3,6	0	0	0	6,3
Ponto 35	0	3,2	3,7	0	0	0	0	6,9
Ponto 36	3,9	0	1,6	0	0	0	0	5,5
Ponto 37	4,5	0	0	4,7	0	0	0	9,2
Ponto 38	0	0	0	23,8	0	0	0	23,8
Ponto 41	3,9	3,6	0	10,1	0	0	0	17,6
Ponto 42	5,4	3,9	1	1	1,5	2,1	0	14,9
Ponto 43	0	0	0	0	0	5,7	0	5,7
Ponto 46	0	0	7,8	17,1	0	0	0	24,9
Ponto 47	0	0	3,7	0	0	0	0	3,7
Ponto 48	0	0	0	0	0	4	1,2	5,2
Ponto 49	0	3,7	0	0	0	0	0	3,7
Ponto 50	0	0	0	0	0	6,6	3	9,6
Ponto 53	6,7	0	0	0	0	0	0	6,7
Ponto 54	5	0	2,4	0	0	0	2,2	9,6
Ponto 57	4	0	0	0	0	0	0	4
Ponto 58	6,5	0	0	0	0	1,8	0	8,3

ANEXO B

Acúmulo de Material Por Erosão Hídrica Laminar (cm)							
Período	De 03/07/2017 a 03/10/2017	De 03/10/2017 a 03/01/2018	De 03/01/2018 a 04/04/2018	De 04/04/2018 a 27/06/2018	De 27/06/2018 a 09/10/2018	De 09/10/2018 a 04/01/2019	De 04/01/2019 a 09/04/2019
Ponto 2	0,1	0,3	0	0,4	0,9	0	0,3
Ponto 3	0	0,9	0,4	0	2,4	0,2	0
Ponto 8	0	0,6	1,4	0,6	0	0	0,7
Ponto 9	0,1	0	1	0	0,3	0	0,5
Ponto 14	1,1	3,9	0,3	0	0,4	2,3	0
Ponto 20	0	0,4	0,2	0	0	0,9	0
Ponto 21	0	0,5	1	0	0,3	0,2	1,1
Ponto 27	0	0	1,4	0	0	0	0
Ponto 32	0	7	0	0	0,6	0	0
Ponto 33	0	1,2	0,9	0	1	0	0,2
Ponto 39	0,5	0,2	0	0,4	0,1	0	0,1
Ponto 40	0,3	0,2	0	0	0,9	0,7	0
Ponto 45	0	0	0	0,1	0	0	0
Ponto 52	0	0,2	1	0	1,1	0	0,5
Ponto 55	0,1	0	0,9	0	0,1	0,8	0,9
Ponto 56	0	0,3	0,7	0	0,2	0	0,4
Ponto 59	0	0,3	1,4	0	0,4	0,1	0
Ponto 60	0	0	0	0	0,3	0	0,3
Total	2,2	16	10,6	1,5	9	5,2	5

ANEXO C

Perda de Material Por Erosão Hídrica Laminar (cm)							
Período	De 03/07/2017 a 03/10/2017	De 03/10/2017 a 03/01/2018	De 03/01/2018 a 04/04/2018	De 04/04/2018 a 27/06/2018	De 27/06/2018 a 09/10/2018	De 09/10/2018 a 04/01/2019	De 04/01/2019 a 09/04/2019
Ponto 2	0	0	1,6	0	0	0,1	0
Ponto 3	0	0	0	2,1	0	0	0,3
Ponto 8	0,2	0	0	0	0,3	0,1	0
Ponto 9	0	0,3	0	0,3	0	0,5	0
Ponto 14	0	0	0	0,2	0	0	2,9
Ponto 20	0,1	0	0	0,4	0	0	0,3
Ponto 21	0,5	0	0	0,7	0	0	0
Ponto 27	0,2	0,1	0	0,1	0,4	0,5	0
Ponto 32	0	0	2	0,3	0	0,3	0
Ponto 33	0,3	0	0	0	0	0,7	0
Ponto 39	0	0	0,4	0	0	0	0
Ponto 40	0	0	0,4	1,1	0	0	0,4
Ponto 45	0,2	0	5	0	0,2	0,1	0,6
Ponto 52	0,2	0	0	0,4	0	0,8	0
Ponto 55	0	0,6	0	0,2	0	0	0
Ponto 56	0,2	0	0	0,3	0	0,6	0
Ponto 59	0,1	0	0	1,1	0	0	0,3
Ponto 60	0,1	0	0,2	0,3	0	0,1	0
Total	2,1	1	9,6	7,5	0,9	3,8	4,8

ANEXO D

Ponto	Infiltração - Período Úmido cm ³ /min	Infiltração - Período Seco cm ³ /min	Resistência do Solo à Penetração - Período Úmido (MPa)			Resistência do Solo à Penetração - Período Seco (MPa)			Granulometria (%)					Permeabilidade K20 cm/seg	Ponto	
			Profundidade 10-15cm	Profundidade 25-30cm	Profundidade 60 cm	Profundidade 10-15cm	Profundidade 25-30cm	Profundidade 60 cm	Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Silte	Argila			Textura
1	0,21	0,81	2,13	3,36	3,18	2,25	3,77	3,44	38,6	48,9	87,5	0	12,5	Arenosa	0,0016	1
2	2,22	0,55	2,21	4,31	3,42	2,6	4,76	3,86	58,4	32,1	90,5	2,5	7	Arenosa	0,0177	2
3	0,40	0,89	2,01	2,83	2,9	2,01	3,2	2,84	19,5	65,5	85	0	15	Arenosa	0,0012	3
4	0,57	1,85	2,28	3,46	3,29	2,16	3,72	3,55	34,0	54,0	88	2,5	9,5	Arenosa	0,0262	4
5	0,16	0,76	2,78	6,81	6,10	2,59	6,28	6,22	40,6	44,4	85	0	15	Arenosa	0,0226	5
6	2,52	2,03	1,71	2,75	2,82	1,54	3,46	3,41	44,7	40,3	85	5	10	Arenosa	0,0020	6
7	1,57	2,37	1,52	2,91	2,92	1,34	2,87	3,17	3,3	90,7	94	0	6	Arenosa	0,0219	7
8	1,02	0,87	1,72	3,04	3	2,11	4,16	3,45	67,2	21,8	89	2,5	8,5	Arenosa	0,0001	8
9	0,50	0,84	1,54	1,66	2,63	1,72	2,67	2,53	67,6	23,9	91,5	0	8,5	Arenosa	0,0114	9
10	1,31	2,17	1,55	2,46	2,57	1,46	2,99	3,3	18,6	68,9	87,5	0	12,5	Arenosa	0,0201	10
11	1,61	1,54	2,29	3,32	—	3,04	4,04	6,69	55,4	38,6	94	2,5	3,5	Arenosa	0,0216	11
12	0,43	3,22	1,81	2,46	2,3	2,12	3,49	2,95	57,5	36,5	94	2,5	3,5	Arenosa	0,0006	12
13	0,33	0,92	1,7	3,68	3,66	2,46	4,73	3,9	47,6	45,4	93	3	4	Arenosa	0,0018	13
14	0,11	0,57	1,61	3,04	3,09	2,14	3,54	4,03	41,3	44,2	85,5	3	11,5	Arenosa	0,0021	14
15	0,23	2,61	2,52	6,27	10,58	3,39	5,85	6,27	1,7	37,3	39	22,5	38,5	Argilosa	0,0000	15
16	0,26	0,51	2,21	3,91	5,2	2,47	5,67	5,68	36,1	42,9	79	7,5	13,5	Média	0,0001	16
17	0,48	0,52	1,9	2,58	2,91	2,36	3,48	3,77	20,6	29,9	50,5	19	30,5	Média	0,0000	17
18	0,11	3,63	2,5	4,84	6,77	3,31	6,17	7,76	8,4	22,1	30,5	15	54,5	Argilosa	0,0005	18
19	0,11	2,84	2,7	5,56	9,26	4,34	7,38	9,11	5,4	22,6	28	12,5	59,5	Muito Argilosa	0,0003	19
20	0,07	1,39	2,11	4,82	7,42	4,1	6,85	6,12	16,4	14,1	30,5	5	64,5	Argilosa	0,0068	20
21	0,06	1,39	2,47	4,83	6,07	3,11	4,66	4,61	36,4	11,6	48	0	52	Argilosa	0,0004	21
22	0,19	1,67	3,38	5,52	6,69	4,13	5,99	6,7	21,5	9,0	30,5	5	64,5	Muito argilosa	0,0000	22
23	1,83	0,61	2,42	5,12	6,24	4,05	6,83	7,43	9,0	11,5	20,5	2,5	77	Muito argilosa	0,0000	23
24	0,03	1,7	2,52	4,94	7,31	4,14	5,56	6,59	32,1	15,9	48	0	52	Argilosa	0,0000	24
25	0,35	1,18	2,89	8,02	11,83	3,68	5,94	5,01	26,4	6,6	33	2,5	64,5	Muito argilosa	0,0000	25
26	0,23	0,68	4,4	5,9	5,5	5,71	6,96	4,93	29,5	8,5	38	2,5	59,5	Argilosa	0,0000	26
27	0,02	2,01	3,58	9,6	8,22	3,51	5,98	7,03	3,9	6,6	10,5	10	79,5	Muito argilosa	0,0000	27
28	0,05	1,15	3	4,8	4,36	4,01	5,87	5,09	20,0	44,0	64	5	31	média	0,0000	28
29	0,12	1,87	3,59	6,25	6,46	3,7	6,59	6,9	12,8	23,7	36,5	10	53,5	Argilosa	0,0000	29
30	0,31	7,1	2,03	4,43	7,87	3,4	5,57	6,37	17,2	14,3	31,5	10	58,5	Argilosa	0,0000	30
31	0,26	0,64	2,65	7,54	7,82	4,04	8,2	7,14	54,0	20,0	74	5	21	Média	0,0006	31
32	0,02	0,5	1,83	4,09	9,91	3,42	6,14	7,79	36,4	13,6	50	9	41	Argilosa	0,0000	32
33	0,32	2,4	1,86	4,1	7,06	3,46	6,54	9,42	10,0	50,5	60,5	11	28,5	Média	0,0000	33
34	1,10	1,74	1,63	2,61	2,38	1,8	3,52	3,89	11,1	82,9	94	2,5	3,5	Arenosa	0,0168	34
35	0,04	1,92	1,98	3,57	4,55	3,34	4,92	5,63	5,4	9,4	14,75	7,5	77,8	Muito argilosa	0,0000	35
36	0,21	0,1	1,91	3,02	4,83	2,66	7,57	4,97	21,7	13,8	35,5	7,5	57	Argilosa	0,0000	36
37	0,05	0,85	3,48	6,41	7,03	2,96	5,11	5,13	33,5	24,5	58	5	37	Média	0,0002	37
38	0,12	2,56	1,50	3,11	3,84	3,08	5,68	5,3	16,0	29,5	45,5	2,5	52	Argilosa	0,0000	38
39	0,07	1,3	1,52	3,92	5,08	2,57	4,8	4,45	14,1	28,9	43	2,5	54,5	Argilosa	0,0000	39
40	0,09	1,6	1,56	2,49	3,66	2,92	4,32	5,57	15,9	34,6	50,5	7,5	42	Argilosa	0,0000	40
41	0,06	0,31	1,87	3,9	3,84	3,54	6,69	7,12	29,1	48,9	78	2,5	19,5	Arenosa	0,0004	41
42	0,14	0,34	2,68	5,29	5,81	3,17	5,26	5,11	10,3	30,2	40,5	2,5	57	Argilosa	0,0000	42
43	0,06	0,61	1,31	3,17	4,99	2,42	4,33	4,72	14,3	31,2	45,5	2,5	52	Argilosa	0,0000	43
44	0,14	0,89	1,72	4,04	6,98	3,04	4,42	4,49	13,9	21,6	35,5	7,5	57	Argilosa	0,0000	44
45	1,73	0,78	1,94	2,62	2,68	2,71	3,9	2,85	41,2	34,3	75,5	2,5	22	Média	0,7681	45
46	0,02	0,35	2	4,31	5,94	4,01	5,65	5,48	27,9	47,6	75,5	0	24,5	Média	0,0009	46
47	0,25	0,51	1,61	2,65	2,27	2,91	4,95	4,21	32,0	41,0	73	0	27	Média	0,0002	47
48	0,14	2,61	0,95	2,08	2,08	1,83	3,26	3,2	27,9	57,6	85,5	0	14,5	Arenosa	0,0041	48