



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

TAMARA VIEIRA PASCOTO

**ANÁLISES FATORIAL E DE COMPONENTES PRINCIPAIS
APLICADAS AO ESTUDO DOS FATORES INFLUENCIADORES DE
PROCESSOS EROSIVOS**

Bauru
2020



TAMARA VIEIRA PASCOTO

**ANÁLISES FATORIAL E DE COMPONENTES PRINCIPAIS
APLICADAS AO ESTUDO DOS FATORES INFLUENCIADORES DE
PROCESSOS EROSIVOS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia.

Orientador: Prof. Dra. Anna Silvia Palcheco Peixoto

Co-orientador: Prof. Dra. Simone Andrea Furegatti

Bauru
2020

Pascoto, Tamara Vieira.

Análises fatorial e de componentes principais
aplicadas ao estudo dos fatores influenciadores de
processos erosivos / Tamara Vieira Pascoto, 2020
123f. : il.

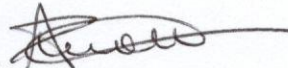
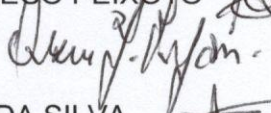
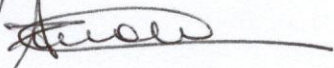
Orientadora: Anna Silvia Palcheco Peixoto
Coorientadora: Simone Andrea Furegatti

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2020

1. Erosão linear. 2. Índices de erosão. 3. Análise
de componente principal. 4. Análise fatorial. 5. São
Manuel. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade
de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE TAMARA VIEIRA PASCOTO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 03 dias do mês de fevereiro do ano de 2020, às 09:00 horas, no(a) Sala de Videoconferência (prédio antigo DEE), reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof^a. Dr^a. ANNA SÍLVIA PALCHECO PEIXOTO - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. OSNI JOSÉ PEJON do(a) Departamento de Geotecnia / Escola de Engenharia de São Carlos / USP, Prof. Dr. ALEXANDRE MARCO DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba - ICT / Unesp / Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de TAMARA VIEIRA PASCOTO, intitulada **MÉTODO DE ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS APLICADO AO ESTUDO DOS FATORES INFLUENCIADORES DE PROCESSOS EROSIVOS**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof^a. Dr^a. ANNA SÍLVIA PALCHECO PEIXOTO 
Prof. Dr. OSNI JOSÉ PEJON 
Prof. Dr. ALEXANDRE MARCO DA SILVA 

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

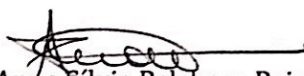
A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA:
TAMARA VIEIRA PASCOTO

DE: "MÉTODO DE ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS APLICADO AO ESTUDO DOS FATORES
INFLUENCIADORES DE PROCESSOS EROSIVOS"

PARA:

Análise Fatorial e de Componentes
Principais Aplicadas ao Estudo dos
Fatores Influenciadores de Processos
Erosivos.

Bauru, 03 de fevereiro de 2020.



Profª. Drª. Anna Sílvia Palcheco Peixoto
Orientadora

**Aos meus pais Gilberto e Sonia
À minha irmã Taina**

AGRADECIMENTOS

Agradeço minha família por todo o carinho, amor e força. Sou grata, especialmente, aos meus pais, Gilberto e Sonia, que tanto lutaram pela minha educação e nunca me deixaram perder a fé.

À minha irmã, Taina, por me ouvir nos momentos difíceis e ao meu cunhado, Thiago, por me auxiliar nas etapas de campo da pesquisa. Gratidão!

Aos meus amigos, André, Alfredo, Breno, Diego, Heber, Isabela e Jhaber, pelas horas de descontração, pelos cafés, risadas e conversas motivacionais.

A Prof^a. Dra. Anna Sivia Palcheco Peixoto pela orientação, confiança e conhecimento compartilhado.

A Prof^a. Dra. Simone Andrea Furegatti pela coorientação, conhecimento e amizade de longos anos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental e a todos os professores que contribuíram para a minha formação.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” por toda a estrutura oferecida para a realização das pesquisas.

Ao técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos, Gustavo, pelas instruções, dedicação e paciência.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida a qual tornou possível o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

A erosão é um problema ambiental em que a perda de solo pode acarretar problemas econômicos e, quando próximos a urbanizações, problemas sociais. A cidade de São Manuel está situada no interior de São Paulo e apresenta, tanto solos argilosos com baixa suscetibilidade a erosão, como solos arenosos com alta suscetibilidade a erosão. Uma vez que existem áreas suscetíveis à erosão próximas à área urbana capazes de colocar a população em risco, surgiu a necessidade de analisá-las a fim de auxiliar políticas públicas para minimizar suas consequências. Com isso, a presente pesquisa propôs o desenvolvimento de uma metodologia para gerar índices de erosão, por Análise de Componente Principal (PCA) e por Análise Fatorial, fundamentado em alguns dos principais fatores influenciadores nos processos erosivos que ocorrem na área urbana do município. Nessa etapa foram considerados: textura do solo; declividade; permeabilidade; uso e ocupação; pluviosidade; e erodibilidade dos solos. Inicialmente, foram levantadas as feições erosivas existentes na área urbana, espacializadas e classificadas. Entre as 9 feições espacializadas, duas eram provenientes de processos fluviais, duas estavam recuperadas, restando cinco feições erosivas lineares para serem estudadas. Uma das cinco, apesar de estar estabilizada, apresentou um avanço significativo em um dos braços. Das feições estudadas, apenas uma foi classificada como ravina, sendo as demais classificadas como voçorocas. Após levantados os fatores influenciadores, os mesmos foram avaliados segundo duas metodologias: Método A – baseou-se na análise de componentes principais, chegando-se em três índices distintos, um influenciado mais pela textura do solo, outro relacionado a declividade e outro a pluviosidade; e Método B - baseou-se em análise fatorial, chegando-se em um único índice, o qual se utilizou a porcentagem de argila, os dados de uso e ocupação e a declividade. Os índices foram espacializados em forma de mapas para auxiliar na análise concluindo-se que o método B foi mais eficiente para o estudo das erosões no município de São Manuel, por apresentar as melhores correlações entre os parâmetros e as feições. Além disso, esse método mostrou uma melhor facilidade na análise dos dados uma vez que ajustou os parâmetros em uma única equação.

Palavras-chave: Erosão Linear, Índices de Erosão, Análise de Componente Principal, Análise Fatorial, São Manuel.

ABSTRACT

Erosion is an environmental problem where soil loss can lead either to economic problems or, whether close to urbanization, social problems. São Manuel town is located in the interior of São Paulo and has both clayey soils with low susceptibility to erosion and sandy soils with high susceptibility to erosion. Since there are areas susceptible to erosion close to the urban area capable of putting the population at risk, the need arose to analyze them in order to assist public policies to minimize their consequences. Therefore, this research proposed the development of a methodology to generate erosion indexes, by Principal Component Analysis (PCA) and Factorial Analysis, based on some of the main factors influencing erosion processes that occur in the urban area of the municipality. At this stage the following factors were considered: soil texture; slope; permeability; use and occupation; rainfall; and soil erodibility. Initially, the erosive features existing in the urban area were surveyed, spatialized and classified. Among the 9 spatialized features, two were from fluvial processes, two were recovered, leaving five linear erosive features to be studied. One of the five, despite being stabilized, presented a significant advance in one of the arms. Of the studied features, only one was classified as ravine, the others being classified as gullies. After surveyed the influencing factors, they were evaluated according to two methodologies: Method A - it was based on the analysis of main components, arriving in three distinct indexes, one influenced more by the texture of the soil, another related to declivity and another to rainfall; and Method B - it was based on factor analysis, arriving in a single index, which used the percentage of clay, the data of use and occupation and the declivity. The indexes were spatialized in the form of maps to help in the analysis, concluding that Method B was more efficient for the study of erosions in the municipality of São Manuel, because it presented the best correlations between the parameters and the features. In addition, this method showed a better facility in the data analysis since it adjusted the parameters in a single equation.

Key-words; Erosion, Linear erosion, Erosion indexes, Principal Component Analysis, Factor Analysis, São Manuel

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa Global de Erosividade das Chuvas.....	4
Figura 2: Diferença de processo erosivo pela ação das gotas de chuva de parcela experimental em solo exposto e em solo com geotêxtil e gramínea.....	8
Figura 3: Ilustração de quatro combinações de formas côncavas e convexas em relevos ...	16
Figura 4. Localização do município de São Manuel dentro do estado de São Paulo no Brasil	30
Figura 5. Localização prévia dos pontos críticos do sistema de drenagem existentes na área urbana de São Manuel.	31
Figura 6: Local da feição 5.....	36
Figura 7: Esquema do local de retirada de amostras, sobre a Feição 02.....	36
Figura 8: Feição erosiva 6 estabilizada, com destaque em amarelo para o crescimento de um braço, chamada de feição erosiva 6A.....	37
Figura 9: Retirada de amostra no talude da feição 9.....	37
Figura 10: Acessórios para a realização do ensaio de permeabilidade	39
Figura 11: Ensaio de Permeabilidade sem a adaptação (a) e com a adaptação (b) das pedras porosas.....	40
Figura 12: Ensaio de Absorção de água.....	41
Figura 13: Ensaio de perda de massa por imersão	42
Figura 14: Fluxograma do método A: Análise de componente principal	46
Figura 15: Fluxograma do método B: Análise Fatorial	47
Figura 16: Espacialização das feições erosivas na cidade de São Manuel	51
Figura 17: Locação das feições erosivas em relação aos corpos d'água	52
Figura 18: Evolução do entorno da erosão do ponto 1	53
Figura 19: Problemas relacionados a drenagem pluvial no entorno da feição 2	53
Figura 20: Vista panorâmica, a partir da cabeceira da feição 2.....	54
Figura 21: Entorno da feição 2	54
Figura 22: Aterramento da feição 3	55
Figura 23: Entorno da feição 4	55
Figura 24: Local da feição 5:(a) foto tirada em março 2018; e (b) foto tirada em março de 2019.....	56
Figura 25: Feição erosiva do ponto 6.....	57
Figura 26: Desenvolvimento do Braço da erosão.....	57

Figura 27: Margem erodida do Córrego Paraíso no ponto da feição 7.....	58
Figura 28: Ciclos de cheia e seca do Córrego no ponto da feição 7 entre os anos de 2008 a 2018.....	58
Figura 29: Destaque de ponto de erosão de margem, no Córrego Paraíso	59
Figura 30: Bocas de lobo no entorno da feição 9	60
Figura 31: Feição erosiva no ponto 9.....	60
Figura 32: Carta de Declividade do terreno: limite da área urbana (à esquerda) e do município (à direita).....	62
Figura 33: Ensaio de Granulometria das amostras coletadas nas feições erosivas, com escala ABNT 6502/95.....	63
Figura 34: Diferença de coloração entre o solo da superfície e a 0,60m de profundidade na feição 1	64
Figura 35: Localização das feições erosivas nos mapas das frações texturais (a- areia; b- argila) a 0,60m de profundidade de São Manuel (* valores estimados).	65
Figura 36: Localização das Erosões no Mapa de Permeabilidade de São Manuel (* valores estimados).....	66
Figura 37: Localização das Erosões no Mapa de Erodibilidade de São Manuel (* valores estimados).....	68
Figura 38: Erodibilidade do solo em função da absorção de água e da perda de massa por imersão das feições erosivas.....	68
Figura 39: Localização das Erosões no Mapa Pluviométrico de São Manuel	69
Figura 40: Mapa de Uso e Ocupação da Área Urbana de São Manuel.....	70
Figura 41: Correlograma da matriz de correlação R.....	72
Figura 42: <i>Scree Plot</i> dos autovalores dos componentes principais.....	73
Figura 43: Mapa do índice textural.....	76
Figura 44: Mapa do índice declividade	76
Figura 45: Mapa do índice de pluviosidade	77
Figura 46: <i>Scree Plot</i> dos autovalores do método B.....	78
Figura 47: Mapa do índice de erosão (*valores estimados)	81
Figura 48: Comparação entre os mapas obtidos no método A (*valores estimados)	82
Figura 49: Comparação entre os parâmetros uso e ocupação, pluviosidade (valores maiores em azul mais escuro), erodibilidade (alta erodibilidade em vermelho e baixa erodibilidade em verde), declividade (menores declividades em verde, maiores em vermelho),	

permeabilidade (altas em vermelho e baixas em azul) e textura de solo (maior quantidade de areia em amarelo e maior quantidade de argila em vermelho) (*valores estimados)84

Figura 50: Sobreposição do mapa hidrológico sobre o mapa da CP3 (*valores estimados)
.....85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados da estatística descritiva realizada por Miqueloni e Bueno (2011).....	23
Tabela 2: Correlação das variáveis e dos componentes principais de Miqueloni e Bueno (2011).....	24
Tabela 3: Autovetores das quatro primeiras CP de Miqueloni e Bueno (2011).....	24
Tabela 4: Parâmetros Geomorfológicos das sub-bacias de Shakkar	25
Tabela 5: Variância total explicada por cada componente principal	25
Tabela 6: Matriz rotacionada Varimax	26
Tabela 7: Autovalores e matriz da carga fatorial das variáveis dos CPs após rotação varimax.....	28
Tabela 8. Pontos críticos levantados no Plano Municipal de Saneamento Básico	32
Tabela 9. Renomeação das feições erosivas.....	33
Tabela 10: Nomenclatura das amostras coletadas	38
Tabela 11: Valores sugeridos por Costa <i>et al.</i> (2018) para os fatores de uso e ocupação ...	43
Tabela 12: Coordenadas das feições erosivas do município de São Manuel	51
Tabela 13: Classificação das feições erosivas na cidade de São Manuel	61
Tabela 14: Porcentagem granulométrica dos solos, massas específicas e índices físicos ...	65
Tabela 15: Coeficientes de Permeabilidade das feições e índices físicos	66
Tabela 16: Resultado dos ensaios de erodibilidade	67
Tabela 17: Valores adotados para uso e ocupação das feições de acordo com o proposto por Costa <i>et al.</i> (2018).....	70
Tabela 18: Conjunto de fatores de influência nos processos erosivos.....	71
Tabela 19: Matriz de Correlação dos dados originais (erodibilidade = E)	72
Tabela 20: Autovalores e variância acumulada de cada componente principal	73
Tabela 21: Autovetores da matriz de correlação dos componentes principais e dos fatores influenciadores.....	74
Tabela 22: Scores dos índices de erosão	75
Tabela 23: Scores normalizados dos índices de erosão	75
Tabela 24: Banco de dados com os fatores padronizados.....	77
Tabela 25: Autovalores e variância acumulada	78
Tabela 26: Comunalidades	79
Tabela 27: Cargas Fatoriais da matriz rotacionada (Varimax).....	79
Tabela 28: Ordem de importância dos fatores influenciadores	80

Tabela 29: Índices de Erosão das Feições.....	81
Tabela 30: Cargas Fatoriais da matriz rotacionada (Varimax).....	102
Tabela 31: Cargas Fatoriais da matriz rotacionada (Varimax).....	102
Tabela 32: Cargas Fatoriais da matriz rotacionada (Varimax).....	103

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A.F.	Areia fina
A.G.	Areia grossa
A. M.	Areia média
A.M.F.	Areia muito fina
AMS	Umidade antecedente do solo com base na massa
ANA	Agencia Nacional de Águas
C	Uso e manejo do solo
CA	Coeficiente de assimetria
Cc	Constante de Compacidade (<i>Compactness Constant</i>)
CDD	Dias consecutivos de Chuva
CP	Componentes Principais
CR	Curtose
CV	Coeficiente de variação
DATAGEO	Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo
D _d	Densidade de Drenagem (<i>drainage density</i>)
d ₁₀	Diâmetro efetivo (diâmetro em que apenas 10% da massa de uma amostra de solo passa na peneira)
E	Erodibilidade
<i>e</i>	Índice de vazios
E _c	Energia Cinética
EE	Expectativa de erosão
EI30	Erosividade da Chuva
E.U.P.S.	Equação Universal de Perda de Solo
F _m	Fator influenciador que possui a carga mais alta negativa da C _n
F _n	Fator influenciador que possui a carga mais alta positiva da C _n
Fs	Frequência de Fluxo
GI _{Shakkar}	Índice Geomorfológico da bacia de Shakkar
GPS	Sistema de Posicionamento Global
HI	Integral Hipsométrica (<i>Hypsometric integral</i>)
HidroWeb	Portal que oferece acesso ao banco de dados que contém todas as

	informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional
I5	Máxima intensidade em 5 minutos
I10	Máxima intensidade em 10 minutos
I15	Máxima intensidade em 150 minutos
I20	Máxima intensidade em 20 minutos
I30	Máxima intensidade em 30 minutos
I45	Máxima intensidade em 45 minutos
I60	Máxima intensidade em 60 minutos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Interpolação pela ponderação do inverso da distância
I_{Fm}	Importância que o fator influenciador m tem no índice.
I_{Fn}	Importância que o fator influenciador n tem no índice.
$IE_{feição}$	Índice de Erosão de cada feição erosiva
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISUM	Improved stock unearthing Method
K	Erodibilidade do solo
k	Coeficiente de permeabilidade
KMO	<i>Kaiser Mater Olkim</i>
KS	Teste de normalidade de Kolmogov-Smirnov
λ_j	Autovalores
L_o	Comprimento de Fluxo (<i>length of overland flow</i>)
LS	Fator relacionado à topografia da superfície - declividade e extensão da vertente
MDS	Maximum Depressional Storage
M.O.	Matéria orgânica
n	Porosidade
NBR	Norma Técnica
P	Práticas conservacionistas
PPT	Precipitação
PPT5	Precipitação do antecedente cinco dias
P	Perda por imersão
ρ_d	Massa específica seca
ρ_n	Massa específica natural

ρ_s	Massa específica dos sólidos
PCA	Análise de Componentes Principais
PNE	Potencial natural de erosão
Q_{Max}	Pico de fluxo
Q_n	Parâmetros morfométricos indiretamente proporcional a erosão do solo
R.E.U.P.S.	Equação Universal de Perda de Solo Revisada
R.E.U.P.S.2	Equação Universal de Perda de Solo Revisada 2
R	Erosividade da chuva
R	Ambiente computacional e uma linguagem de programação
R_b	Razão de bifurcação (<i>Bifurcation Ratio</i>)
RD	Profundidade do escoamento
R_c	Relação de circularidade (<i>circularity ratio</i>)
R_e	Relação de alongamento (<i>elongation ratio</i>)
R_f	Fator de forma (<i>form factor</i>)
R_h	Razão de Relevo (<i>Relief Ratio</i>)
R_N	Coefficiente de drenagem (<i>Ruggedness Number</i>)
R_r	Relevo Relativo (<i>Relative Relief</i>)
RR	Rugosidade randômica
S	Declividade do terreno
S	Índice de absorção
S	Grau de saturação
S_a	Declividade média da bacia (<i>Average Slope of watershed</i>)
SH	Sub-bacia hidrográfica
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRC	Sistema de referência de coordenadas
SY	Sedimento Gerado
T	Textura de drenagem (<i>drainage texture</i>)
TOPODATA	Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil
v_j	Autovetores
UGRHIs	Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos
USLE	Equação Universal de Perda do Solo
UTM	Universal Transversa de Mercator
W	Umidade

WGS84	World Geodetic System 1984
W_{Pn}	Pesos dos correspondentes parâmetros são os parâmetros morfométricos diretamente proporcional à erosão do solo
W_{Qn}	Pesos dos correspondentes parâmetros são os parâmetros morfométricos indiretamente proporcional à erosão do solo

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO	I
ABSTRACT	II
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS.....	VIII
SUMÁRIO.....	XII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA	3
1.2 OBJETIVOS	5
CAPÍTULO 2	6
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 EROSÃO	6
2.1.1 Fatores Erosivos.....	10
2.1.1.1 Erosividade	10
2.1.1.2 Erodibilidade	12
2.1.1.3 Cobertura Vegetal.....	13
2.1.1.4 Características da Superfície do Terreno	15
2.1.2 Ação Antrópica.....	17
2.2 ANÁLISE MULTIVARIADA.....	18
2.2.1 Miqueloni e Bueno (2011).....	22
2.2.2 Gajbhiye et al. (2015).....	24
2.2.3 Santos et al. (2018).....	27
CAPÍTULO 3	29
MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	30
3.2 ESPACIALIZAÇÃO DAS FEIÇÕES EROSIVAS.....	31

3.3	CLASSIFICAÇÃO DAS FEIÇÕES EROSIVAS.....	33
3.4	DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE INFLUÊNCIA NOS PROCESSOS EROSIVOS.....	34
3.4.1	<i>Declividade da Superfície</i>	34
3.4.2	<i>Caracterização Geotécnica</i>	35
3.4.3	<i>Pluviosidade</i>	42
3.4.4	<i>Uso e Ocupação do Solo</i>	43
3.5	DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE EROSÃO (IE).....	44
3.4.1	<i>Banco de Dados</i>	44
3.4.2	<i>Método A: Análise de Componente Principal</i>	45
3.4.3	<i>Método B: Análise Fatorial</i>	47
3.4.4	<i>Elaboração e análise dos mapas</i>	49
CAPÍTULO 4		50
RESULTADOS E DISCUSSÃO		50
4.1	ESPAIALIZAÇÃO DAS FEIÇÕES EROSIVAS.....	50
4.2	CLASSIFICAÇÃO DAS FEIÇÕES EROSIVAS.....	52
4.3	RESULTADOS DOS FATORES INFLUENCIADORES.....	61
4.3.1	<i>Declividade da Superfície</i>	61
4.3.2	<i>Caracterização Geotécnica</i>	62
4.3.3	<i>Pluviosidade</i>	69
4.3.4	<i>Uso e Ocupação</i>	69
4.4	DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE EROSÃO.....	71
CAPÍTULO 5		87
CONCLUSÕES		87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		89
APÊNDICES		99

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A erosão é um ciclo natural que envolve a desagregação, o transporte e a disposição de sedimentos do solo, subsolo e rocha em decomposição. O estudo da erosão a divide em dois grandes grupos: erosão geológica e erosão acelerada. A primeira envolve processos lentos e gradativos naturais do meio, os quais modelam e constroem as formas de relevo existentes. A segunda ocorre devido à ação humana, que acelera o processo e, como consequência, a região não consegue se adaptar à rápida transformação do meio, resultando em uma acelerada destruição ou danificação dos solos.

No âmbito mundial, a erosão é uma das causas responsáveis pela perda de nutrientes dos solos, diminuindo assim a área agricultável disponível. Fullen e Catt (2005) destacam a importância do estudo das erosões e da remediação das áreas afetadas, afirmando que a população mundial poderá ter grandes problemas para se sustentar. A erosão também é responsável por assoreamento de rios e também deterioração de infraestrutura existente nas áreas urbanas (ARAÚJO *et al.*, 2008; DEVATHA *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2016; EL JAZOULI *et al.*, 2017; EL JAZOULI *et al.*, 2019).

De acordo com o agente causador, as erosões podem ser do tipo marinha, glacial, eólica, hídrica, entre outros. A erosão hídrica pode ser proveniente tanto das águas dos rios, chamada de erosão fluvial, quanto das águas das chuvas, chamada de pluvial. A erosão fluvial provoca desgastes nas margens, que acabam por remover partes do solo, podendo mudar a forma e o local do leito dos rios. A erosão pluvial modela as encostas por meio da perda de solo ou por incisões na superfície, causadas pelo impacto das gotas de chuva, pelo comportamento da infiltração de água no solo e do armazenamento de água nas microrrugosidades do terreno e, conseqüentemente, pelas características do escoamento superficial.

Os processos da erosão pluvial são influenciados por fatores relacionados às características do solo (textura, permeabilidade, erodibilidade, *etc.*), da superfície (declividade, uso e ocupação, *etc.*) e da chuva (quantidade, erosividade, *etc.*).

Diversos são os autores que estudam os processos erosivos a partir dos fatores influenciadores. Araújo (2011) e Arantes (2019), por exemplo, estudaram a declividade média e a área de contribuição da bacia hidrografia para determinar índices topográficos com o intuito de prever o desencadeamento de feições erosivas. Costa *et al.* (2018) se basearam nos fatores declividade, forma de talude, geologia, textura do solo, permeabilidade, erodibilidade, densidade de drenagem, densidade de vegetação, uso e ocupação do solo e dados de precipitação de chuva para analisar o escoamento superficial como potencial de erosão. El Jazouli *et al.* (2017), Pham *et al.* (2018) e Gottstein *et al.* (2019) se basearam nos parâmetros da USLE (erosividade da chuva, erodibilidade dos solos, comprimento de rampa, declividade, uso e manejo do solo e práticas conservacionistas) com o auxílio do Sistema de Informação Geográfica (SIG) para se estimar a perda de solo em determinadas áreas.

Uma das formas de avaliar a influência dos fatores erosivos e ponderar a importância de cada um dos fatores na prevenção, mensuração e mitigação da erosão pode ser aplicar métodos de análise multivariada. A análise multivariada é uma ferramenta que possui inúmeros métodos estatísticos, com capacidade de encontrar padrões e relações entre as variáveis, permitindo prever a influência e mudanças que uma variável pode ter no conjunto de dados amostrais.

Miqueloni e Bueno (2011), Bueno *et al.* (2010), Lima *et al.* (2014), Gajbhiye *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2018) utilizaram métodos da análise multivariada para avaliar alguns dos fatores influenciadores dos processos erosivos. Miqueloni e Bueno (2011) consideraram a textura do solo, o teor de matéria orgânica e a erodibilidade do solo. Além desses fatores, Bueno *et al.* (2010) consideraram também a erosividade da chuva, comprimento de rampa, comprimento de vertente, uso e manejo e práticas conservacionistas do solo. Lima *et al.* (2014) consideraram apenas a erodibilidade, a erosividade, declividade e extensão de vertente e uso do solo. Gajbhiye *et al.* (2015), entretanto, optaram por estudar outros fatores influenciadores relacionados, principalmente, aos fatores hidrográficos de uma bacia e de forma da superfície: densidade de drenagem, razão de bifurcação, textura de drenagem, frequência de drenagem, relevo, fator de forma, e *etc.* Santos *et al.* (2018) correlacionaram parâmetros relacionados ao regime das chuvas e do escoamento superficial com dados de geração de sedimentos em

um período de 2009 a 2014. Em todos os casos, a análise multivariada auxiliou na compreensão da influência dos fatores nos processos erosivos. A análise multivariada auxiliou, também, na elaboração de mapas gerados a partir de erosões existentes. A extrapolação dos dados em plataforma SIG contribui para a alocação de recursos e a tomada de decisão quanto às medidas preventivas, ou medidas corretivas, que se façam necessárias (HAREGEWEYN *et al.*, 2017).

Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo determinar índices de ocorrência de erosão, em função de fatores influenciadores dos processos erosivos. Foram estudadas duas metodologias, uma embasada na *análise de componentes principais* e a outra na *análise fatorial*, buscando contribuir com a análise de suscetibilidade à erosão da região estudada. O trabalho foi desenvolvido com base em dados do município de São Manuel, interior de São Paulo, o qual apresenta diversos problemas relacionados ao surgimento das feições erosivas.

1.1 Justificativa

Nos processos erosivos pluviais a influência da chuva pode ser medida por meio da erosividade, que é a capacidade da chuva em causar erosão. De acordo com mapa elaborado por Paganos *et al.* (2017) (Figura 1), o Brasil é um dos países que apresentam as maiores erosividades do mundo, sendo a região amazônica o local com os valores mais altos observados. De acordo com estudo do regime da pluviosidade mundial de Greve *et al.* (2018), esse cenário pode piorar ainda mais, se for levado em consideração a estimativa para os próximos anos, quando haverá um aumento da pluviosidade nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Entretanto, como a erosão depende de um conjunto de fatores, a região amazônica não é a única região que é atingida pela erosão no Brasil. De acordo com o levantamento do IBGE (2017) do Perfil dos municípios brasileiros, entre os anos de 2014 a 2017, 19,6% dos municípios brasileiros foram atingidos por processos erosivos acelerados, sendo a Região Sul com a maior concentração desses municípios (24,5%) e a Região Nordeste com a menor concentração (14,2%).

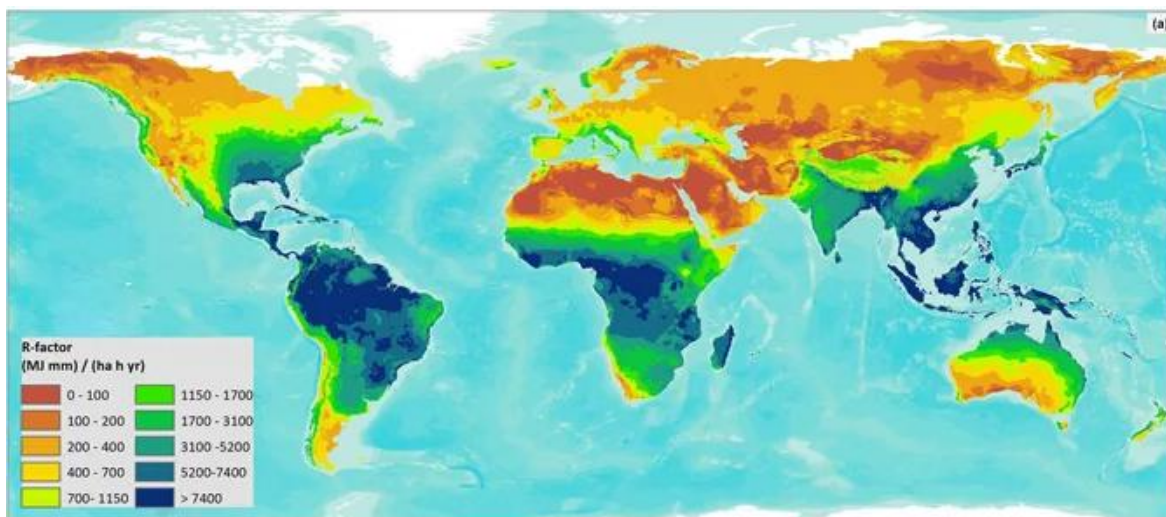


Figura 1: Mapa Global de Erosividade das Chuvas
Fonte: Adaptado de Panagos *et al.* (2017)

As consequências causadas pelas erosões são inúmeras. Os prejuízos socioeconômicos são da ordem de milhões de dólares desde os anos 90. Em 1993, por exemplo, as 45 voçorocas existentes na área urbana de Goiânia carrearam quase 3 milhões de toneladas de solo (NASCIMENTO, 1994). Marques (1998) quantificou os danos ambientais internos e externos ocorridos na bacia hidrográfica do Rio Sapuêia, situada ao sul do estado de Minas Gerais e ao norte do estado de São Paulo: ambos os danos giraram em torno de 15 milhões de dólares. Vitória (2016) listou e analisou os danos causados por erosão e cheias, nas fundações e nos aterros de acessos, em algumas pontes rodoviárias de Pernambuco, entre os anos de 2007 a 2011. As erosões foram capazes de colapsar as estruturas parcial ou totalmente, e como consequência, em todos os casos, ocorreu a interdição do tráfego, além do isolamento de cidades ou regiões em alguns casos. Debiasi (2018) afirmou que, só nas lavouras temporárias, o estado do Paraná perde 242 milhões de dólares por ano apenas em nutrientes que são levados pela erosão.

Uma das maneiras de contribuir com o estudo sobre erosão do solo, visando à prevenção e controle para evitar os danos causados por ela, é estudando os fatores capazes de influenciar na geração de novas feições erosivas, ou no desenvolvimento acelerado das existentes.

1.2 Objetivos

O objetivo da pesquisa foi aplicar duas metodologias para gerar índices de erosão, que indiquem a possibilidade de ocorrência de erosão, através de análise multivariada, a fim de auxiliar na prevenção do desenvolvimento de futuras erosões, com base nos dados do município de São Manuel – SP.

Para alcançar o objetivo, as seguintes metas foram buscadas:

- Espacialização e classificação das feições erosivas existentes na área urbana do município de São Manuel;
- Mensuração dos fatores de influência dos processos erosivos, de cada feição existente, gerando um banco de dados;
- Aplicação das técnicas de análise multivariada no banco de dados dos fatores de influência;
- Determinação dos índices de erosão para cada feição erosiva e para cada combinação de utilização das técnicas de análise multivariada;
- Geração de mapas com os índices de erosão encontrados para o município de São Manuel;

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Erosão

Por definição, erosão é um ciclo que envolve a desagregação, o transporte e a disposição de sedimentos do solo, subsolo e rocha em decomposição através dos agentes erosivos (FENDRICH *et al.*, 1988; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2014). A erosão pode ser dividida em dois principais tipos: a erosão geológica e a erosão acelerada. A primeira é um processo natural da Terra, pois acontece devido à dinâmica da superfície terrestre, que se encontra em mudança desde o surgimento do planeta. A segunda, a erosão acelerada, ocorre pelo uso intenso do solo e é causada pela ação antrópica, ocorrendo de formas diferentes em meios urbanos e rurais, acelerando processos naturais e causando danos à sociedade.

Em relação ao agente erosivo desencadeador, as erosões podem ser classificadas como erosão eólica, quando o agente causador são os ventos; erosão glacial, quando relacionados às geleiras; e em erosão hídrica, quando o agente são as águas de forma geral, e mais especificamente fluvial (rios) e pluvial (água de chuva), havendo ainda a erosão marinha, quando o agente são os processos costeiros. A erosão pluvial ocorre de forma mais grave em regimes de chuvas tropicais (GUERRA e CUNHA, 1998).

As feições provocadas por erosão pluvial podem ser do tipo laminar ou linear. As erosões laminares erodem uma lâmina mais ou menos homogênea e superficial de solo, usualmente de difícil percepção (BRITO *et al.*, 1998). Uma forma de mensurá-las pode ser instalando marcos de referência ou testemunhos de nível na área a ser estudada (CONCIANI, 2008).

Tanto nas erosões laminares quanto nas lineares, o destacamento e, principalmente, o transporte das partículas são causados, também, pelo escoamento superficial da chuva. Em chuvas prolongadas, o escoamento acontece quando o solo satura em relação à infiltração e ao armazenamento de água na superfície (HORTON, 1945). Entretanto, em chuvas intensas, a precipitação pode ser tão elevada em um curto período de tempo, que pode superar a taxa de infiltração, acarretando no escoamento superficial sem que haja completa saturação do solo.

O fluxo de água tende a ser difuso no início do escoamento superficial (*sheetflow*), provocando a erosão laminar. A velocidade desse fluxo e a concentração dos sedimentos gerados aumentam à medida que o processo erosivo se estabelece (MERRIT, 1984).

No momento que os canais se formam, as feições erosivas causadas deixam de ser do tipo laminar e passam a ser chamadas de erosões lineares. As feições erosivas formadas podem ser classificadas em sulcos, ravinas e voçorocas. Essa classificação diverge entre os pesquisadores estudados (FOSTER, 1986; IWASA e FENDRICH, 1998; KARMANN, 2000; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006). Algumas definições levam em consideração a dimensão e a forma da feição, enquanto outras definições consideram a presença ou não de água subterrânea, em casos de ravinas e voçorocas.

Os sulcos são as primeiras feições a surgir na forma linear. O aparecimento dos sulcos é marcado pela mudança na forma do escoamento, de fluxo difuso para fluxo concentrado, em pequenas depressões da superfície. Devido à distribuição aleatória das depressões na superfície em condições naturais, a localização da incidência dos sulcos torna-se imprevisível. Camapum de Carvalho *et al.* (2006) definem sulco como pequenos canais de escoamento de água, com profundidade máxima de 10 cm. Foster (1986) define sulcos como pequenos canais de escoamento de água que não costumam recorrer nos mesmos locais e dependem diretamente do manejo do solo. Para esse autor, podem ser de qualquer tamanho, porém, geralmente, possuem dimensões, aproximadas, de 0,15m de largura por 0,10m de profundidade.

Os fluxos concentrados de água, que acarretam em sulcos, podem tornar-se turbulentos por vários motivos: um aumento do gradiente da encosta; um aumento da intensidade da chuva; ou ainda devido à capacidade de armazenamento de água na superfície (GUERRA e CUNHA, 1998).

Morgan (1978) afirma que apenas 0,06% da energia da chuva contribuem para o destacamento dos sedimentos, sendo o impacto das gotas (*splash*) o maior influenciador no desprendimento das partículas, em solos arenosos da Inglaterra. Guerra e Cunha (1998)

descrevem a erosão em *splash* (também conhecida como erosão por salpicamento) detalhadamente, como sendo o impacto da gota na superfície desprende as partículas de solo que estão envoltas por uma película de água. A gota se movimenta descrevendo uma curva parabólica, movendo-se lateralmente. No caso de encostas ou taludes, as gotas se movimentam em todas as direções, na horizontal ou na vertical, porém, geralmente as partículas tendem a se mover para baixo, à distância três vezes maior do que para cima.

Devido ao salpicamento, neste tipo de erosão, a análise da resistência ao cisalhamento do solo deve ser estudada concomitantemente aos demais fatores de influência, tendo em vista que é a resistência ao cisalhamento que controla a resistência do solo ao desprendimento de partículas (DURRAH e BRADFORD, 1981).

Bezerra *et al.* (2006) constataram que a utilização de geotêxtil e de gramíneas diminui significativamente o *splash* quando comparada com o solo exposto. A Figura 2 ilustra o experimento realizado pelos autores, mostrando visualmente a diferença entre as duas situações. O experimento constituiu em coletar os sedimentos gerados, tanto no solo exposto, quanto no solo com geotêxtil e gramíneas. A redução na geração de sedimentos foi superior a 93%.



Figura 2: Diferença de processo erosivo pela ação das gotas de chuva de parcela experimental em solo exposto e em solo com geotêxtil e gramínea.

Fonte: Bezerra *et al.* (2006).

Em outro trabalho, Ramos *et al.* (2011) também concluíram que a permanência da cobertura vegetal no solo é a principal forma de se reduzir o *splash*, sendo a cobertura vegetal viva ou em decomposição. Os autores estudaram os efeitos da pastagem, do plantio da cana-de-açúcar e da mata nativa no processo de salpicamento. Como resultados

obtiveram a maior redução de massa gerada devido ao *slpash* para o ambiente de pastagem, no valor de 82,74%.

Outro fator capaz de reduzir o *splash* é a formação de crostas causadas pelo próprio processo. Alguns autores afirmam que essa formação é um dos mecanismos mais importantes dos processos erosivos. As crostas aumentam a resistência da superfície do solo em relação à energia cinética da chuva, selando a superfície e diminuindo a infiltração de água no solo e, assim, aumentando expressivamente o escoamento superficial (GUERRA e CUNHA, 1998). Farres (1978) demonstrou que não é necessário ter longos períodos chuvosos para ocorrer a formação das crostas. O autor observou que podem se formar em um único evento de chuva. Quando esse processo ocorre, as feições podem avançar em tamanho e passam a ter dimensões e comportamento de ravinas.

Segundo Rauws e Govers (1988), as ravinas iniciam quando a resistência dos materiais da crista da encosta é superada pelas forças hidráulicas do escoamento concentrado. Camapum de Carvalho *et al.* (2006) definem ravinas como canais com profundidade de 10 cm a 50 cm. Isso porque em profundidades mais elevadas, a estabilidade dos taludes das feições seria afetada pela menor quantidade de matéria orgânica e maior ausência de raízes das vegetações. Foster (1986) afirma que as ravinas tendem a ser mais largas do que profundas, as paredes laterais não costumam ser bem definidas e as cabeceiras (*headcuts*) não são facilmente visíveis e nem proeminentes.

A chuva pode aumentar a capacidade de transporte de sedimentos gerados dentro e fora da própria ravina. A contínua geração de sedimento dentro da feição pode fazer com que aumente e se transforme em voçoroca. Segundo alguns autores (OLIVEIRA, 1994; CASTRO *et al.* 2004; CASTRO, 2005, CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006; SALOMÃO, 2012), o surgimento das voçorocas se dá no momento em que a feição atinge o lençol freático, ou devido ao formato que a feição atinge. Consideram que as voçorocas possuem paredes íngremes, taludes instáveis, havendo ou não erosão interna. Desse modo, as voçorocas tornam-se a forma mais destrutiva de todos os processos erosivos. Isso porque em seu interior e/ou ao redor da feição acabam por ocorrer vários fenômenos concomitantemente (erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos e escorregamentos) (SALOMÃO, 2012), além de que esse tipo de erosão linear também transporta todo e qualquer tipo de material, não apenas as partículas mais finas e superficiais do solo como ocorrem nas erosões laminares.

2.1.1 Fatores Erosivos

A quantidade de sedimentos gerados pela erosão hídrica pluvial depende, sobretudo, de fatores que podem ou não acelerar o processo. Guerra e Cunha (1998), por exemplo, dividem os fatores erosivos em: erosividade (chuva), erodibilidade (propriedades do solo), características do talude e cobertura vegetal.

2.1.1.1 Erosividade

A perda de solo, na erosão pluvial, está diretamente relacionada com características das chuvas, em parte devido ao impacto das gotas de chuva (*splash*) que destacam as partículas do maciço e, em parte devido ao volume e a intensidade da chuva, que contribuem com o escoamento superficial (*runoff*) (PARSONS, 1988; MORGAN, 2005).

A erosividade é a capacidade da chuva em causar erosão, ou seja, é o resultado do fator erosivo da chuva (GUERRA e CUNHA, 1998). É um índice usado principalmente para avaliar e prever as taxas de erosão do solo em terras agrícolas. As taxas de erosão podem ser calculadas pelas *E.U.P.S.* (Equação Universal de Perda de Solo), *R.E.U.P.S.* (Equação Universal de Perda de Solo Revisada) e/ou *R.E.U.P.S.2* (Equação Universal de Perda de Solo Revisada 2), que são os métodos mais comuns de quantificação de erosão. Existem inúmeros métodos e equações que calculam a erosividade e atualmente, há grande dificuldade em adequá-los de forma a descrever melhor a situação (NEARING *et al.*, 2017). Uma das formas para se medir a erosividade é através da perda de solo em uma dada chuva e em uma dada área sem cobertura vegetal, para que diferentes tipos de cobertura não influenciem na medição.

Wischmeier e Smith (1958) desenvolveram a primeira equação utilizada para expressar o potencial de erosividade, onde a erosividade era dada pela multiplicação da intensidade da chuva (obtida por pluviógrafos) e a energia da referida chuva (E_c). A delimitação de tempo de 30 minutos para a obtenção da intensidade máxima foi determinada posteriormente por Wischmeier (1959), com o auxílio do estudo de Wischmeier *et al.* (1958). Zheng e Chen (2015) pesquisaram, mais recentemente, a delimitação de tempo entre 10 e 20 minutos, concluindo que a delimitação de tempo de 30 minutos, de Wischmeier (1959), funciona tão bem quanto a delimitação pesquisada e, por esse motivo, a delimitação de 30 minutos ainda é vastamente utilizada.

Para o cálculo da energia cinética (Equação 1), Wischmeier e Smith (1958) utilizaram métodos indiretos alternativos definidos por Gunn e Kinzer (1949), respaldados pela pesquisa de Laws (1941):

$$Ec = 0,119 + 0,0873 * \log I \quad 1$$

Em que Ec é a energia cinética [MJ/ha*mm]; I é a intensidade de chuva [mm/h].

Na segunda versão da *E.U.P.S.* e nas revisões posteriores, Wischmeier e Smith (1978) delimitaram o valor de Ec a 0,283 (equivalente a uma intensidade de precipitação de 76,2 mm/h), considerando que a quantidade da chuva não continua a aumentar significativamente além dessa intensidade.

Importante ressaltar que a *E.U.P.S.* foi determinada para prever taxas médias a longo prazo de erosão e não para prever eventos específicos. Para prever eventos específicos foi desenvolvida, em 1997, a *R.E.U.P.S.*, na qual o valor de intensidade para os 30 minutos foram baseados em tempestades isoladas. Com isso, os valores das erosividades da *R.E.U.P.S.* são inferiores aos valores da *E.U.P.S.* (NEARING *et al.*, 2017).

Em um terceiro momento, foi desenvolvida a *R.E.U.P.S.2* pela USDA-Agricultural Research Service (2013) que introduziu um novo conceito de “densidade de erosividade”, com o objetivo de calcular e mapear a erosividade das chuvas nos Estados Unidos. Esse conceito teve como principal função corrigir erros no cálculo da erosividade na primeira versão da *R.E.U.P.S.*. Com isso, Nearing *et al.* (2017) afirmam que, para determinar corretamente a erosividade da chuva, deve-se saber a correta finalidade do uso que o parâmetro será utilizado para escolher a equação mais adequada. Os autores também esclarecem que sempre que informar a erosividade da chuva quantitativamente deve-se informar as características desse índice, como por exemplo, se é de uma chuva específica, ou de um longo período de tempo.

Estudos como o de Silva (2004), que espacializou a erosividade anual das chuvas no Brasil, afirmam que o noroeste brasileiro apresenta os maiores valores de erosividade, enquanto a região nordeste apresenta os menores valores. O autor também assegurou que, na maior parte do território brasileiro (exceto a região nordeste e sul), os meses de dezembro e janeiro são os que possuem os maiores valores de erosividade, enquanto o período de junho a setembro apresenta os menores valores de erosividade. Estudos mais recentes atualizaram os mapas de Silva (2004), como o de Mello *et al.* (2013), Oliveira *et al.* (2013) e Trindade *et al.* (2016), entretanto, todos os mapas corroboram os mapas

desenvolvidos anteriormente. Guerra e Cunha (1998), através de estudos mais específicos, concluíram que as maiores energias estão relacionadas às chuvas com intensidades entre 50 e 100 mm/h, pois é nesse intervalo que pertence a maior porcentagem das gotas grandes (maiores que 4,0 mm).

2.1.1.2 Erodibilidade

A susceptibilidade à erosão dá-se através da combinação das propriedades dos solos com outros fatores, como a erosividade da chuva e a cobertura vegetal (GUERRA e CUNHA, 1998). A baixa suscetibilidade está intimamente ligada à alta resistência do solo em ser removido e transportado, ou seja, à baixa erodibilidade dos solos (MORGAN, 2005).

Para um estudo aprofundado da erodibilidade, Daniels e Hammer (1992) afirmam que é necessário determinar as propriedades físicas e químicas do solo em laboratório, através de amostras coletadas em campo. Guerra e Cunha (1998), por exemplo, concluíram que, quanto maior o teor de silte no solo, maior a possibilidade de erosão. Os autores também inferiram que a quantidade de argila influencia na erodibilidade dos solos, uma vez que solos argilosos apresentam baixa capacidade de infiltração de água, fazendo com que haja escoamento superficial mais facilmente. Comparadas às partículas de granulometria maiores, as partículas de argila possuem maior coesão, o que as tornam mais difíceis de serem desprendidos do maciço.

Por outro lado, Fendrich *et al.* (1988) chegaram à conclusão que os solos arenosos, poucos coesivos, porosos, constituídos de areia fina, silte e com pouca argila, são os solos que mais apresentavam problemas quanto à erosão. Adicionalmente, a areia grossa e a argila são as frações com menor erodibilidade, as areias devido ao maior diâmetro e as argilas devido à coesão. Isso ocorre porque os solos arenosos formam menos agregados que os solos mais finos, uma vez que horizontes arenosos atrapalham a proteção física da matéria orgânica (SANTOS *et al.*, 2011), e a presença da fração de argila facilita a formação dos agregados devido a coesão que a argila apresenta entre as partículas (VEZZANI E MIELNICZUK, 2011).

A forma como as partículas se agregam e formam os agregados é chamado de teor de agregados. A combinação do teor dos agregados com a respectiva estabilidade desses agregados também interferem na erodibilidade dos solos. Um baixo teor de agregados aumenta o *splash*, e a ruptura dos agregados aumenta a formação de crostas no solo,

resultando no aumento do escoamento superficial. A estabilidade dos agregados reduz diretamente a erodibilidade, devido à diminuição do escoamento superficial, pela maior quantidade de poros no solo e, conseqüentemente, maior infiltração de água (GUERRA, 1990). A alta estabilidade dos agregados também diminui a formação de crostas no solo, uma vez que o impacto das gotas de chuva necessita de uma energia maior para destacar as partículas do solo. Mesmo com a menor quantidade de crostas no solo, quando há escoamento superficial, o alto teor de agregados torna os torrões mais pesados, aumentando, também, a resistência ao transporte pelo escoamento superficial (ALBUQUERQUE *et al.*, 2000).

Em estudos de erosão, a maioria dos trabalhos, quando relacionados à erodibilidade dos solos, enfatiza as propriedades físicas do solo com a finalidade de entender a evolução dos processos erosivos (DE PLOEY, 1981; MORGAN, 1983; BOARDMAN, 1983, 1990; BOARDMAN *et al.*, 1993). Além das propriedades físicas, também é importante analisar quimicamente o solo, principalmente em pesquisas que envolvam a pedologia e a aplicação na área agrônômica, pois assim é possível compreender a dinâmica da formação e evolução dos solos (DANIELS e HAMMER, 1992).

A porosidade também é uma propriedade importante no estudo de erosões, pois quanto maior a porosidade, menor o grau de compactação e com isso, maior a capacidade de infiltração de água no solo e, portanto, menor o escoamento superficial.

De acordo com Wischmeier *et al.* (1971) a erodibilidade também pode ser estimada com base na combinação da quantidade de matéria orgânica com os fatores físicos (textura, estrutura e permeabilidade). Um baixo teor de matéria orgânica diminui as taxas de infiltração de água no solo, aumentando o escoamento superficial e, conseqüentemente, as taxas de erosão (GUERRA, 1990). Essa relação faz com que mudanças nos teores de matéria orgânica, agregação entre as partículas e as características da infiltração afetem a erodibilidade dos solos (SINGH e KHERA, 2009). Isso pode explicar o crescimento das feições erosivas: a erodibilidade aumenta com a profundidade, devido à diminuição da matéria orgânica (CLEMENTE *et al.*, 2017).

2.1.1.3 Cobertura Vegetal

Guerra e Cunha (1998) afirmam que a vegetação influencia na erosão de diversas maneiras, seja através das raízes da cobertura vegetal, da redução da energia cinética da chuva, ou na formação de matéria orgânica no solo. Também está intimamente ligada ao

escoamento superficial e consequentemente à geração de sedimentos e à perda de solo. Morgan (1984 *apud* GUERRA e CUNHA, 1998) confirma que a vegetação reduz a energia da chuva que chega ao solo, minimizando assim o impacto das gotas e consequentemente a erosão. Além da redução do impacto das gotas, as folhas fazem com que a água da chuva escoe sobre elas, protegendo assim o maciço contra a erosão superficial (MASSAD, 2010).

Bertoni e Lombardi Neto (2014) apontam a importância da vegetação na defesa natural de um terreno contra a erosão. Os autores afirmam que os principais benefícios são, além da proteção contra o *splash*, a formação de pequenos canais facilitadores da infiltração de água no solo, devido a decomposição das raízes, o melhoramento da estrutura do solo devido ao aumento da matéria orgânica e a diminuição da velocidade do escoamento superficial.

Almeida *et al.* (2016) após avaliarem diferentes coberturas vegetais, sob chuvas simuladas, concluíram que as perdas de solo diminuem com o aumento da cobertura vegetal e com o não revolvimento do solo. Os autores também afirmam que em áreas sob baixa cobertura vegetal e com um manejo inadequado os processos erosivos ocorrem na mesma intensidade de áreas com solo exposto. Entretanto, áreas com baixa cobertura vegetal, como as pastagens, quando possui manejo adequado, a vegetação favorece a agregação das partículas e, portanto, reduzem a suscetibilidade da área aos processos erosivos.

Do mesmo modo, os resultados de Santos *et al.* (2015) demonstram que em uma área de solo exposto há maior perda de solo do que em locais com cobertura vegetal morta. Isso acontece devido à cobertura vegetal morta proteger o solo contra o *splash* e permitir uma maior infiltração da água no solo pelos canais das raízes em decomposição, diminuindo assim o escoamento superficial da área.

O estudo realizado por Costa *et al.* (2018) mostra que a mudança na condição natural da cobertura vegetal do solo, juntamente com as ações antrópicas, são as responsáveis pela bacia estudada apresentar um acelerado potencial de erosão, mesmo apresentando um baixo potencial de escoamento superficial. Os autores concluíram também que as mudanças da cobertura vegetal natural para o uso do pastoreio extensivo seguido do cultivo da cana-de-açúcar são as ocupações com maior responsabilidade na causa da erosão.

2.1.1.4 **Características da Superfície do Terreno**

Os fatores relacionados à superfície do terreno que podem ou não acelerar os processos erosivos são a declividade do talude, o comprimento de rampa, a forma da encosta, e a rugosidade. Essas características atuam juntamente com os outros fatores erosivos da chuva e das propriedades do solo e resultam em maior ou menor suscetibilidade à erosão.

Declividades maiores influenciam, acelerando no tempo de formação do escoamento superficial e no desenvolvimento da feição erosiva (FENDRICH *et al.*, 1988; DIAS *et al.*, 2001). XuJiongxin (1996) afirmou que a maior frequência de *benggang erosion* (erosão, geralmente de grande dimensão, em forma de ferradura comum em áreas de granito fortemente desgastadas), na China, de 40 a 50%, estava nas encostas com declividades entre 20° e 30°, seguido por declividades entre 30° e 45°. Isso ocorre, de acordo com o autor, porque inclinações acima de 45° possuem uma área de contribuição de chuva limitada e em áreas com declividade abaixo de 20° as feições não desenvolvem profundidades com grandes dimensões.

Para Minella *et al.* (2010), o comprimento de rampa de um talude é uma dimensão linear a partir de onde ocorre o surgimento da formação do escoamento até onde o escoamento encontra o sistema de drenagem superficial. Enquanto Nearing *et al.* (2017) definem o comprimento de rampa das encostas como a distância entre o início do escoamento superficial até o local onde se começa a deposição dos sedimentos transportados pelo escoamento.

O estudo das formas das encostas também tem importância nos estudos, pois a forma do relevo gera “zonas de convergência e divergência dos fluxos d’água superficiais e subsuperficiais” (DIAS e HERRMANN, 2002).

Existem três tipos principais de formas de taludes: taludes côncavos, convexos e planos. Troeh (1964; 1965) desenvolveu equações matemáticas que descrevem as formas dos taludes combinando mais de uma característica do terreno. O autor descreve, em ambos os trabalhos, as possíveis combinações com formas côncavas e convexas. Na Figura 3, G é definido pelo autor como o gradiente de inclinação (diferença de altitude), enquanto L é definido como a taxa de mudança do gradiente de inclinação em distância radial. A parte inferior da figura ilustra como as quatro possíveis soluções podem ocorrer em uma mesma encosta.

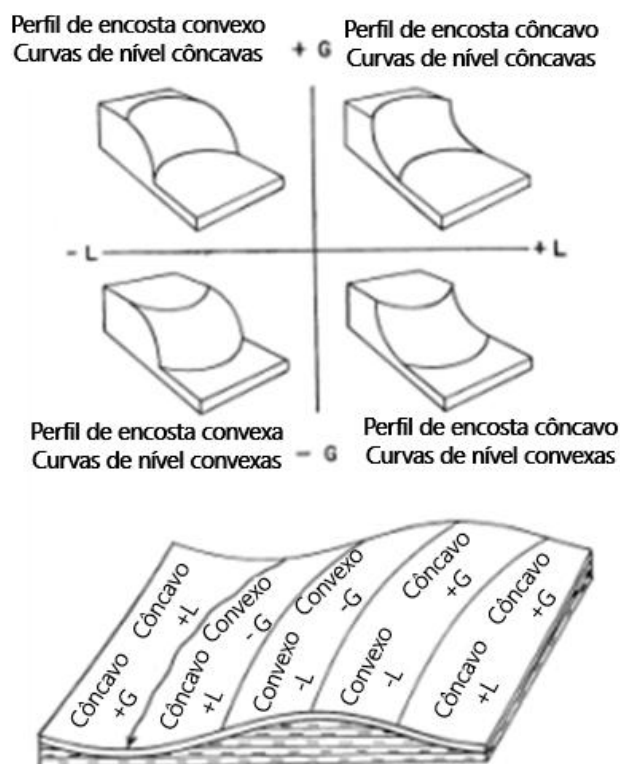


Figura 3: Ilustração de quatro combinações de formas côncavas e convexas em relevos
Fonte: Adaptado de Troeh (1965)

Sabe-se que existem mais combinações de formas nas encostas (plana, convexa-plana, côncava-plana, plana-convexa, plana-côncava), entretanto, pode-se restringir a quantidade de combinações a fim de facilitar a caracterização dos fluxos em todas as configurações, sem danificar os modelos de fluxo (BOOTH e FISCHENICH, 2015).

Conforme levantamento feito por XuJiongxin (1996) no sul da China, 38,4% das feições erosivas da área estudada estão localizadas em formas côncava-côncava, seguido pelas formas linear-convexa e linear-linear, ambas com 17,9%. Isso pode ser explicado porque tanto o comprimento côncavo e a largura côncava causa a concentração do escoamento, aumentando o fluxo de água.

Estudos feitos por Gray (2016) mostram que as formas côncavas possuem maior estabilidade para o maciço e apresentam limitação referente à erosão, pois as encostas estudadas geraram menos sedimentos que as formas uniformes e planas.

O estudo de erosão também deve contemplar a análise da microrrugosidade da superfície do terreno, a fim de mostrar as cavidades em que ocorre o armazenamento de água, que antecede o escoamento superficial (FUREGATTI, 2012). Bertolani *et al.* (2000) atestam que é através da microrrugosidade, também chamada de rugosidade superficial, que se mensura o armazenamento de água nas microdepressões do solo, além de ser

através da rugosidade superficial que se pode acompanhar as alterações que ocorrem no solo pelo impacto das gotas de chuva. A rugosidade também influencia na previsão e no comportamento da geração de sedimentos, no escoamento superficial, no transporte e na formação de crostas na superfície (HELMING *et al.*, 1998; DARBOUX *et al.*, 2002; ZHAO *et al.*, 2018).

A rugosidade pode ser influenciada por vários fatores, sendo eles o volume e intensidade das chuvas, a enxurrada (escoamento superficial), tipo de solo, estabilidade dos agregados, densidade e porosidade, dentre outros (SIQUEIRA *et al.*, 2012). Alguns fatores, como a chuva e o vento, suavizam a superfície, e outros, como o uso e preparo do solo, aumentam a rugosidade do solo (BAUER *et al.*, 2015).

A rugosidade é separada em dois tipos quando é estudada em perspectiva micro: a rugosidade orientada e a rugosidade randômica (*RR*). Allmaras *et al.* (1966) definem a primeira como um microrrelevo proporcionado artificialmente através de movimentação mecânica e, a outra proveniente de forma natural do terreno que permite identificar o fluxo do escoamento superficial. Os autores propuseram que o índice da rugosidade randômica (*RR*) seja calculado através do produto do desvio padrão das alturas do microrrelevo.

Além do método de Allmaras *et al.* (1966) há inúmeros outros métodos para quantificar e mapear a rugosidade: método cadeia, perfilômetros, ISUM (*Improved Stock Unearthing Method*) (SALEH, 1993; SNAPIR *et al.*, 2014; THOMSEN *et al.*, 2015; ELTNER *et al.*, 2018; RODRIGO-COMINO e Cerdà 2018).

A rugosidade randômica está diretamente relacionada à capacidade máxima de armazenamento de água na superfície do solo (*Maximum Depressional Storage – MDS*). O *MDS* é determinado, pois juntamente com dados de infiltração do solo, é possível determinar o início do escoamento superficial, que se inicia quando a chuva extrapola a capacidade máxima de infiltração e/ou a capacidade máxima de armazenamento de água na superfície. O *MDS* é estimado através de uma equação proposta por Onstad (1984), na qual se utiliza do índice de rugosidade randômica (*RR*) e da declividade do terreno (*S*).

2.1.2 **Ação Antrópica**

A intervenção antrópica é um dos fatores com maior capacidade de aceleração dos processos erosivos. As principais ações antrópicas estão correlacionadas com a retirada da cobertura vegetal, manuseio inadequado do solo pela agricultura e pela agropecuária, obras de engenharia mal planejadas, como abertura de valas, estradas e execução de loteamentos.

Nas áreas rurais, o desmatamento para o uso da agricultura abrange extensas áreas, as queimadas desprotegem os solos, monoculturas descaracterizam os ecossistemas e a mecanização compacta o solo, prejudicando a infiltração da água (GUERRA E BOTELHO, 1996).

As queimadas também alteram o modo de interação do solo com a água, deixando-o mais ou menos hidrofóbico. Aliadas à alteração de vertentes pela ação antrópica podem favorecer a evolução de ravinas (MARTINS *et al.*, 2017).

Diferentes coberturas vegetais resultam em diferentes comportamentos dos solos em relação aos processos erosivos. Estudos como o de Pinese Junior *et al.* (2009) ressaltam a importância no cuidado no manejo de usos do solo relacionados a plantios. Na região nordeste do Brasil, o desmatamento e as queimadas, seguidos do preparo do solo e uso de agrotóxicos, são técnicas praticadas pelos agricultores que mais causam impactos negativos no solo da região, como a erosão e a lixiviação (SILVA *et al.*, 2015).

Gomes *et al.* (2018) apontaram que as atividades antrópicas, como agricultura, pastagem, áreas urbanas e carcinicultura, devido às suas ações constantes, são as principais causadoras da erosão costeira na área estudada, no Rio Grande do Norte.

Obras de engenharia também podem contribuir com a aceleração da formação e evolução de feições erosivas, como são os casos de construções de estradas (REID e DUNE, 1996; NYSSSEN *et al.*, 2002; DOUGLAS e PIETRONIRO, 2003; EZEZIKA e ADETONA, 2011). Já as principais causas do surgimento e evolução da erosão urbana são o traçado inadequado dos sistemas viário, a ineficiência do sistema de drenagem de águas pluviais e a expansão urbana rápida e descontrolada (IPT, 1989; BITAR, 1990). Mendonça (1993) afirma que, na área urbana de Paranavaí/PR, o surgimento e o crescimento acelerado dos sulcos deram-se pela concentração das águas pluviais nos locais altamente impermeabilizados onde não haviam dispositivos que possibilitassem a dispersão da energia liberada no movimento do escoamento superficial.

2.2 Análise Multivariada

A análise multivariada é uma divisão da estatística que analisa simultaneamente diversas variáveis em um mesmo elemento amostral, enquanto a estatística convencional analisa uma única variável em cada elemento amostral.

Existem vários métodos estatísticos utilizados na estatística multivariada que são utilizados de acordo com a finalidade e com o conjunto de dados disponíveis. Podem ser divididos em dois grandes grupos: o de inferência estatística, e o de técnicas exploratórias de sintetização do conjunto de dados. Fazem parte do primeiro grupo os *testes de hipóteses, análise de variância, de covariância e de regressão multivariada*. Do segundo grupo fazem parte a *análise de correspondência, análise discriminante, análise de agrupamento, análise de correlação canônica, análise fatorial e análise de componentes principais*.

Diferente da estatística convencional, que possui cálculos relativamente simples, a análise multivariada necessita, geralmente, de programas computacionais para o desenvolvimento dos métodos. Isso fez com que a expansão do uso da análise multivariada acompanhasse o avanço dos softwares estatísticos e da tecnologia computacional (MINGOTI, 2005). A análise multivariada começou a ser utilizada principalmente nas áreas de Psicologia, Ciências Sociais e Biologia, porém, devido a essa expansão, atualmente, tem sido aplicada em diversas áreas, como na Educação, Geologia, Química, Física, Engenharias e Ergonomia (MINGOTI 2005).

Bueno *et al.* (2010), por exemplo, utilizaram a análise multivariada para discriminar os riscos de erosão dos solos em diferentes classes de solos, relevo, uso e manejo. Para isso levantaram em 59 amostras alguns parâmetros que estão correlacionados com a erosão, entre eles a textura do solo através do método da Pipeta e o teor de matéria orgânica, além dos parâmetros da Equação Universal da Perda de Solo (*E.U.P.S*): declividade e extensão da vertente (relacionado a topografia do local, chamado de *LS*), uso e manejo do solo (*C*), práticas conservacionistas (*P*), erosividade da chuva (*R*) e erodibilidade do solo (*K*). Com os parâmetros levantados, os autores calcularam a perda de solo (*A*), a expectativa de erosão (*EE*) e o potencial natural de erosão (*PNE*). Utilizaram então da técnica de *análise de agrupamentos* e de *componentes principais* para separar as amostras em grupos com diferentes expectativas de perdas de solo de acordo com os parâmetros *K*, *LS*, *C*, *P* e *R*. Com as mesmas técnicas multivariadas, porém com os dados *A*, *PNE*, *EE*, *LS* e *C*, identificaram os locais com maiores riscos de erosão.

Miqueloni e Bueno (2011) também se utilizaram da *análise de agrupamento* e de *componentes principais* em seu estudo. Calcularam a erodibilidade em função da textura do solo e analisaram a variabilidade espacial das variáveis granulométricas ao longo do relevo. Para isso coletaram 239 amostras em uma área de 1540 ha. Em cada amostra foi realizado uma análise granulométrica, pelo método da pipeta, quantificado o teor de

matéria orgânica pelo método calorimétrico e estimado a erodibilidade. Com esses três parâmetros para cada amostra foi aplicado o método da *análise de agrupamento* com o objetivo de encontrar um padrão no conjunto dos dados, a fim de agrupá-los de acordo com a semelhança em cada amostra. Posteriormente foi aplicado o método dos *componentes principais* para auxiliar na análise do poder discriminatório dos fatores de perda de solo em cada componente principal e, com isso, os autores concluíram que a análise multivariada foi indispensável na compreensão do comportamento da erodibilidade do solo em relação à granulometria e ao relevo.

O método de *análise de agrupamento*, também chamado de *Cluster*, utilizado no trabalho de Miqueloni e Bueno (2011) e de Bueno *et al.* (2010) é um método que tem como principal objetivo dividir os elementos da amostra em grupos fazendo com que os elementos presentes no mesmo grupo sejam o mais semelhantes possível e os elementos de grupos distintos sejam o mais heterogêneos possível. Para isso, o critério utilizado no método é criar vetores para cada elemento amostral através do armazenamento das suas *p-variáveis*. A distinção entre os grupos se dá pela distância que os vetores possuem entre si (MINGOTI, 2005; HAIR *et al.*, 2014).

A outra técnica utilizada pelos autores citados foi a *Análise de Componentes Principais (PCA)*, a qual foi introduzida por Karl Pearson em 1901 e consolidada por Hotelling em 1933, e tem como principal objetivo diminuir o espaço paramétrico, a fim de facilitar a interpretação das *p-variáveis* (MINGOTI, 2005).

A técnica da *PCA* permite sintetizar esse conjunto de dados com o surgimento de novos componentes, por meio de uma combinação linear das *p-variáveis*. Essas combinações lineares são as chamadas Componentes Principais (CP) que possuem as informações das *p-variáveis* originais. É importante que as *k* Componentes Principais possuam o máximo de informação possível das variáveis originais, pois só assim é possível garantir a qualidade das CPs (JOHNSON e WICHERN, 2007).

Lima *et al.* (2014) também utilizaram a estatística multivariada para avaliar a espacialização do potencial natural da erosão em uma microbacia no leste da Paraíba. Os autores levantaram os parâmetros da E.U.P.S. com o auxílio do SIG, dentre eles erodibilidade, erosividade, declividade e extensão de vertente, uso e manejo do solo e as práticas conservacionistas. Como resultado calcularam a perda de solo com o auxílio da E.U.P.S e geraram um índice aplicando os mesmos parâmetros no método da *análise fatorial*, chegando em valores compatíveis entre ambos os índices.

A *análise fatorial* é outro método da estatística multivariada que tem o objetivo de descrever a variabilidade do vetor aleatório, com um número menor de variáveis aleatórias, chamadas de fatores comuns. Essa variabilidade é descrita por parte dos fatores comuns e o restante das variáveis não utilizadas no modelo é chamado de erro aleatório. Esse componente residual é uma das diferenças entre a *análise fatorial* e a *PCA* que não possui esse componente. Outro objetivo da *análise fatorial* é de identificar um número menor de novas variáveis alternativas, não correlacionadas, capazes de simplificar as variáveis ortogonais (MINGOTI, 2005; JOHSON e WICHERN, 2007).

A *análise fatorial* também se difere da *análise de agrupamentos* devido à primeira realizar o agrupamento dos elementos baseados em padrões de variações (correlação) e a segunda ser com base na distância entre os vetores, como explicado anteriormente (HAIR *et al.*, 2014). Esse método multivariado é dividido em *análise fatorial exploratória* e *análise fatorial confirmatória*. O primeiro tem a função de encontrar os fatores implícitos às variáveis originais para então determinar o modelo fatorial. Nesse caso não se tem o conhecimento do quanto cada variável influencia no modelo e nem quantos fatores fazem parte do modelo. Já a *análise fatorial confirmatória*, como o nome diz, tem a função de confirmar um modelo fatorial pré-especificado, tendo como objetivo apenas a verificação do modelo em relação aos dados que a amostra possui (MINGOTI, 2005).

Em relação ao espaço amostral da *análise fatorial* alguns autores se divergem quando se trata do tamanho do banco de dados. Gorusch (1983) indica que o conjunto amostral da *análise fatorial* deve possuir pelo menos 200 observações, com uma relação de 5 observações por variável para se obter um resultado confiável. Crocker e Algina (1986) sugerem um mínimo de 100 observações, tendo como regra geral uma relação de 10 observações por variável. Entretanto, Guadagnoli e Velicer (1988) afirmam que não há nenhuma base teórica ou empírica que comprove e exija uma relação mínima entre o número de observações e variáveis. Na mesma linha Wolins (1995) também afirma não existir nenhuma regra para essa relação. Segundo o autor, não se deve presumir que os bancos de dados com um grande número de variáveis requerem amostras maiores do que os bancos de dados com menos variáveis. Osborne e Costello (2004) asseguram que, apesar de não haver um acordo em relação ao tamanho da amostra, os melhores resultados ocorrem em análises com banco de dados maiores.

Gajbhiye *et al.* (2015) fizeram uso da *análise fatorial*, extraindo cargas fatoriais pelo método das componentes principais, utilizando-se de um banco de dados de dimensão 8×14 . Os autores desenvolveram índices geomorfológicos de erosão da bacia de Shakkar,

na Índia, porém apenas com parâmetros relacionados a uma bacia hidrográfica. Levantaram, ao todo, 14 parâmetros da bacia, dentre os quais se incluem: relevo, densidade de drenagem, razão de bifurcação, fator de forma, frequência de drenagem, textura de drenagem. Com a utilização do método chegaram a um valor de índice que pode auxiliar na gestão sustentável dos recursos hídricos da região e concluíram que a frequência de drenagem, fator de forma e razão de bifurcação são os parâmetros que mais influenciaram no índice obtido.

A seguir estão descritos mais detalhadamente os trabalhos de Miqueloni e Bueno (2011), de Gajbhiye *et al.* (2015) e de Santos *et al.* (2018) para um melhor entendimento da análise multivariada quando relacionadas a fatores erosivos, uma vez que o desenvolvimento da pesquisa se baseou nestes três trabalhos.

2.2.1 Miqueloni e Bueno (2011)

O trabalho de Miqueloni e Bueno (2011) objetivou estimar a erodibilidade e analisar a variabilidade espacial das variáveis granulométricas ao longo do relevo com o auxílio da multivariada em uma área de nascentes da micro bacia do Córrego do Tijuco, Monte Alto -SP.

Foram coletadas 239 amostras em uma área de nascentes de uma microbacia de solo georreferenciadas, onde foram determinados a composição granulométrica (argila, silte, areia grossa - A.G., areia média – A. M., areia fina – A.F. e areia muito fina – A.M.F.) e a quantidade de matéria orgânica (M.O.) de cada amostra, pelos métodos da pipeta e método colorimétrico, respectivamente. Com esses dados, foi então calculado o fator K (erodibilidade) para cada amostra.

Com os dados gerados, o autores utilizaram a estatística descritiva (Tabela 1) para um tratamento inicial. Calcularam média, mediana, desvio padrão (S), variância (VAR), coeficiente de variação (CV) e de assimetria (CA), curtose (CR) e teste de normalidade de Kolmogov-Smirnov (KS).

A fim de encontrar um padrão nos dados e agrupá-los de acordo com as semelhanças nos dados para cada amostra, foi utilizada a *técnica de análise de agrupamento*, a qual formou cinco grupos distintos caracterizados pelos diferentes teores das variáveis granulométricas e pela sua distribuição ao longo do relevo.

Tabela 1: Resultados da estatística descritiva realizada por Miqueloni e Bueno (2011)

Variável	Média	Mediana	S	Var	CV	CA	CR	KS
Argila	13,44	12,40	5,41	29,22	40,21	1,00	1,50	0,095
Silte	5,82	5,20	3,02	9,11	51,86	2,93	14,45	0,135
M.O.	0,90	0,79	0,49	0,24	54,84	2,01	6,98	0,131
A.G.	1,96	1,80	1,31	1,71	66,53	1,45	3,35	0,093
A.M.	18,43	18,00	5,52	30,46	29,94	0,44	0,66	0,066
A.F.	41,89	42,00	5,76	33,13	13,74	-0,70	2,29	0,062
A.M.F.	18,54	18,30	4,64	21,52	25,02	0,10	-0,01	0,039
Fator K	0,04	0,02	0,05	4,75E7	146,06	6,01	44,53	0,230

Fonte: Miqueloni e Bueno (2011)

Devido à dificuldade de se analisar cinco fatores simultaneamente, os autores usaram a técnica de *análise de componentes principais (PCA)* com o intuito de visualizar a distribuição dos fatores no plano bidimensional, formado pelos componentes principais. Utilizaram a matriz de correlação dos dados originais como a matriz de variância e covariância, devido à grande variabilidade entre as variáveis. Com a matriz de correlação foram calculados os autovalores, λ_j , e os autovetores, v_j , dos componentes principais, através da decomposição espectral. Com os autovalores, calcularam a variabilidade total do conjunto amostral pela Equação 2 e a proporção da variância total, explicada por cada componente principal pela Equação (3).

$$TR(S) = \sum_{j=1}^p \lambda_j = s_{11} + s_{22} + \dots + s_{pp} \quad (2)$$

$$TR\%(S) = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} * 100\% \quad (3)$$

Na Tabela 2 são mostrados os autovalores gerados da matriz de covariância, a variância de cada componente principal (CP) e a variância acumulada dos sete primeiros componentes obtidos pelos autores. Enquanto na Tabela 3 são mostrados os autovetores dos quatro primeiros CPs que juntos representaram 87,42% da variabilidade do espaço amostral.

Os autovetores da CP1 mostraram que o quanto maior o fator k (erodibilidade) menor a quantidade de A.M. (areia média), devido à correlação inversa apresentada pelos autovetores, e maior a quantidade de silte e areia muito fina (A.M.F), devido à correlação direta. A primeira correlação mostra que há um transporte seletivo de partículas, enquanto que a segunda mostra que o processo erosivo acontece principalmente pelo transporte e desprendimento das partículas menores.

Tabela 2: Correlação das variáveis e dos componentes principais de Miqueloni e Bueno (2011)

Componentes Principais (CP)	Autovalores	Variância Total (%)	Autovalores Acumulados	Variância Acumulada (%)
1	2,513	35,90	2,513	35,90
2	1,644	23,48	4,157	59,38
3	1,060	15,14	5,217	74,53
4	0,903	12,89	6,119	87,42
5	0,635	9,07	6,755	96,49
6	0,174	2,49	6,920	98,98
7	0,071	1,02	7,000	100,00

Fonte: Adaptado de Miqueloni e Bueno (2011)

Na CP2, a correlação inversa do fator k com a areia fina e a correlação direta com a areia grossa indica uma baixa coesão entre as partículas. Na CP3 a correlação inversa do fator k com a argila indica a maior agregação do solo, uma vez que quanto maior a erodibilidade do solo menor é o teor de argila. Na CP4 a correlação inversa entre o fator k com a areia muito fina acontece nas maiores costas do relevo, em locais com acúmulo de sedimentos.

Tabela 3: Autovetores das quatro primeiras CP de Miqueloni e Bueno (2011)

Variável	CP1	CP2	CP3	CP4
Argila	0,580	-0,360	0,659	-0,180
Silte	0,602	-0,136	-0,285	-0,458
M.O.	0,378	-0,435	-0,558	-0,342
A.G.	-0,476	-0,755	-0,254	0,251
A.M.	-0,891	-0,355	-0,002	-0,090
A.F.	-0,444	0,761	-0,234	-0,298
A.M.F.	0,673	0,175	-0,337	0,619
Fator K	0,559	-0,156	-0,243	-0,471

Fonte: Adaptado de Miqueloni e Bueno (2011)

Os autores, então, calcularam os escores de cada CP de cada amostra, pela razão entre os autovetores e a raiz quadrada dos autovalores correspondentes. Os escores foram utilizados para avaliar a dependência espacial entre as amostras para cada componente principal através de semivariogramas, uma ferramenta da geoestatística utilizada para representar a continuidade espacial de uma função aleatória na direção de um vetor e de isolinhas gerados por krigagem.

2.2.2 Gajbhiye *et al.* (2015)

Gajbhiye *et al.* (2015) desenvolveram um índice geomorfológico utilizando *análise fatorial* da bacia hidrográfica do Rio Shakkar, na Índia, de 2.220 km² de área. Inicialmente os autores a subdividiram em oito sub-bacias, a fim de levantar uma amostra por sub-bacia

e determinaram 14 parâmetros em cada uma delas (Tabela 4), totalizando 8 amostras. Com esses dados, foi feita a matriz de correlação dos parâmetros e aplicado a *análise de componentes principais* para se determinar os autovalores e com isso a proporção da variância total explicada por cada componente principal (Tabela 5).

Tabela 4: Parâmetros Geomorfológicos das sub-bacias de Shakkar

Bacia	R _h	R _r	R _n	R _b	D _d	F _s	R _c	R _f	R _e	T	L _o	C _c	S _a	HI
SH1	0,012	0,002	0,147	3,490	3,673	8,232	0,403	0,794	0,972	4,464	0,136	0,126	6,036	0,471
SH2	0,007	0,001	0,203	3,553	3,383	7,315	0,283	0,468	0,772	6,739	0,148	0,048	4,099	0,508
SH3	0,030	0,008	1,682	3,735	2,845	6,614	0,281	0,351	0,669	10,516	0,176	0,021	10,085	0,501
SH4	0,014	0,003	1,896	4,302	3,101	7,085	0,231	0,291	0,609	22,197	0,161	0,007	9,803	0,497
SH5	0,023	0,007	1,659	4,177	3,071	7,496	0,356	0,284	0,602	15,815	0,163	0,015	11,670	0,483
SH6	0,016	0,004	1,865	5,524	3,161	7,177	0,325	0,427	0,738	27,738	0,158	0,006	9,329	0,488
SH7	0,017	0,005	2,483	4,929	3,100	7,235	0,179	0,174	0,471	16,845	0,161	0,009	14,818	0,491
SH8	0,023	0,004	1,825	4,753	3,147	7,649	0,290	0,623	0,891	23,088	0,159	0,008	13,071	0,497

Legenda: SH: Sub-bacia Hidrográfica; R_h: razão de relevo; R_r: Relevo relativo; R_b: razão de bifurcação; D_d: densidade de drenagem; F_s: frequência de fluxo; R_c: relação de circularidade; R_f: fator de forma; R_e: relação de alongação; T: textura de drenagem; L_o: comprimento de fluxo; C_c: constante de compacidade; S_a:

declividade média da bacia; e HI: integral hipsométrica.

Fonte: Adaptado de Gajbhiye *et al.* (2015)

Tabela 5: Variância total explicada por cada componente principal

Componente	Autovalores	Variância Total (%)	Variância Acumulada (%)
1	8,166	58,325	58,325
2	2,098	14,987	73,312
3	1,966	14,045	87,358
4	0,987	7,053	94,411
5	0,516	3,685	98,096
6	0,177	1,268	99,364
7	0,089	0,636	100,00
8	4,104E-16	2,931E-15	100,00
9	1,512E-16	1,080E-15	100,00
10	1,334E-16	9,529E-16	100,00
11	2,624E-17	1,875E-16	100,00
12	-9,650E-17	-6,893E-16	100,00
13	-3,095E-16	-2,211E-15	100,00
14	-4,655E-16	-3,325E-15	100,00

Fonte: Adaptado de Gajbhiye *et al.* (2015)

Para uma melhor explicação dos resultados, os autores escolheram utilizar a técnica da *análise fatorial* com rotação ortogonal do tipo varimax, o qual rotaciona o componente principal em um espaço quadrimensional de maneira a maximizar as cargas de cada *loadings* em apenas uma das quatro direções (Tabela 6).

Tabela 6: Matriz rotacionada Varimax

	Componente		
	1	2	3
R _h	-0,10	0,964	0,117
R_r	-0,132	0,970	0,127
R _N	-0,366	0,476	0,781
R_b	-0,069	0,012	0,951
D _d	0,604	-0,721	-0,304
F_s	0,836	-0,412	-0,046
RC	0,816	0,053	-0,355
Rf	0,754	-0,317	-0,334
Re	0,714	-0,305	-0,350
T	-0,144	0,075	0,900
Lo	-0,578	0,767	0,233
CC	0,634	-0,338	-0,626
Sa	-0,115	0,535	0,719
HI	-0,808	-0,57	-0,143

Fonte: Adaptado de Gajbhiye *et al.* (2015)

Para determinar o valor do índice para cada feição, os autores utilizaram a seguinte Equação (4) como base:

$$GI(Shakkar) = \frac{(P_1 * W_{P1}) * (P_2 * W_{P2}) * ... * (P_n * W_{Pn})}{(Q_1 * W_{Q1}) * (Q_2 * W_{Q2}) * ... * (Q_n * W_{Qn})} * 100\% \quad (4)$$

Em que: P₁, P₂, ..., P_n são os parâmetros morfométricos diretamente proporcional a erosão do solo; W_{P1}, W_{P2}, ..., W_{Pn} são os pesos dos correspondentes parâmetros; Q₁, Q₂, ..., Q_n são os parâmetros morfométricos indiretamente proporcional a erosão do solo; W_{Q1}, W_{Q2}, ..., W_{Qn} são os pesos dos correspondentes parâmetros.

Ao aplicar a equação no estudo, os autores chegaram à equação (5), usando o fator de maior importância na componente 1 (F_s), de maior importância na componente 2 (R_r) e de maior importância na componente 3 (R_b) (destacados na Tabela 6), com os seus respectivos pesos.

$$GI(Shakkar) = (F_s * W_{F_s}) * (R_r * W_{R_r}) * (R_b * W_{R_b}) * 100\% \quad (5)$$

Os pesos foram calculados em função da importância do fator dentro da sua determinada componente principal. Para isso, multiplicou-se o valor da variância da CP determinada, pelo valor do fator rotacionado ao quadrado, obtido na Tabela 6.

2.2.3 Santos *et al.* (2018)

Os autores determinaram 15 variáveis em duas áreas com escalas distintas, em 239 eventos de chuvas que ocorreram entre os anos de 2009 a 2014. Entre as variáveis estavam dados dos eventos de chuva, do escoamento superficial e da geração de sedimentos.

Os autores aplicaram o teste de KMO (*Kaiser Mater Olkim*) para verificar a adequabilidade da base de dados para utilizar a *análise fatorial*, pois $KMO < 0,5$ indica que o modelo não pode ser aplicado na base de dados e que quanto mais perto de 1,0 melhor é a base de dados (HAIR *et al.*, 2014).

Para determinar a quantidade de componentes extraídas, os autores utilizaram a regra de Kaiser, que afirma que devem ser extraídos apenas os fatores com autovalor acima de 1,0. Com isso, foram escolhidas 3 CPs, que possuíam os autovalores de 9,05; 1,87 e 1,23 para a escala de bacia e 7,86; 2,06 e 1,24 para a escala da parcela de erosão (Tabela 7). Esses autovalores explicaram juntos 80,97% da variabilidade dos dados para a escala de bacia e 79,72% para a escala de parcela de erosão. Também pela dificuldade na análise dos dados, os autores utilizaram do método de rotação ortogonal Varimax e analisaram as variáveis com maior importância em cada componente principal.

Na CP1, em ambas as escalas, os parâmetros que tiveram mais destaques foram os relacionados à intensidade de chuva. Apesar de estudos indicarem o I30 (máxima intensidade em 30 mm) como a intensidade que merece uma maior atenção nos estudos de erosão, essa componente indicou que a I20 (máxima intensidade em 20 mm) é a intensidade com maior destaque. Os parâmetros de maior influência na CP2 são Q_{max} (pico de fluxo), RD (profundidade do escoamento) e SY (sedimento gerado), todos relacionados à energia de transporte de sedimentos, o que é aceitável, uma vez que nas regiões semiáridas brasileiras o SY (sedimento gerado) é limitado pelas condições de transportes e não pela disponibilidade de material erodido. Na CP3 as cargas altas de AMS (umidade antecedente do solo com base na massa), CDD (dias consecutivos de chuva) para a escala de bacia, e de PPT5 (precipitação do antecedente de 5 dias) para a escala de parcela, indicam que a componente está relacionada ao teor de água no solo. As condições de umedecimento do solo afetam o potencial de infiltração instantânea de água o que pode gerar um maior ou menor fluxo de escoamento de água e, conseqüentemente, a geração de energia para o transporte de sedimentos.

Tabela 7: Autovalores e matriz da carga fatorial das variáveis dos CPs após rotação varimax

Variáveis	Bacia			Parcela de erosão		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
I20	0,969	0,187	0,034	0,988	0,071	0,041
I15	0,960	0,192	-0,032	0,973	0,073	0,049
I30	0,954	0,223	0,085	0,967	0,087	0,157
I10	0,943	0,140	-0,78	0,954	0,046	-0,006
I5	0,920	0,017	-0,093	0,933	0,016	-0,048
I45	0,910	0,248	0,109	0,884	0,125	0,287
I60	0,898	0,226	0,170	0,813	0,113	0,318
EI30	0,814	0,374	0,273	0,804	0,424	0,082
PPT	0,639	0,493	0,335	0,579	0,315	0,348
RD	0,535	0,761	0,114	0,472	0,692	0,337
SY	0,494	0,726	0,113	0,113	0,939	-0,065
Q _{MAX}	0,293	0,714	-0,177	-	-	-
PPT5	-0,299	0,568	-404	-0,177	-0,093	0,911
AMS	0,127	-0,128	-0,750	0,132	-0,031	0,218
CDD	0,175	-0,337	0,662	-0,101	-0,779	-0,420
Autovalores	9,05	1,87	1,23	7,86	2,06	1,24
Variância (%)	53,11	18,04	9,82	52,44	16,47	10,81
Variância acumulada (%)	53,11	71,15	80,97	52,44	68,91	79,72

Legenda: I20: máxima intensidade em 20 mm (mm h^{-1}); I15 máxima intensidade em 15 min (mm h^{-1}); I30: máxima intensidade em 30 min (mm h^{-1}); I10: máxima intensidade em 10 min (mm h^{-1}); I5: máxima intensidade em 5 min (mm h^{-1}); I45: máxima intensidade em 45 min (mm h^{-1}); I60: máxima intensidade em 60 min (mm h^{-1}); EI30: Erosividade da chuva ($\text{MJ mm há}^{-1} \text{h}^{-1}$); PPT: precipitação (mm); RD: profundidade do escoamento (mm); SY: Sedimento gerado (kg ha^{-1}); Qmax: pico de fluxo (Ls^{-1}); PPT5: precipitação do antecedente cinco dias (mm); AMS: umidade antecedente do solo com base na massa (%); CDD: Dias consecutivos de chuva

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2018)

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo está descrita a metodologia utilizada no estudo, o qual foi dividido em cinco etapas:

- Primeira etapa: é apresentada a área de estudo;
- Segunda etapa: é descrita a metodologia que foi utilizada para realizar a espacialização das feições erosivas existentes na área urbana no município;
- Terceira etapa: é descrita a metodologia que foi utilizada para realizar a classificação das feições erosivas existentes na área urbana no município;
- Quarta etapa: compreende as metodologias utilizadas para determinar os fatores influenciadores das feições erosivas.
- Quinta etapa: compreende a descrição dos dois métodos para determinar os índices de erosão do município de São Manuel – SP e a escolha do método mais adequado

A primeira e a segunda etapa foram realizadas com o intuito de conhecer a área do município estudada e as feições erosivas existentes para que fosse possível classificá-las na terceira etapa. A quarta etapa foi realizada a fim de levantar os parâmetros que foram utilizados na quinta etapa. Para analisar os métodos e, conseqüentemente, escolher o mais eficiente (na quinta etapa), foi utilizada a espacialização das feições (segunda etapa), uma vez que escolha do melhor método embasou-se na observação de diferentes mapas. É importante ressaltar que todos os mapas utilizados e gerados na plataforma SIG, de todas as etapas, estão no datum WGS84 com projeção UTM, no fuso 22 Sul.

3.1 Área de Estudo

A área de estudo compreendeu na área urbana do município de São Manuel (SP), a qual está localizada no centro-oeste paulista (Figura 4), coordenadas UTM: Fuso 22S, E 749.454,27m, N 7.483.893,98m, a uma altitude de 700 metros, a 268 km da capital. Todo o território possui população estimada em 40 mil habitantes e 650,734 km² de área (SECRETARIA DE ESTADO DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS, 2017).

O município está inserido em três UGRHIs (Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos) diferentes, sendo a área urbana situada na UGRHI 13: Tietê – Jacaré e a área rural na UGRHI 10: Médio Tietê - Sorocaba e na UGRHI 17: Médio Paranapanema.

O território municipal está inserido em 7 Sub Bacias: Rio Paraíso, Córrego da Igualdade, Córrego Santo Antônio, Ribeirão Paraíso, Córrego Água da Conquista, Córrego Água da Rosa e Afluente do Córrego do Bonfim. Os solos argilosos do município estão associados à Formação Serra Geral e os solos arenosos se apresentam na Formação Adamantina e Formação Botucatu (RIDENTE JR *et al.*, 2001).

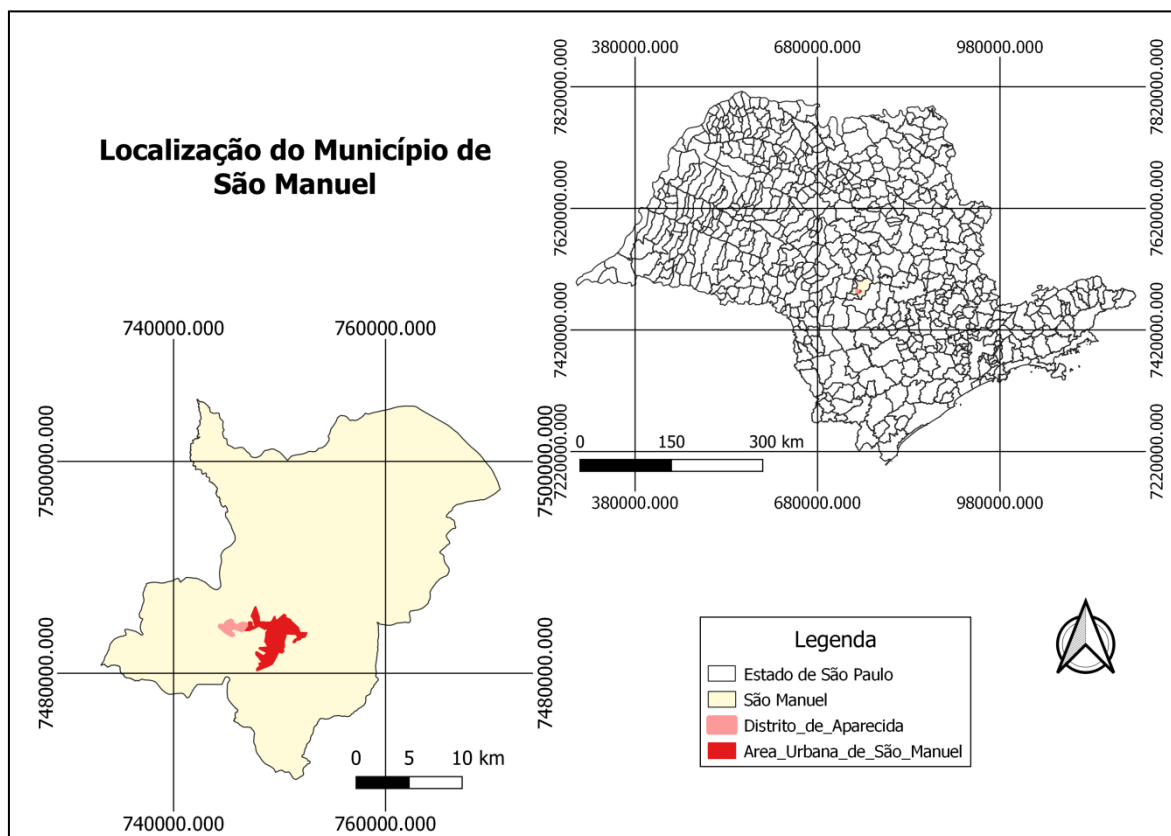


Figura 4. Localização do município de São Manuel dentro do estado de São Paulo no Brasil

O clima predominante na região é o tropical de altitude, com chuvas predominantes no verão e com os meses de junho/julho/agosto sendo os mais secos e frios. A temperatura média anual é de 20,8° e a precipitação média anual é de 1465 mm (RIDENTE JR *et al.*, 2001).

3.2 Espacialização das Feições Erosivas

A análise de processos, ou desenvolvimento de feições erosivas requer a espacialização de sua ocorrência. Para isso, partindo de um levantamento dos pontos críticos do sistema de drenagem da cidade, realizado para compor o Plano Municipal de Saneamento de São Manuel, foi possível identificar as feições erosivas existentes na área urbana, e arredores de São Manuel, até o ano de 2016 (SECRETARIA DE ESTADO DE SANEAMENTO E RECURSOS HIDRICOS, 2017). A Figura 5 mostra a espacialização e a Tabela 8 descreve cada ponto levantado no plano.

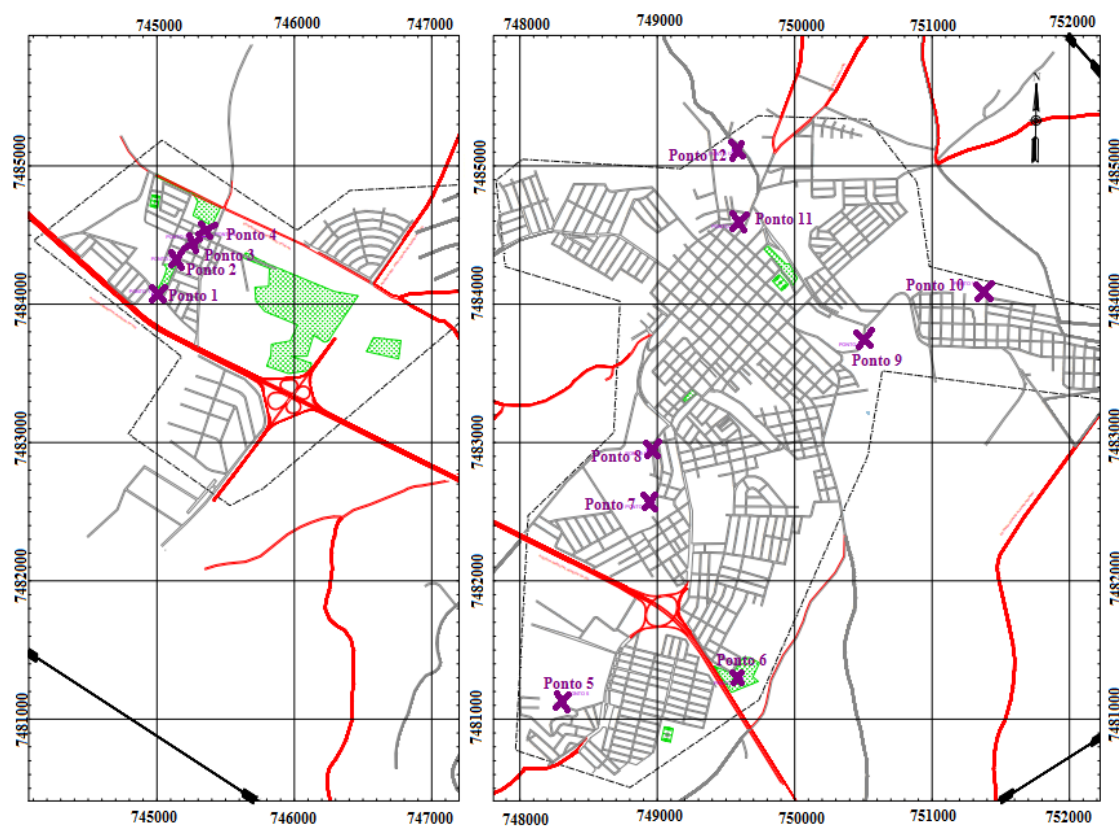


Figura 5. Localização prévia dos pontos críticos do sistema de drenagem existentes na área urbana de São Manuel.

Fonte: Adaptado de Secretaria de Estado de Saneamento e Recursos Hídricos (2017).

De acordo com a Tabela 8, dos doze pontos críticos listados, quatro (1, 2, 3 e 4) correspondem a problemas de alagamento e de galerias de drenagem insuficientes, e oito (pontos 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12) correspondem à existência de feições erosivas. Depois desse levantamento prévio, foram realizadas entrevistas com os moradores locais. Foi, então, possível identificar e levantar mais uma feição que não estava localizada no levantamento da Secretaria do Estado de Saneamento e Recursos Hídricos. Com isso, totalizaram 9 locais com feições que foram utilizadas no estudo e consequentemente espacializadas (ponto 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 mais uma não contabilizada inicialmente).

Tabela 8. Pontos críticos levantados no Plano Municipal de Saneamento Básico

Ponto	Local	Problema detectado
1	Distrito de Aparecida	Alagamento
2, 3, 4	Margem do Córrego Sto. Antônio – Distrito de Aparecida	Galerias de drenagem insuficientes
5, 6, 7, 9, 10, 11, 12	Área Urbana de São Manuel	Erosão
8	Área Urbana de São Manuel	Erosão e obstrução de galerias.

Conhecidas as feições, foi realizada uma campanha de campo com o intuito de conhecer e levantar pontos estáticos na cabeceira de cada feição erosiva com o auxílio de um GPS de precisão modelo GTRA GTR1 da TechGeo.

Posteriormente, os dados do GPS foram descarregados com o software Útil 2.19.4.11, processado no EZSurv 2.4, visualizado e adaptado para o formato *.dwg* no Graphics 2.30 para posterior utilização na plataforma SIG. Para reorganizar os dados que foram utilizados neste trabalho, as feições foram renomeadas de acordo com a Tabela 9 e a espacialização foi consolidada no QGIS Desktop 3.4.14 utilizando como base imagens de satélite do Google Earth. Nota-se que a feição 10 foi subdivida em duas, 6 e 6A. Isso ocorreu devido a parte da feição estar estabilizada (feição nomeada em 6) e apenas um braço da feição estar em crescimento (6A).

Tabela 9. Renomeação das feições erosivas

Nomenclatura das feições levantadas no Plano Municipal de Saneamento Básico	Nova nomenclatura das feições.
5	1
6	2
7	3
8	4
9	5
10	6 e 6A
11	7
12	8

3.3 Classificação das Feições Erosivas

A classificação das feições erosivas especializadas baseou-se nos fundamentos apresentados por Foster (1986), Brito *et al.* (1998), Iwasa e Fendrich (1998), Karmann (2000), Camapum de Carvalho *et al.* (2006), e Salomão (2012). Buscou-se definir se as feições se encaixariam melhor como sulcos, ravinas, voçorocas, ou erosão de margem de curso d'água.

Para classificá-las foram realizadas visitas aos locais para analisar o entorno das feições, e verificar a existência de ruas asfaltadas e a presença de galerias para drenagem de águas pluviais. Além de verificar também, a presença de cobertura vegetal e o estado de conservação no entorno e o interior de cada feição.

Ao final do período chuvoso também foi observado se havia presença de água no interior de cada feição, seja empoçada, ou em forma de fluxo. Em locais em que possuía água no interior das feições, foi utilizada a ferramenta SIG para auxiliar na identificação de possíveis afloramentos do lençol freático de córregos existentes. Para isso, foram sobrepostos o mapa gerado da espacialização das feições com dados da hidrografia do município disponível no catálogo de informações ambientais DATAGEO do Sistema Ambiental Paulista.

Por fim se observou a estabilidade da feição entre os anos de 2008 a 2018 através de imagens aéreas do Google Earth. Conjuntamente identificou o processo desencadeador da referida feição, através das fotos aéreas, entrevistas aos moradores e sobreposição dos mapas hidrológicos.

Todas essas observações (existência de asfalto e de galerias de drenagem, afloramento de lençol freático e existência de corpo d'água, características da vegetação, estabilização da feição, processo desencadeador) foram sintetizadas em uma tabela única, segundo Pascoto *et al.* (2018).

3.4 Determinação dos Fatores de Influência nos Processos Erosivos

Neste subitem, está descrita a metodologia utilizada para determinar os fatores influenciadores nos processos erosivos, que foram considerados na determinação dos índices de erosão. Foram obtidos valores da declividade da superfície, textura, permeabilidade, erodibilidade, pluviosidade (devido à inviabilidade de determinar a erosividade da chuva) e uso e ocupação do solo. A escolha dos fatores determinados no trabalho foi embasada nos fatores presente na USLE.

3.4.1 Declividade da Superfície

Elaborou-se um mapa de declividade, utilizando cartas topográfica, em escala de 1:10.000, do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) do Banco de dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA). A folha utilizada que compreende o município de São Manuel é a 22_495 (INPE, 2018).

O arquivo é do tipo *Raster*, possuindo o *datum* WGS84 de referência e com projeção Lat/long. Entretanto, foi necessário converter o sistema de coordenadas geográficas para UTM a fim de gerar o mapa de declividade. Para isso se utilizou o comando “reprojetar coordenadas” e como sistema de referência de coordenadas (SRC) selecionou-se EPSG: 31722 (WGS84/UTM Zona 22S).

Como o arquivo compreende toda a região de São Manuel, incluindo as cidades vizinhas, foi necessário recortar o *raster* por uma camada de máscara. A camada de máscara utilizada foi o mapa do município de São Manuel, o qual foi recortado do Mapa dos municípios de São Paulo que foi obtido do IBGE, rede de infraestrutura de dados espaciais ambientais do Estado de São Paulo. Esse arquivo possuía o SRC original

SIRGAS2000 e projeção lat/long (IBGE, 2018). Para o corte, a camada também foi reprojetada para o SRC WGS84/UTM Zona 22S.

O mapa de declividade, com tamanho de célula (pixel) de 30m aproximadamente, foi obtido utilizando o caminho: *Raster – Análise – Declividade*. O mapa foi, então, formatado com escala de cor, dividido em sete categorias de declividade 0-2%, 2.1-5%, 5.1-10%, 10.1-15%, 15.1-20%, 20.1-30% e acima de 30%, seguindo a mesma classificação de Costa *et al.* (2018).

O valor da declividade adotado para cada feição erosiva foi uma declividade média da área de contribuição da feição. Para isso foram determinadas várias rampas dentro da área de contribuição da feição e determinada a declividade média de cada uma delas. Posteriormente foi feita uma média com todas essas declividades.

3.4.2 ***Caracterização Geotécnica***

Para representar cada feição erosiva, foram retiradas amostras deformadas em duas profundidades distintas, a 0,20m e a 0,60m, em torno de 4kg em cada profundidade. Também foram retiradas amostras indeformadas, em três profundidades, 0,20m, 0,40m, e 0,60m, em anéis de PVC com 75mm de diâmetro por 40mm de altura para determinar a massa específica natural e a 0,60m de profundidade em anéis de PVC de 50mm de diâmetro por 20mm de altura, aproximadamente, para realizar o ensaio de erodibilidade. Tanto para as amostras indeformadas quanto para as deformadas, primeiramente foi retirada toda a cobertura vegetal com o auxílio de uma enxada.

Das nove feições espacializadas e classificadas, apenas em cinco foram retiradas amostras de solo: as feições 1, 2, 4, 6 e 9. As feições 3 e 5 estavam aterradas com uma mistura de entulho e solo, o que impossibilitou a retirada das amostras, não sendo possível analisá-las. A Figura 6 mostra o local da feição de número 5, sendo a Figura 6(a) na primeira campanha de campo, em março/2018, ainda exposta e Figura 6(b) na segunda campanha de campo, em março/2019, já aterrada. Ressalta-se também que as feições 7 e 8 são erosões fluviais e, como o intuito da pesquisa é o estudo das feições pluviais, elas também foram descartadas. A delimitação da retirada das amostras fez com que apenas cinco feições fossem incluídas na determinação dos índices de erosão.

Procurou-se retirar as amostras nas cabeceiras das feições, entretanto nem sempre foi possível em função das características de cada uma delas. Na feição 1 as amostras

foram coletadas ao lado da feição, na região da cabeceira, fora do eixo da direção do desenvolvimento da feição (Figura 7), devido a proximidade do asfalto.



Figura 6: Local da feição 5.



Figura 7: Esquema do local de retirada de amostras, sobre a Feição 02

Na feição 2, as amostras foram retiradas na cabeceira da feição, porém com o eixo deslocado. Isso ocorreu porque os taludes da feição não eram estáveis, tornando a aproximação na direção do eixo da cabeceira insegura.

Na feição 4 foi possível coletar as amostras no eixo da cabeceira da feição. Na feição 6, apesar de encontrar-se estabilizada em sua maior parte, há um braço que se encontra ativo (em destaque em amarelo na Figura 8) , em constante crescimento. Por esse motivo, optou-se, nesta feição, coletar amostras em dois locais: um no eixo da cabeceira da

feição, a fim de representar a parte estabilizada; e no eixo da cabeceira do braço ativo, para representar a parte em crescimento da feição.

A feição 9 está localizada em local cercado por pavimento, tanto na região da cabeceira, quanto da lateral. Por essa razão, optou-se por retirar as amostras no talude da erosão escavando-se uma abertura no talude como mostra a Figura 9. A Tabela 10 sintetiza e nomeia as amostras coletadas e a nomenclatura dada a cada uma delas de acordo com a localização e a profundidade. A nomenclatura vale para amostras deformadas e indeformadas.



Figura 8: Feição erosiva 6 estabilizada, com destaque em amarelo para o crescimento de um braço, chamada de feição erosiva 6A

Fonte: Adaptado do Google Earth (2020)



Figura 9: Retirada de amostra no talude da feição 9.

Tabela 10: Nomenclatura das amostras coletadas

Feição	Profundidade		
	20 cm	40 cm	60 cm
1	1.1	1.2	1.3
2	2.1	2.2	2.3
3	Não coletado – feição aterrada		
4	4.1	4.2	4.3
5	Não coletado – feição aterrada		
6	6.1	6.2	6.3
6.A (braço da erosão)	6A.1	6A.2	6A.3
7	Não coletado – Erosão Fluvial		
8	Não coletado – Erosão Fluvial		
9	9.1	9.2	9.3

Caracterização do Solo

Para caracterizar o solo foram feitos os ensaios de granulometria conjunta, de acordo com a norma ABNT NBR 7181/2018 versão corrigida 2:2018; e massa específica dos sólidos, de acordo com a NBR 6508/1984, para as amostras a 0,20m e a 0,60m de profundidade.

Foi determinada a massa específica natural das amostras indeformadas coletadas através da razão entre a massa total da amostra pelo volume interno do anel. Posteriormente, foi calculado o índice de vazios, a porosidade e o grau de saturação do solo para as profundidades de 0,20m e 0,60m por correlação.

Também foram gerados dois mapas em plataforma SIG com os dados da porcentagem de areia e da porcentagem de argila do solo. Para isso, foram adicionadas à tabela de atributos duas colunas de dados, uma com a porcentagem de argila, outra com a porcentagem de areia de cada feição erosiva e, posteriormente, esses dados foram interpolados pelo método IDW (Interpolação pela ponderação do inverso da distância).

Permeabilidade

Apesar da melhor opção para descrever esse parâmetro serem os ensaios de campo, uma vez que não alteram a estrutura do solo, devido ao difícil acesso as áreas de cabeceiras e da declividade dos taludes de algumas feições erosivas esses ensaios foram descartados. Para descrever esse parâmetro foram realizados ensaios de permeabilidade em laboratório.

Devido à dificuldade apresentada na retirada das amostras indeformadas se optou pela moldagem dos corpos de prova no laboratório. Para isso, utilizaram-se as amostras deformadas, retiradas a 0,60m de profundidade.

Os corpos-de-prova para o ensaio permeabilidade foram moldados no cilindro de *tecnyl* desenvolvido por Yamasaki (2012), com o compactador do ensaio de mini-MCT. Para garantir a semelhança da amostra compactada com as indeformadas, as amostras foram moldadas buscando-se as mesmas características do terreno, como a umidade natural (w) e a massa específica seca (ρ_d).

A Figura 10 mostra o cilindro desenvolvido por Yamasaki (2012) de *tecnyl*. Para o trabalho foi preciso adicionar uma pedra porosa entre o cilindro e o geotêxtil, uma em cada extremidade. Essa adaptação foi necessária devido ao carreamento de partículas ocorrido no primeiro ensaio executado, como mostra a Figura 11a. Após a adição das pedras porosas não houve mais carreamento de partículas (Figura 11b).

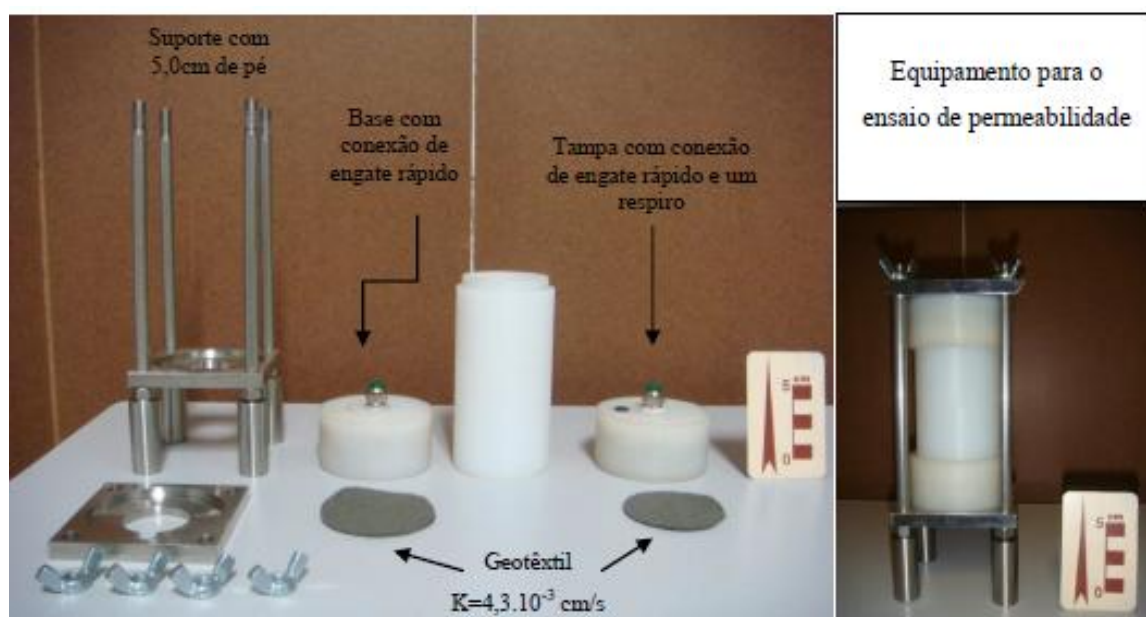


Figura 10: Acessórios para a realização do ensaio de permeabilidade
Fonte: Yamasaki (2012)

A Equação (6) de Hazen (Pinto, 2006) foi utilizada para determinar o método de ensaio (carga constante ou carga variada) e validar os resultados obtidos.

$$k = C(d_{10})^2 \quad (6)$$

Em que:

k é obtido em cm/s; d_{10} = diâmetro efetivo (diâmetro em que apenas 10% da massa de uma amostra de solo passa na peneira) em centímetros; C um coeficiente que varia de 100 a 150, tendo sido adotado 100.

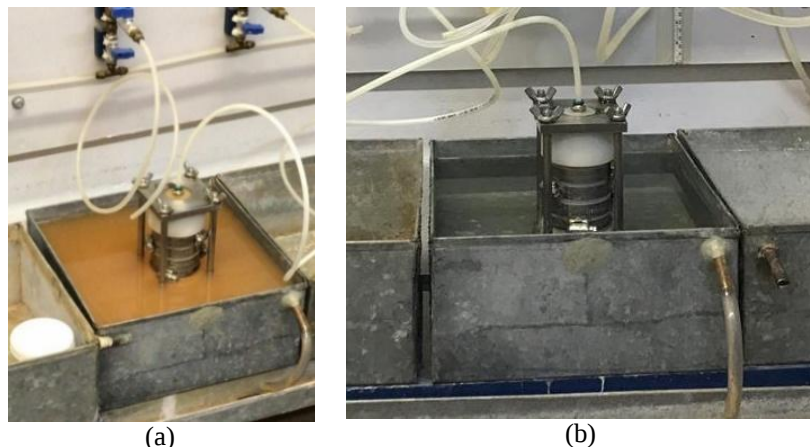


Figura 11: Ensaio de Permeabilidade sem a adaptação (a) e com a adaptação (b) das pedras porosas

O método escolhido para as amostras 1, 2, 6A e 9 foi de carga constante, de acordo com a NBR 13292/1995; e para as amostras 4 e 6 foi de carga variável, de acordo com a NBR 14545/2000, por apresentarem um coeficiente estimado menor.

Os valores obtidos nos ensaios de laboratório foram utilizados para gerar um mapa no SIG, feito por interpolação IDW, e adotados como o fator influenciador do coeficiente de permeabilidade.

Erodibilidade

Para determinar o fator erodibilidade foi utilizado o método desenvolvido por Nogami e Villibor (1979), com o limite determinado por Pejon (1992). Para isso foi necessário realizar dois ensaios: ensaio de absorção de água, para determinar o índice de absorção e o ensaio de perda de água por imersão.

O ensaio de absorção de água consiste em medir o quanto de água um corpo de prova, previamente seco ao ar, absorve em períodos regulares de tempo, até que atinja o estado de saturação (aproximadamente 1 hora). Para isso foram utilizadas as amostras indeformadas de PVC de 50mm de diâmetro por 20mm de altura coletadas a 0,60m de profundidade. Essas amostras foram secas ao ar por 24 horas e posteriormente, após saturado todo o sistema, o cronometro foi acionado no mesmo instante que a amostra foi colocada sobre a pedra porosa. Em intervalos de tempo determinados (10s, 20s, 30s, 45s,

60s, 75s, 1,5min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min e 1hora) foram anotados a posição da coluna de água, previamente graduada (Figura 12).

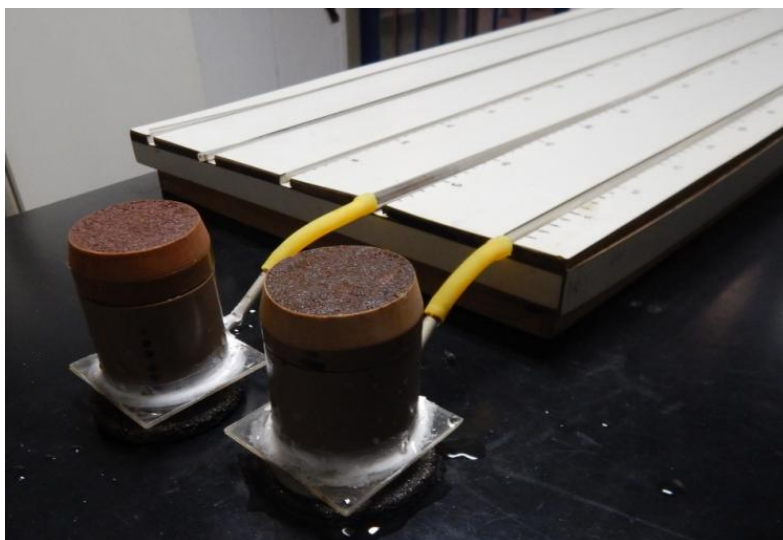


Figura 12: Ensaio de Absorção de água

Finalizado o ensaio, foi calculado o volume de água absorvida em função da área do corpo de prova e traçado o gráfico volume absorvido/área do corpo de prova x raiz quadrada do tempo. O índice de absorção (S), usado para determinar a erodibilidade, é o coeficiente angular da reta do gráfico de volume de água absorvida pelo corpo de prova em função da raiz quadrada do tempo.

Também foi necessário realizar o ensaio de perda por imersão que consiste em quantificar a porcentagem de solo desprendida em 24 horas, devido à imersão em água, em relação ao peso inicial da amostra seca (P) (Figura 13).

A classificação alta e baixa erodibilidade deu-se pelo limite proposto por Pejon (1992), que é definido como 40 vezes a razão entre o índice de absorção (S) e a perda por imersão (P):

$$E = \frac{40S}{P} \quad (7)$$

Se: $E < 1$, o material é classificado como alta erodibilidade e caso $E > 1$, o material é considerado baixa erodibilidade (PEJON, 1992).

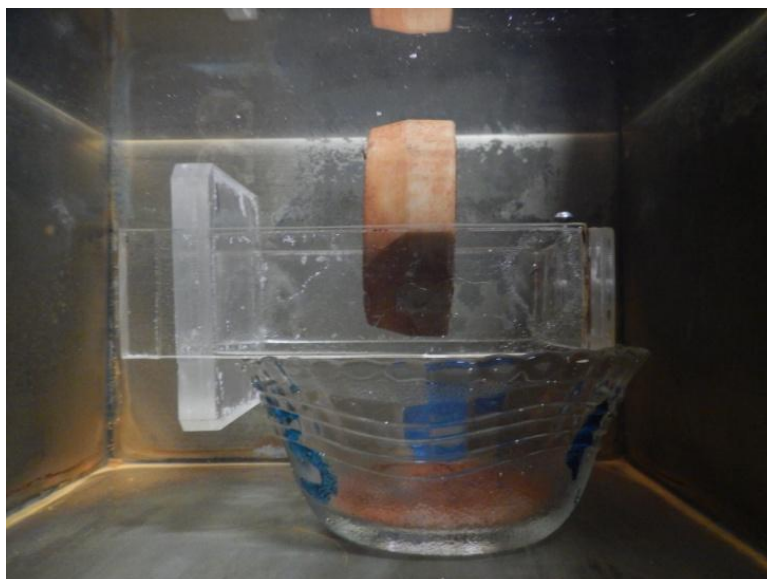


Figura 13: Ensaio de perda de massa por imersão

Para o fator erodibilidade foi então, utilizado o valor calculado de E para cada feição erosiva e gerado o mapa de erodibilidade em SIG por interpolação IDW.

3.4.3 **Pluviosidade**

Devido à dificuldade em obter dados de intensidade de chuva (mm/h) para o cálculo da erosividade proposto por Wischemeier e Smith (1958), para levar em consideração o poder erosivo da chuva foram utilizados dados de pluviosidade (quantidade de chuva, em mm) de duas estações pluviométricas existentes na cidade, o mesmo feito por Costa *et al.* (2018).

Uma das estações pertence à Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, campus de Botucatu, localizada na fazenda experimental de São Manuel, coordenadas UTM: Fuso 22S, E749.851,3563 e N7.480.255,80738. Outra estação pluviométrica utilizada está localizada nas coordenadas UTM: Fuso 22S, E749.908,507617 e N7.483.948,0847, os seus dados são pertencentes a ANA (Agencia Nacional de Águas) e estão disponibilizadas no portal HidroWeb (Sistema de Informações Hidrológicas) (ANA, 2018).

Em ambas as estações os dados disponibilizados são mensais. Da primeira estação o período encontrado foi de 2000 a 2012, enquanto da segunda estação são dados do período de junho de 1940 a novembro de 2014, com exceção dos meses de junho de 1945, janeiro de 1952 e agosto de 1965.

Para utilizar o mesmo período para as duas estações, foram manipulados apenas os dados de janeiro de 2000 a dezembro de 2012 para ambas as estações. Foram determinadas as pluviosidades anuais somando-se os dados de janeiro a dezembro de cada ano, para, então, se determinar uma média anual com os dados dos 12 anos.

As estações pluviométricas foram também espacializadas e foi adicionada uma tabela de atributos com as pluviosidades (em mm) para essas duas estações no *QGIS*. Com a tabela inserida, os dados foram interpolados com ponderação pelo inverso da distância (IDW) e se gerou o mapa de isoietas do período de 2000 a 2012 para a cidade de São Manuel. Para gerar o fator relacionado ao poder erosivo da chuva, adotou-se o valor de pluviosidade do período para cada feição.

3.4.4 *Uso e Ocupação do Solo*

O fator de uso e ocupação do solo foi determinado com base em imagem de satélites do *Google Earth* (maio/2019). A imagem foi inserida no *QGIS* com o auxílio do complemento QuickMapServices e salva com o SRC WGS84 – UTM fuso 22S. A imagem *raster* foi, então, cortada com a camada de máscara do município.

Tabela 11: Valores sugeridos por Costa *et al.* (2018) para os fatores de uso e ocupação

Uso e Ocupação	Valor atribuído
Fazenda de pesca, reservatórios artificiais de água	01
Mata Ciliar, Savana	02
Pasto, Linhas de transmissão de energia, pequenas propriedades rurais	03
Reflorestamento e Casa de Campo	10
Cana de Açúcar	13
Citricultura	15
Mineração, Ferrovia	20
Solo exposto, área urbanizada, plantas industriais, posto de gasolina, estradas, motéis, terminal intermodal, horticultura, suinocultura e avicultura	30

Para cada categoria de uso do solo foi delimitado um polígono para quebrar a feição em pequenas áreas. Feito isto, se inseriu uma nova coluna na tabela de atributos com a descrição de cada uso e ocupação das áreas geradas pelo comando quebra de feição.

Os valores foram o mesmo atribuído por Costa *et al.* (2018), variando de 1, para os locais com reservatórios de água artificiais e 30 para o solo exposto, área urbanizada,

postos de gasolina, estradas, horticultura e fazenda de suínos e aves. A Tabela 11 sintetiza os valores adotados.

3.5 Determinação dos índices de erosão (IE)

Com base nos estudos de Miqueloni e Bueno (2011), Gajbhiye *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2018) os índices foram determinados com duas metodologias distintas: uma utilizando apenas análise de componentes principais e outro utilizando análise de fatores com a técnica de extração dos fatores por componentes principais com os fatores rotacionados do tipo ortogonal Varimax.

Para o desenvolvimento do método foi utilizada a linguagem de programação *R* que é um ambiente gratuito para a computação estatística e gráfica. O *R* é uma ferramenta computacional que auxilia na análise e visualização de dados, utilizando-se de técnicas estatísticas. É considerado um ambiente flexível que possui inúmeros recursos disponíveis para diversas análises através de pacotes prontos disponíveis para instalação.

3.4.1 Banco de Dados

O banco de dados utilizado para ambas as metodologias foi composto pelos fatores influenciadores que foram determinados previamente. Devido o fator erodibilidade dos solos ser inverso na análise, em relação ao número (baixa erodibilidade está relacionado com números maiores que 1,0 de *E*, e alta erodibilidade está relacionado a números menores que 1,0 para *E*), as duas metodologias foram desenvolvidas com dois bancos de dados distintos. O primeiro deles possui o valor de erodibilidade igual ao valor determinado no ensaio, enquanto o segundo banco de dados possui como erodibilidade o inverso do valor determinado no ensaio, ou seja, $1/E$. Todas as metodologias foram desenvolvidas com os dois bancos de dados, com a finalidade de se analisar se a inversão do fator iria distinguir nos resultados obtidos.

É importante notar que, embora tenham sido espacializadas e classificadas um total de 9 feições, nem todas foram utilizadas no desenvolvimento dos índices, parte devido ao processo desencadeador (no caso as feições 7 e 8 - erosões fluviais) e parte devido a impossibilidade de retirar amostras de solo para determinar a fração granulométrica, o

coeficiente de permeabilidade e a erodibilidade do solo (feições 3 e 5). Foram, então, utilizados apenas os fatores das feições 1, 2, 4, 6 e 9, sendo o local da feição 6 subdividida em duas amostras distintas: 6 representando a cabeceira da feição estabilizada e 6A representando o crescimento do braço da feição.

Com isso, o banco de dados ficou escrito por uma matriz de $a_{6 \times 8}$, ou seja, 6 observações por 8 variáveis. Para algumas técnicas da análise multivariada, como a *análise fatorial*, há uma divergência sobre o tamanho do espaço amostral. Dessa forma, tendo em vista que se trata de uma análise exploratória, decidiu-se utilizar o banco de dados e as diferentes técnicas multivariadas mesmo com a pouca quantidade de observações.

Para ambos os conjuntos de fatores foram calculados as médias, desvio padrão de cada fator e a matriz de correlação dos dados originais, para que fosse possível fazer uma análise inicial dos dados levantados. Para auxiliar nas análises da matriz de correlação, foi gerado correlogramas das matrizes.

3.4.2 Método A: Análise de Componente Principal

A Figura 14 representa o fluxograma do método A. As etapas 1 e 2 compreendem a composição do banco de dados e na determinação da matriz de correlação dos dados, respectivamente, descritos no item 3.5.1.

A etapa 3 corresponde a decomposição espectral da matriz de correlação, executada na plataforma R (*script* no Apêndice A). Desta etapa se obtiveram os autovalores (etapa 4) e os autovetores (etapa 5). Dos autovalores obteve-se a variância de cada componente principal (etapa 6) e o gráfico *Scree Plot* (etapa 7). Esses dois parâmetros, em conjunto com os autovalores, foram utilizados para determinar a quantidade de componentes que foram utilizados para a geração dos índices, por uma análise conjunta de três regras costumeiramente utilizadas: *Scree test*, variância acumulada e regra de Kaiser. A regra do *Scree test* permitiu analisar graficamente a dispersão do número de componentes até que a curva da variância individual de cada componente se tornasse horizontal ou parasse de sofrer uma queda abrupta, mudando a inclinação da reta. A variância de cada componente permitiu analisar a variância acumulada. Hair *et al.* (2014) sugerem um patamar aceitável acima de 60%. Estudos como o de Miqueloni e Bueno (2011), Gajbhiye *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2018) adotaram patamares de 87,42%, 87,34% e 80,97% respectivamente. Com isso, decidiu-se que seria adotado, nesta pesquisa, um patamar acima de 80%. A

regra de Kaiser, afirma que devem ser utilizados apenas os componentes com autovalores (determinados na etapa 4) acima de 1,0.

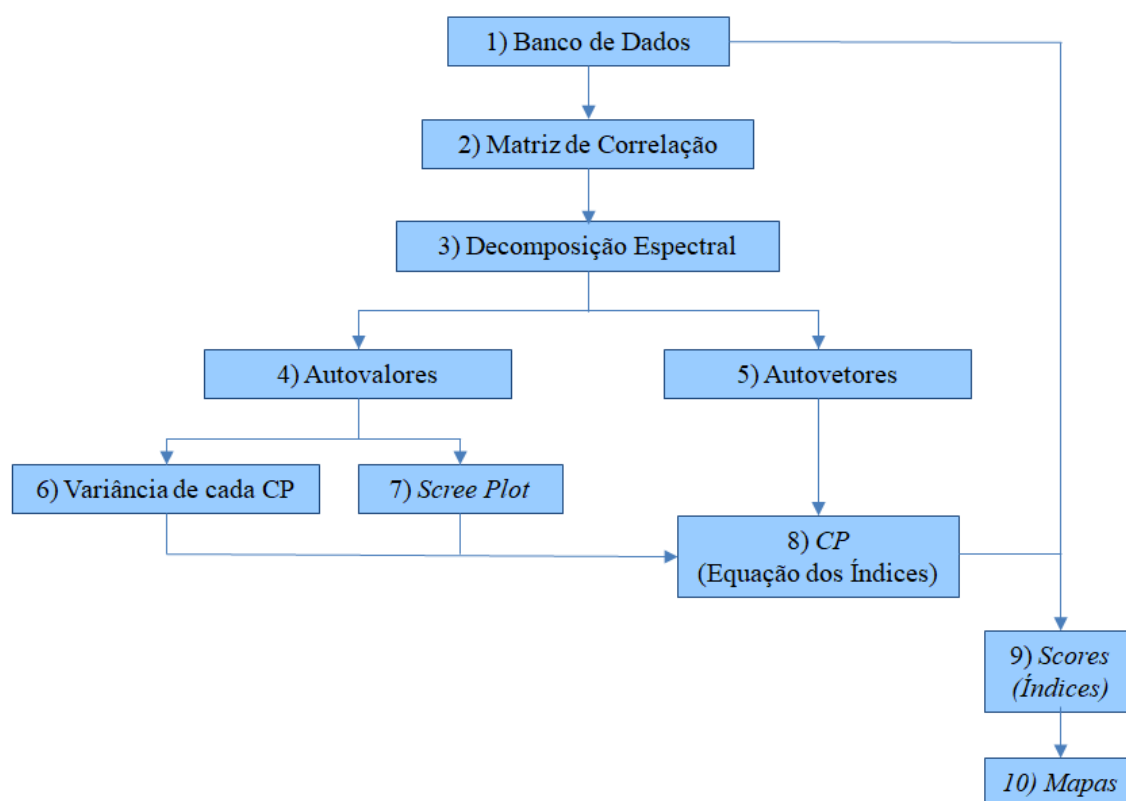


Figura 14: Fluxograma do método A: Análise de componente principal

Depois de determinada a quantidade de componente principal extraídos (etapa 5), com os autovetores foram geradas as componentes principais, que nesta pesquisa foram chamadas de equações dos índices (etapa 8).

A etapa 9 consistiu na determinação dos *scores*. Para isso foram aplicados os fatores do banco de dados nas equações, resultando em um *score* para cada feição de cada equação. Como os dados possuíam escalas diferentes, os *scores* foram normalizados em relação à média. Para isso, dos *scores* foram subtraídos os valores das suas médias, conforme a equação 8:

$$Score_{normalizado} = score - Média_{score} \quad (8)$$

Com os valores dos *scores* normalizados, chamados de índices, foi gerado um mapa na plataforma SIG de cada equação por interpolação IDW, isolinhas equidistantes em 1,0 metro (etapa 10).

3.4.3 Método B: Análise Fatorial

A Figura 15 ilustra um fluxograma que representa a metodologia utilizada no método B. Na etapa 1, devido às escalas dos fatores serem diferentes, o banco de dados foi padronizado com centralização da média em zero e escala em desvio padrão. Na etapa 2 foi verificada a adequabilidade dos dados pelo teste de Bartlett, o qual assegura que para a amostra ser estatisticamente significativa p -valor deve ser menor que 0,05.

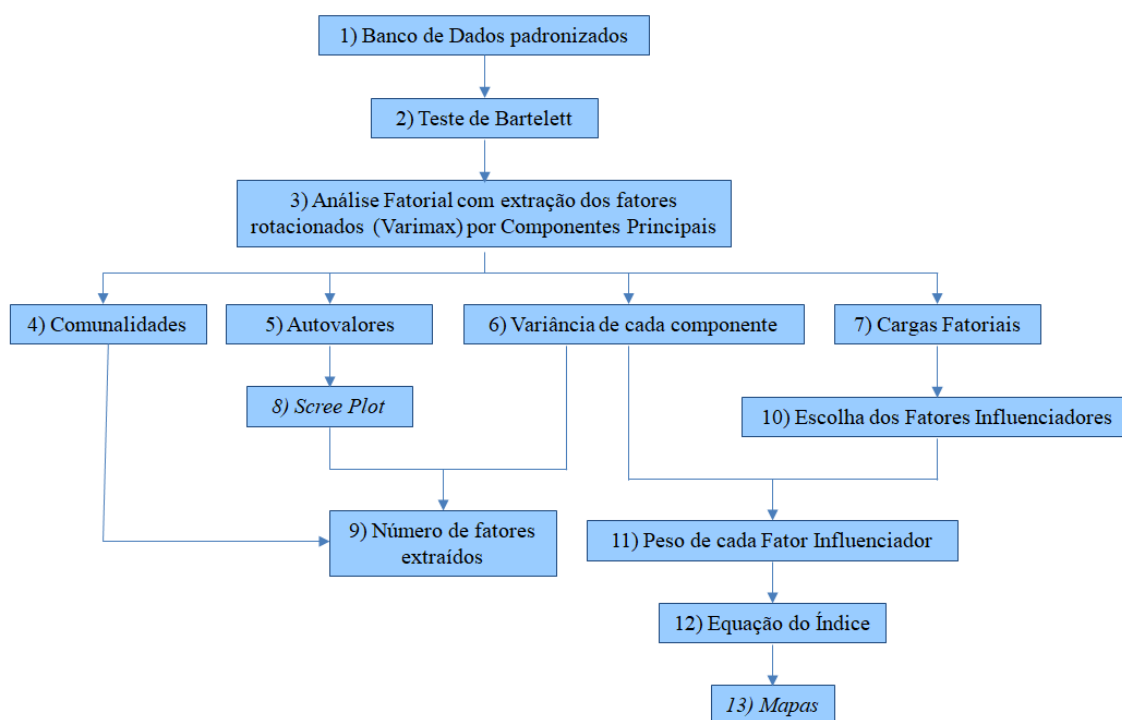


Figura 15: Fluxograma do método B: Análise Fatorial

A etapa 3 consistiu em aplicar a *análise fatorial* nos dados da etapa 1. Para isso decidiu-se rotacionar os dados com a rotação ortogonal varimax e a extrair os fatores por meio de componentes principais, a fim de facilitar a interpretação das análises, já que a rotação ortogonal conserva as propriedades estatísticas. Da *análise de fatores* chegou-se às comunalidades (etapa 4), aos autovalores (etapa 5), à variância de cada componente (etapa 6) e às cargas fatoriais (etapa 7).

As comunalidades representam a proporção da variância para cada fator influenciador incluído na análise que é explicado pelos componentes extraídos. Isso significa que, se um determinado fator possui 0,80 de comunalidade, todos os componentes juntos explicam 80% da variabilidade do fator no conjunto de dados. Com isso, a etapa 4 teve a função de confirmar que a quantidade de componentes extraídos é suficiente para

representar os fatores, de maneira individual, uma vez que é gerado um valor de comunalidade para cada fator.

Dos autovalores, da etapa 5, foi possível gerar o gráfico *Scree Plot* (etapa 8), que junto da variância de cada componente (etapa 6), auxiliaram na definição da quantidade de fatores que seriam extraídos (etapa 9). Para isso, seguiram-se os mesmos parâmetros adotados na metodologia A: autovalores acima de 1,0; variância acumulada de no mínimo 80%; e análise gráfica da dispersão do número de componentes em função dos autovalores.

Através das cargas fatoriais (etapa 7) foram determinados os fatores influenciadores que foram utilizados no cálculo dos índices (etapa 10). Para isso, foi escolhida, para cada componente, o fator que possuía a carga fatorial mais elevada, em módulo.

Posteriormente foi determinada a importância de cada fator influenciador na etapa 11. A importância foi calculada pela multiplicação da variância do componente (etapa 6) pelo valor da carga fatorial, obtido na etapa 7, elevada ao quadrado.

Calculadas as importâncias dos fatores, os índices de erosão, da etapa 12, foram calculados pela Equação (9):

$$I_{E_{feição}} = \frac{(F_1 I_{F_1}) * (F_2 I_{F_2}) * ... * (F_n * I_{F_n})}{(F_A I_{F_A}) * (F_B I_{F_B}) * ... * (F_m * I_{F_m})} \quad (9)$$

Em que:

n o número de CPs escolhidas

F_n é o fator influenciador que possui a carga mais alta positiva da C_n

F_m é o fator influenciador que possui a carga mais alta negativa da C_n

I_{F_n} é a importância que o fator influenciador n tem no índice.

I_{F_m} é a importância que o fator influenciador m tem no índice.

Aplicando-se os dados originais dos fatores influenciadores na equação, chegou-se em um número de índice para cada feição. Na etapa 13, esses valores foram representados em um mapa, na plataforma SIG, por interpolação IDW, com isolinhas equidistantes em 5,0 metros.

3.4.4 *Elaboração e análise dos mapas*

Todos os mapas desenvolvidos na etapa 10 da Figura 14 e na etapa 13 da Figura 15 foram desenvolvidos por extrapolação IDW no *QGIS* 3.4.14. A análise dos mapas baseou-se, primeiramente, na comparação com a tabela desenvolvida para a classificação das feições, e em um segundo momento, na comparação com os mapas gerados pelos fatores influenciadores determinados.

A comparação com a classificação buscou compreender a relação entre as feições em relação ao tipo de feição erosiva e ao processo desencadeador. Por outro lado, a comparação com os mapas dos fatores buscou entender a relação entre os índices desenvolvidos e os parâmetros influenciadores.

Pretendeu-se nessas análises determinar a escolha do método que melhor representou a realidade dos processos erosivos instalados nos locais das feições analisadas existentes no município.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pela metodologia descrita no capítulo 3.

- Primeira etapa: é apresentada a espacialização das feições erosivas;
- Segunda etapa: é descrita a classificação das feições erosivas;
- Terceira etapa: compreende a determinação dos fatores influenciadores das feições erosivas: declividade, textura do solo, permeabilidade, erodibilidade, pluviosidade e uso e ocupação;
- Quarta etapa: compreende o desenvolvimento dos métodos para determinar os índices de erosão do município de São Manuel – SP e a escolha do método mais adequado.

4.1 Espacialização das Feições Erosivas

Da Tabela 12 constam as coordenadas de cada feição erosiva do município de São Manuel. A Figura 16 ilustra a espacialização dessas feições delimitadas na área urbana do município. Todo o processamento foi embasado no *datum* WGS84 com projeção UTM – Fuso 22 Sul.

Observa-se com a espacialização que as feições erosivas estão localizadas nas periferias da cidade, e não no centro. Isso mostra que além dos fatores antrópicos, também são necessários fatores físicos do ambiente, como características geotécnicas e geoambientais.

Tabela 12: Coordenadas das feições erosivas do município de São Manuel

Feição Erosiva	Coordenada X (metros)	Coordenada Y (metros)
1	748400,433	7481087,549
2	749550,264	7481343,850
3	749122,247	7482561,116
4	748954,063	7482957,757
5	750527,070	7483825,518
6	751770,210	7484126,670
6A	751405,010	7484118,060
7	749580,709	7484583,562
8	749569,820	7485114,750
9	750111,8590	7482466,705

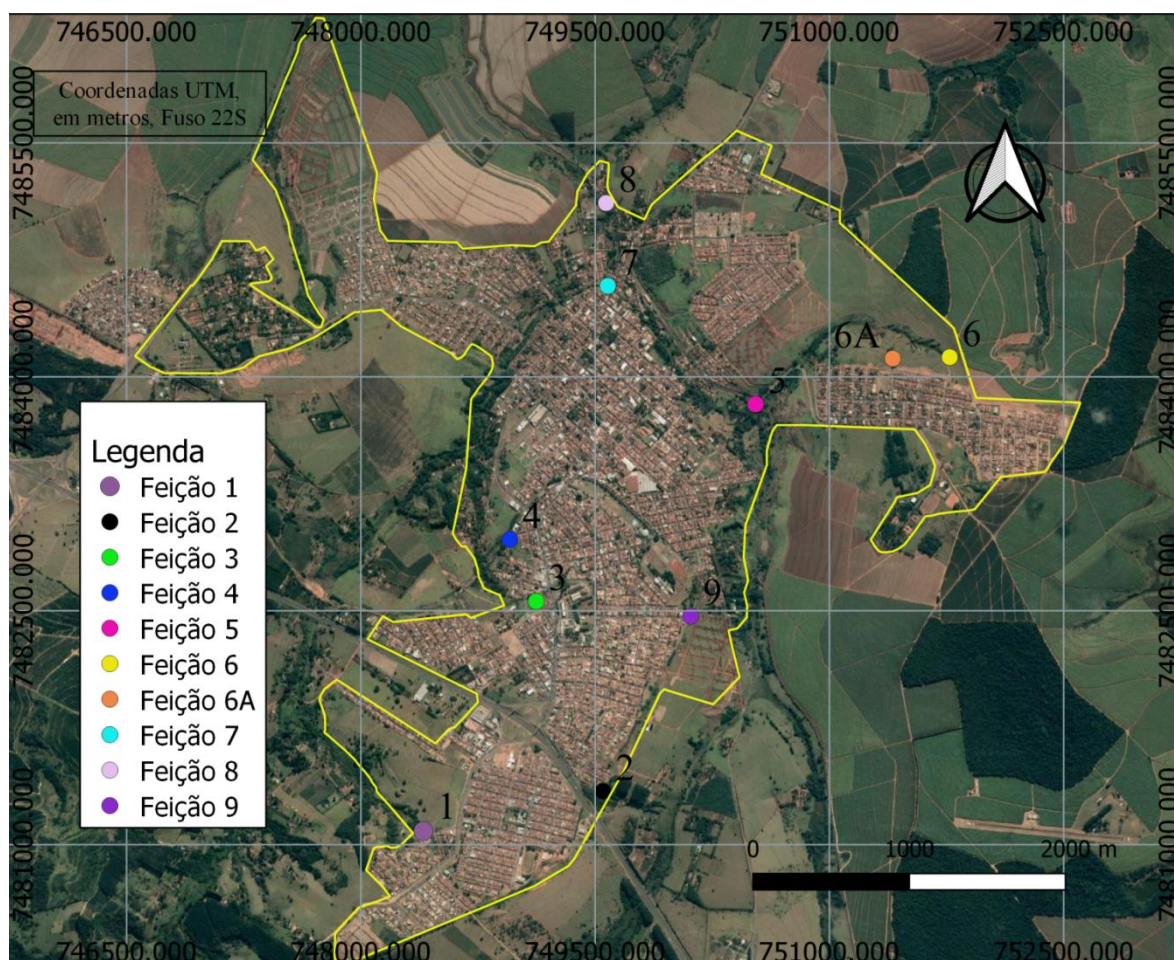


Figura 16: Espacialização das feições erosivas na cidade de São Manuel

4.2 Classificação das feições erosivas

A seguir são descritas as características observadas nas feições durante as campanhas de campo. Com o auxílio da Figura 17 e visitas aos locais, foi possível observar que as feições 7 e 8 são decorrentes de processos fluviais, devido à proximidade das feições ao córrego, enquanto as demais feições são decorrentes de processos pluviais e caracterizam-se como feições lineares.

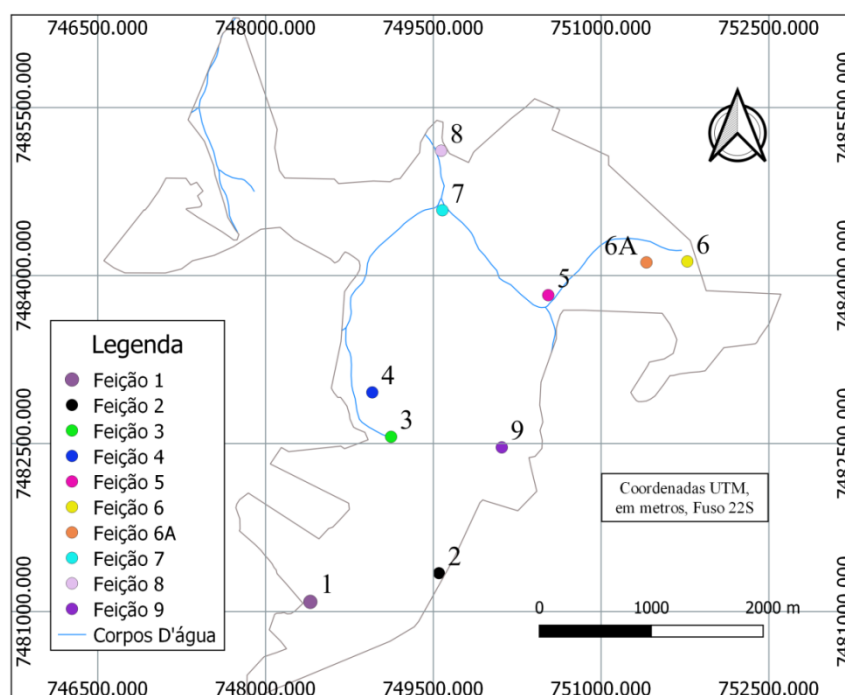


Figura 17: Localização das feições erosivas em relação aos corpos d'água

Feição 1

Em visita de campo se observou a presença de água na feição e, confrontando-a com a Figura 17, conclui-se que a água presente é proveniente de afloramento do lençol freático, devido à inexistência de corpo d'água no local antes do surgimento dessa feição erosiva. Também foi possível observar a instabilidade das paredes da feição, embora o local possuísse cobertura vegetal. A instabilidade pode ser explicada pela concentração de água no local, causada pela ausência de sistema de drenagem no entorno.

A Figura 18, a qual destaca em amarelo o local da feição, mostra a diferença do entorno da feição entre os anos de 2010 a 2013. A principal diferença notada foi o asfaltamento das ruas que ocorreu no ano de 2013. Devido ao afloramento do lençol,

instabilidade das paredes e a dimensão da feição, concluiu-se que a feição 1 é uma voçoroca e o processo desencadeador é pluvial.



Figura 18: Evolução do entorno da erosão do ponto 1
Fonte: Adaptado do Google Earth (2018)

Feição 2

A feição 2 possui em seu entorno um bairro de médio porte, a Rodovia Marechal Rondon (SP-300) e uma área de pastagem. O bairro localizado no entorno da feição 2 é asfaltado e possui sistema de drenagem pluvial. No entanto, nas visitas realizadas no local pôde-se perceber que as bocas de lobo estavam todas obstruídas (Figura 19a). Também foi possível observar que a Rodovia possui um sistema de caneletas longitudinais e transversais que são canalizadas em tubulações de concreto, as quais estavam rompidas (Figura 19b).



(a)



(b)

Figura 19: Problemas relacionados a drenagem pluvial no entorno da feição 2

A feição 2 possui 15 metros de profundidade aproximadamente e paredes instáveis, como mostra a Figura 20, uma vista a partir da cabeceira da feição. Na imagem também é possível notar a presença de vegetação. Esta vegetação estende-se no sentido da cabeceira

da erosão, sendo inexpressiva nas laterais, ao longo da feição, como pode ser observado na Figura 21.



Figura 20: Vista panorâmica, a partir da cabeceira da feição 2



Figura 21: Entorno da feição 2
Fonte: Adaptado do Google Earth (2018)

O fim da erosão se dá no início de um braço do Córrego Pimenta. Parte da feição, que se encontra próximo ao córrego, possui afloramento do lençol, enquanto que próximo à cabeceira, não é possível notar a presença de água. Com isso, devido à instabilidade dos taludes e a presença de água, concluiu-se que a feição 2 é uma voçoroca e o processo desencadeador é pluvial.

Feição 3

Em visita ao local não foi possível identificar uma erosão aparente e sim pastagem, tendo em vista que, entre os anos de 2010 e 2013 a feição foi aterrada com entulhos (Figura 22).

O que pôde se observar no local, além da pastagem, foi a presença de asfalto, sistema de drenagem e a proximidade ao córrego. Supõe-se que o processo desencadeador da antiga feição, agora recuperada foi o pluvial. A recuperação da feição impossibilitou sua classificação.



Figura 22: Aterramento da feição 3
Fonte: Adaptado do Google Earth (2018)

Feição 4

A feição 4, classificada como voçoroca, apresenta afloramento de lençol freático e vegetação ao redor. Há um córrego situado próximo à feição e o bairro do entorno não possui nenhum tipo de sistema de drenagem. Apesar da dimensão da voçoroca (Figura 23) desencadeada por processo pluvial ela permanece estável.



Figura 23: Entorno da feição 4
Fonte: Adaptado do Google Earth (2018)

Feição 5

A feição 5, durante o decorrer da pesquisa, também foi aterrada (Figura 24 (b)). Entretanto na primeira campanha de campo, realizada em março de 2018, foi possível

observar que a feição possuía paredes íngremes e uma profundidade em torno de 2,5 metros, como ilustrado na Figura 24 (a).

Na primeira campanha, foi possível observar que o surgimento da feição se deu devido ao rompimento de uma tubulação de galeria pluvial (Figura 6 a), o que classifica o processo desencadeador antrópico. É provável que o rompimento tenha desenvolvido uma erosão interna, o que pode ter contribuído para o crescimento da feição.

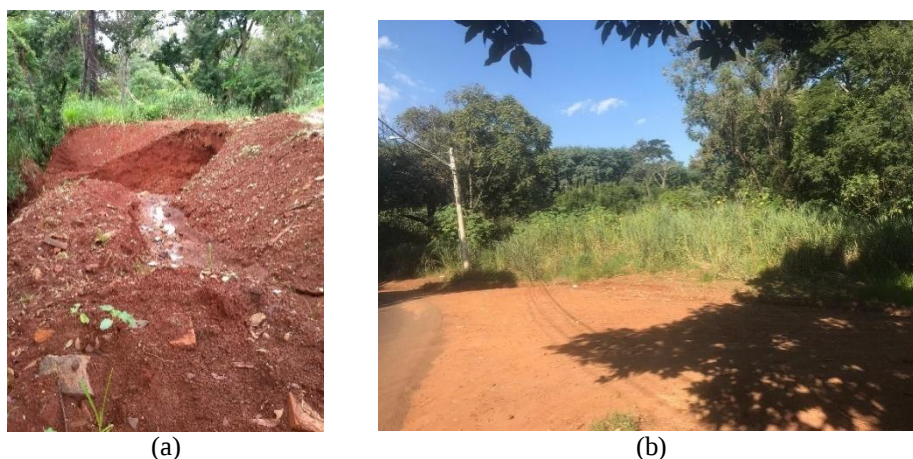


Figura 24: Local da feição 5:(a) foto tirada em março 2018; e (b) foto tirada em março de 2019

O entorno é composto por locais asfaltados e a feição está situada próxima a um córrego. Apesar da tubulação identificada na primeira campanha, o local não apresenta sistema de captação de águas pluviais, o que auxilia na conclusão de que a tubulação de drenagem existente no local é de outra região do município. Outra observação foi que o local apresentou um aumento da vegetação entre março de 2018 e março de 2019, período em que a feição foi recuperada.

Tendo em vista as características observadas nas duas campanhas de campo, como a instabilidade das paredes, o não afloramento do lençol, a obra de aterramento do local e as características da vegetação, a feição 5 foi classificada como uma ravina recuperada.

Feição 6.

A feição 6, situada próximo a um córrego, é classificada como voçoroca, por apresentar taludes em forma de V (Figura 25), profundidade em torno de 20 metros e afloramento do lençol freático. A vegetação, tanto interna quanto no entorno, é basicamente pastagem, com algumas árvores isoladas, de grande e médio porte. Próximo à voçoroca existe um bairro altamente povoado que possui ruas asfaltadas com sistema de

drenagem insuficiente. A concentração do escoamento superficial nas ruas faz o processo desencadeador ser o pluvial.



Figura 25: Feição erosiva do ponto 6

Analisando a evolução da feição no tempo, entre os anos de 2014 e 2019 (Figura 26), foi possível observar um crescimento de um dos braços da feição que se situa paralelamente aos cordões de nível da voçoroca. Em entrevistas com os moradores da região, constatou-se que esse crescimento intensificou-se com o asfaltamento de um bairro próximo ao local, o qual canalizou as águas pluviais e acabou por romper uma tubulação existente próximo ao braço da feição.



Figura 26: Desenvolvimento do Braço da erosão
Fonte: Adaptado do Google Earth (2018)

Feição 7

No entorno da feição 7 notou alguns pontos de desmoronamento das margens do Córrego Paraíso. Esses desmoronamentos podem ter ocorrido devido ao escoamento

superficial que atinge as margens do córrego sem nenhum mecanismo de dissipação de energia, devido à falta de um sistema de drenagem eficiente capaz de evitar que o fluxo concentrado de água eroda as margens (Figura 27).



Figura 27: Margem erodida do Córrego Paraíso no ponto da feição 7

Outro fator que pode ter influenciado na ocorrência das erosões fluviais foram os períodos de seca e cheia (Figura 28) que o córrego passou entre os anos de 2008 a 2018.



Figura 28: Ciclos de cheia e seca do Córrego no ponto da feição 7 entre os anos de 2008 a 2018
Fonte: Adaptado do Google Earth (2018)

Como é possível observar na Figura 28, as margens do córrego são densamente habitadas, com ruas asfaltadas e vegetação pouco densa. Devido à proximidade às casas de

moradia, o processo erosivo tornou-se um problema de ordem social, uma vez que moradores da região relataram que a margem esquerda está cada vez mais próxima das residências.

Conclui-se, então, que se trata de uma erosão de margem causada por processos pluviais, devido ao escoamento superficial e fluvial devido ao comportamento do córrego.

Feição 8

Com uma vegetação um pouco mais densa, situada à jusante da feição 7, a feição 8 também foi classificada como erosão de margem. Apesar do maior destaque ser para o assoreamento no local, o material particulado existente, destacado em amarelo na Figura 29, pode ser de origem da própria margem ou de outras erosões de margem situadas a montante do córrego, uma vez que o corpo d'água atravessa uma boa parte da área urbana de São Manuel.



Figura 29: Destaque de ponto de erosão de margem, no Córrego Paraíso

A feição é situada nos fundos de várias residências de um bairro afastado do centro que não possui rua asfaltada e, consequentemente, não possui sistema de drenagem. Contudo, devido à baixa impermeabilização da região, e com isso, baixa altura de lâmina de escoamento superficial, é descartada a hipótese de o processo desencadeador ser pluvial, concluindo que a origem da erosão é fluvial.

Feição 9

A feição 9 teve origem devido a problemas na drenagem urbana. As galerias existentes aparentam terem sido danificadas e/ou serem ineficientes, uma vez que foi possível observar o escoamento superficial extravasando a boca de lobo em dias de chuva.

A Figura 30 ilustra uma dessas bocas de lobo do entorno da feição, a qual estava com a tampa rompida.



Figura 30: Bocas de lobo no entorno da feição 9

A vegetação do entorno da feição é composta por grama e árvores de pequeno e médio porte (Figura 31). No local não possui corpos d'água e nem afloramento do lençol freático. A profundidade da feição variou de 1 a 2 metros aproximadamente. Conclui-se que a feição é uma ravina desencadeada por um processo pluvial.



Figura 31: Feição erosiva no ponto 9

Resumo das Feições Erosivas

A Tabela 13 sintetiza as características do entorno de cada ponto analisado e mostra a classificação de cada erosão, bem como o processo desencadeador de cada uma delas. A inexistência ou ineficiência do sistema de drenagem no município, de uma forma geral, eleva diretamente a concentração do escoamento superficial causando as feições erosivas. O sistema de drenagem insuficiente que provoca concentração maior de fluxo e até rompimento de tubulação, também acelera ainda mais o desencadeamento e/ou desenvolvimento de feições erosivas.

Tabela 13: Classificação das feições erosivas na cidade de São Manuel

Pto.	Existência de asfalto	Existência de Galeria	Afloramento do lençol freático	Existência rio/córrego	Vegetação	Estabilização	Processo desencadeador	Classificação
1	Sim (a partir de 2013)	Não	Sim	Não	Sim	Não	Pluvial/Antrópico	Voçoroca
2	Sim	Sim, rompida	Sim	Próximo	Na cabeceira	Não	Pluvial / Antrópico	Voçoroca
3	Sim	Sim	Não	Próximo	Rasteira	Recuperada com entulho	Pluvial	Indefinida Recuperada
4	Sim	Não	Sim	Próximo	Sim	Sim	Pluvial	Voçoroca
5	Sim	Não	Não	Próximo	Não	Não	Antrópico	Ravina Recuperada
6	Sim	Insuficiente	Sim	Não	Sim	Sim	Pluvial/Antrópico	Voçoroca
7	Sim	Não	Sim	Sim	Pouco densa	Não	Fluvial, Pluvial e Antrópico	Erosão de margem
8	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Fluvial	Erosão de margem
9	Sim	ineficiente	Não	Não	Sim	Não	Pluvial/Antrópico	Ravina

Fonte: Modificado de Pascoto *et al.* (2018)

4.3 Resultados dos Fatores Influenciadores

Neste subitem estão listados os resultados obtidos dos fatores influenciadores, entre eles declividade da superfície, textura, permeabilidade, erodibilidade, pluviosidade e uso e ocupação do solo.

4.3.1 Declividade da Superfície

A Figura 32 representa a Carta de Declividade de São Manuel gerado no QGIS. É possível observar que a maior parte do território possui até 10% de declividade, tendo uma pequena área com declividades superiores a 15%.

Na área urbana do município acontece o mesmo. Uma pequena área possui de 15,1 a 20% de declividade. As áreas mais afastadas dos corpos d'água possuem de 0 a 2% de

declividade, enquanto que, ao se aproximar dos córregos, a faixa da declividade aumenta, chegando em alguns casos a atingir a faixa de 5.1 a 10%.

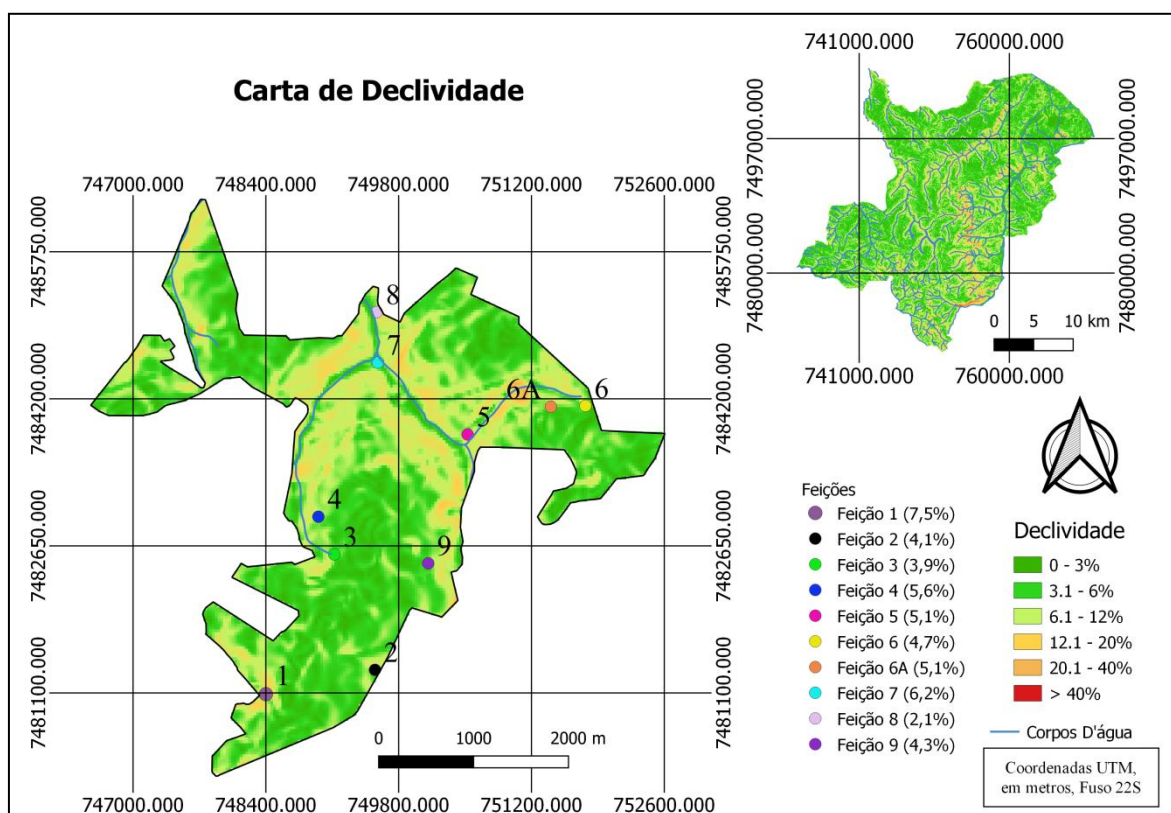


Figura 32: Carta de Declividade do terreno: limite da área urbana (à esquerda) e do município (à direita).

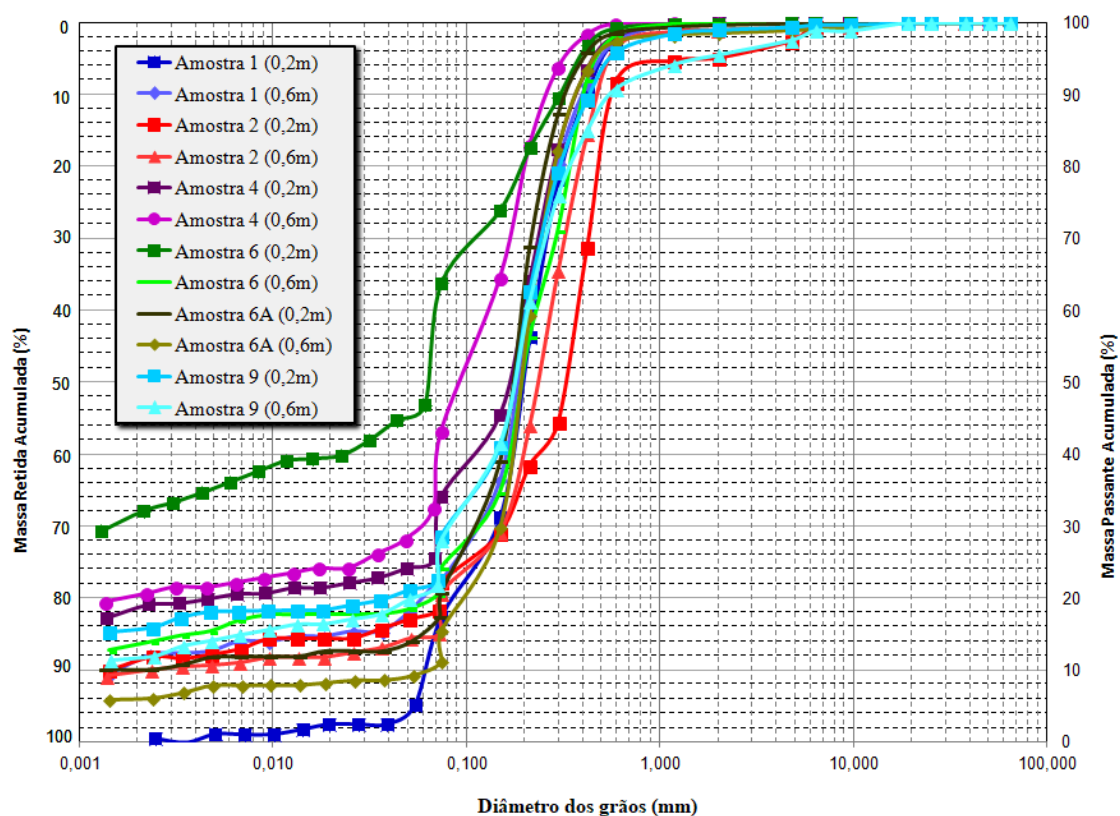
Na legenda da Figura 32 consta a porcentagem de declividade média da área de contribuição de cada feição. As declividades variam de 2,1 %, na feição 8, até 7,5% de declividade na feição 1.

4.3.2 Caracterização Geotécnica

Neste subitem são apresentados resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados, entre eles os de caracterização do solo e de coeficiente de permeabilidade.

Caracterização do solo

Na Figura 33 são apresentadas as curvas granulométricas dos ensaios realizados para as feições 1, 2, 4, 6, 6A e 9 nas profundidades de 0,20m e 0,60m.



Argila	Silte	Areia			Pedregulho			
		Fina	Média	Grossa	Fina	Média	Grossa	

Figura 33: Ensaio de Granulometria das amostras coletadas nas feições erosivas, com escala ABNT 6502/95

Os resultados indicam, em geral para a área estudada, um solo arenoso, com média de 80% de areia na sua composição, exceto na amostra 1 à 0,20m de profundidade (com 94% de areia) e na amostra 6 a 0,20m de profundidade (com 53% de areia). Essas diferenças nas frações granulométricas foram observadas já na retirada das amostras. A Figura 34 ilustra a maior quantidade de areia na superfície da feição 01, sendo possível observar a diferença na coloração do solo da superfície e em profundidade. Por ser uma camada superficial, com 0,20m de profundidade, o solo do local pode ser um solo transportado de outra região. Na Figura 25 é possível observar a cabeceira da feição 6, local próximo à retirada das amostras, com presença de entulho e lixo. O que também pode ter influenciado na maior diferença das frações granulométricas.

Devido a essas variações na superfície, os valores adotados para os fatores que representem a caracterização foram a porcentagem de areia, silte e de argila nas amostras em 0,60m de profundidade.



Figura 34: Diferença de coloração entre o solo da superfície e a 0,60m de profundidade na feição 1

Na Tabela 14 são apresentadas as frações granulométricas em porcentagem, os resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos (ρ_s), em g/cm³, massa específica natural (ρ_n), em g/cm³ e os índices físicos calculados por correlação. As massas específicas dos sólidos variaram de 2,62 a 2,66 g/cm³, valor esperado para o tipo de solo da região. As massas específicas secas (ρ_d) variaram de 1,408 g/cm³ a 1,797 g/cm³, que de acordo com a USDA (2008) não restringem o crescimento de vegetação, uma vez que para solos arenosos, o comprometimento acontece com ρ_d maiores que 1,80 g/cm³, sendo valores menores que 1,60 g/cm³ ideais para o desenvolvimento de plantas.

A dificuldade em retirar as amostras indeformadas é explicada pela estrutura do solo, arenoso e bastante poroso. Durante a coleta, as amostras desmanchavam nas tentativas de retirada do anel do maciço, devido à falta de coesão e a alta porosidade (porosidade média de 41%) do solo.

A Figura 35 ilustra a espacialização das frações texturais de São Manuel realizado com os dados das amostras coletadas a 0,60m de profundidade de areia (a) e argila (b), destacados na Tabela 14. Os locais com maior uma maior quantidade de areia está com a coloração mais amarelada, enquanto que, os locais com maiores quantidades de argila, estão com a coloração mais avermelhada.

Tabela 14: Porcentagem granulométrica dos solos, massas específicas e índices físicos

Feição	Prof. (m)	Granulometria				Massas Específicas			Índices Físicos			
		Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)	ρ_n (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	w (%)	e	n (%)	S (%)
1	0,2	1	5	94	0	1,753	1,605	2,638	9,3	0,64	39	38
	0,4			-		1,724	1,575	-	9,4		-	
	0,6	12	8	80	0	1,906	1,648	2,623	15,7	0,59	37	69
2	0,2	12	5	78	5	1,666	1,510	2,626	10,3	0,74	42	37
	0,4			-		1,848	1,684	-	9,8		-	
	0,6	9	5	85	1	1,868	1,797	2,632	10,1	0,55	36	48
4	0,2	19	5	76	0	1,821	1,629	2,632	11,8	0,62	38	50
	0,4			-		1,770	1,587	-	11,5		-	
	0,6	18	9	73	0	1,943	1,707	2,635	13,9	0,54	35	67
6	0,2	32	15	53	0	1,743	1,466	2,643	18,9	0,80	45	62
	0,4			-		1,815	1,623	-	11,8		-	
	0,6	13	6	81	0	1,745	1,550	2,625	12,5	0,69	41	47
6A	0,2	10	5	84,5	0,5	1,581	1,455	2,627	8,6	0,81	45	28
	0,4			-		1,761	1,660	-	6,1		-	
	0,6	6	4	88,5	1,5	1,617	1,476	2,655	9,1	0,80	44	32
9	0,2	15	7	77	1	1,574	1,408	2,661	11,8	0,89	47	35
	0,4			-		1,648	1,515	-	8,8		-	
	0,6	12	9	78	1	1,660	1,427	2,661	16,3	0,86	46	50

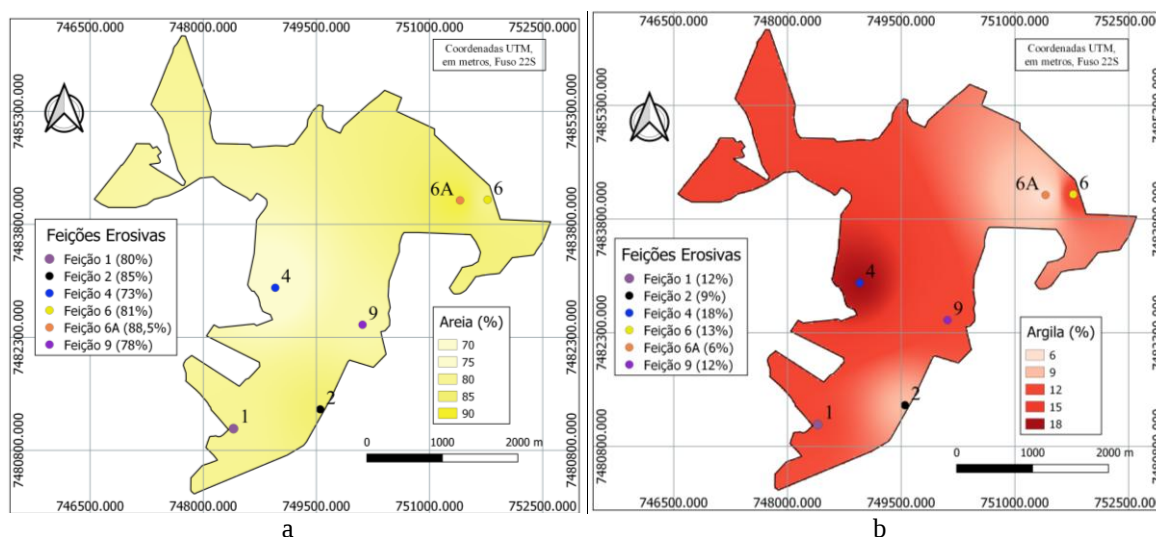


Figura 35: Localização das feições erosivas nos mapas das frações texturais (a- areia; b- argila) a 0,60m de profundidade de São Manuel (* valores estimados).

Permeabilidade

Na Tabela 15 são apresentados os valores de coeficiente de permeabilidade ($k_{20\text{médio}}$) determinados pelos ensaios de laboratório (em destaque na tabela), os valores estimados pela literatura (PINTO, 2006) para cada tipo de solo, os índices físicos: umidade (w), índice de vazios (e), massa específica natural (ρ_n) e massa específica seca (ρ_d) das amostras em situação de campo (valores estimados), e os mesmos índices físicos

alcançados no cilindro (valores obtidos); e a Figura 36 ilustra o mapa desenvolvido no SIG por interpolação dos dados obtidos no laboratório.

Tabela 15: Coeficientes de Permeabilidade das feições e índices físicos

	Amostra	$k_{20\text{médio}}$ (cm/s)	w (%)	e	ρ_n (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)
1.3	valores estimados	2,56E-04	15,7	0,59	1,910	1,650
	Valores obtidos	3,85E-04	15,2	0,58	1,906	1,654
2.3	Valores estimados	5,76E-04	10,1	0,55	1,870	1,700
	Valores obtidos	2,18E-03	9,8	0,55	1,863	1,697
4.3	Valores estimados	3,0625E-06	13,9	0,54	1,943	1,710
	Valores obtidos	1,94E-06	13,7	0,54	1,941	1,707
6.3	Valores estimados	7,23E-05	12,5	0,69	1,740	1,550
	Valores obtidos	2,80E-05	12,6	0,70	1,742	1,547
6A.3	Valores estimados	3,66E-01	9,5	0,80	1,620	1,480
	Valores obtidos	5,22E-03	9,6	0,76	1,649	1,505
9.3	Valores estimados	8,65E-05	16,8	0,86	1,660	1,430
	Valores obtidos	1,41E-06	16,4	0,85	1,67	1,44

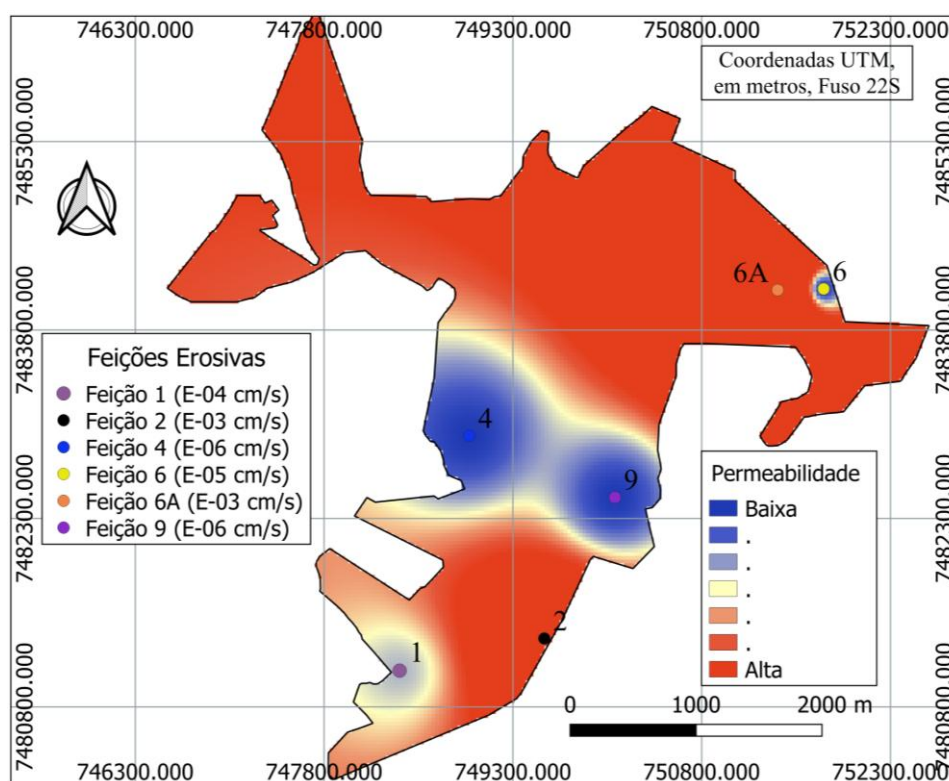


Figura 36: Localização das Erosões no Mapa de Permeabilidade de São Manuel (* valores estimados)

Os coeficientes de permeabilidade obtidos no laboratório são condizentes com os valores estimados pela literatura, por terem a mesma ordem de grandeza dos coeficientes, exceto para a feição 6A, em que apresentou ordem de grandeza 10^{-3} cm/s quando o estimado foi em 10^{-1} cm/s. Entretanto, o valor estimado em 10^{-1} cm/s condiz com uma faixa

granulométrica de areia grossa a pedregulhos, o que não pode ser observado com a curva granulométrica desse solo. Os índices físicos obtidos após a realização do ensaio são compatíveis com os índices físicos que os locais das feições possuem.

É importante ressaltar que este tipo de ensaio não é o ideal para determinar o parâmetro, uma vez que a moldagem dos corpos de prova muda a estrutura do solo. O ideal seria realizar ensaios de campo, porém devido à impossibilidade de executá-los e pela proximidade dos resultados obtidos em laboratório com os valores estimados, optou-se por usar esses valores de coeficiente de permeabilidade.

Erodibilidade do solo

A Tabela 16 mostra os resultados de erodibilidade em cada feição, com a respectiva classificação e a Figura 37 ilustra o mapa de erodibilidade na área urbana de São Manuel.

Tabela 16: Resultado dos ensaios de erodibilidade

Feição	Índice de Absorção (S)	Perda de Massa por imersão (P)	Erodibilidade (E)	Classificação
1	0,4	75,3	0,2	Alta Erodibilidade
2	0,1	1,8	2,8	Baixa Erodibilidade
4	0,2	1,2	7,4	Baixa Erodibilidade
6	0,5	76,8	0,2	Alta Erodibilidade
6A	0,5	90,1	0,2	Alta Erodibilidade
9	1,3	19,6	2,6	Baixa Erodibilidade

A Figura 38 mostra o resultado da erodibilidade dos solos das feições erosivas em função dos ensaios de perda de massa por imersão e índice de absorção. A linha em vermelho distingue os solos em alta erodibilidade e em baixa erodibilidade em função do limite proposto por Pejon (1992). Assim, as feições 1, 6 e 6A apresentaram alta erodibilidade, todas com valores de $E = 0,2$, enquanto que as feições 2, 4 e 9 apresentaram baixa erodibilidade, com E de 2,8, 7,4 e 2,6 respectivamente.

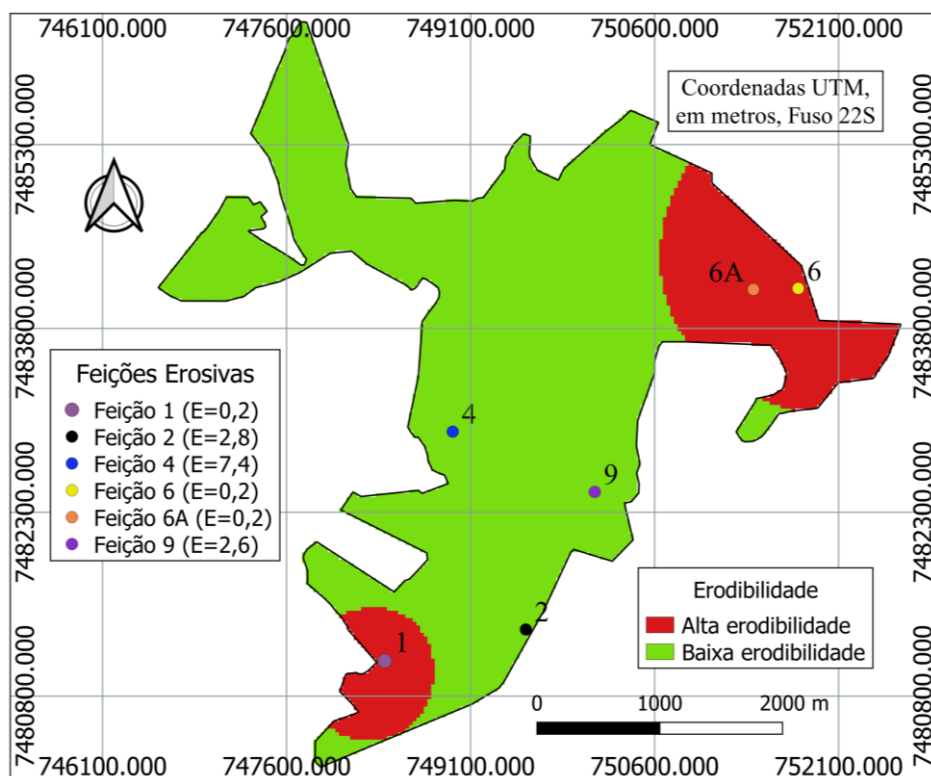


Figura 37: Localização das Erosões no Mapa de Erodibilidade de São Manuel (* valores estimados)

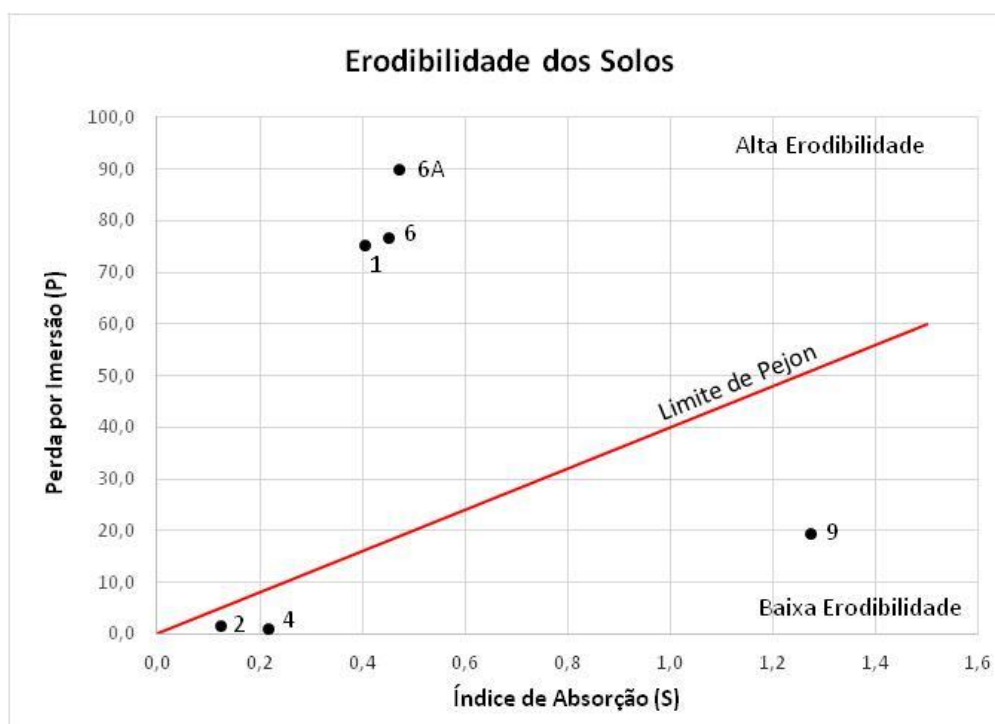


Figura 38: Erodibilidade do solo em função da absorção de água e da perda de massa por imersão das feições erosivas

4.3.3 Pluviosidade

A Figura 39 representa a locação das erosões no Mapa Pluviométrico de São Manuel gerado no *QGIS*. É possível observar que as feições 1 e 2 estão localizadas nas áreas mais claras do mapa, enquanto as 4, 5, 6, 6A, 7 e 8 estão situadas nas áreas mais escuras, e, portanto, possuem uma pluviometria estimada maior. As feições 3 e 9 estão localizadas entre as duas estações pluviométricas, possuindo uma pluviosidade estimada média. Nota-se que as pluviometrias mensuradas nas estações pluviométricas foram baixas, e levando-se em consideração que esses dados são provenientes de médias anuais, a diferença na pluviometria é praticamente nula.

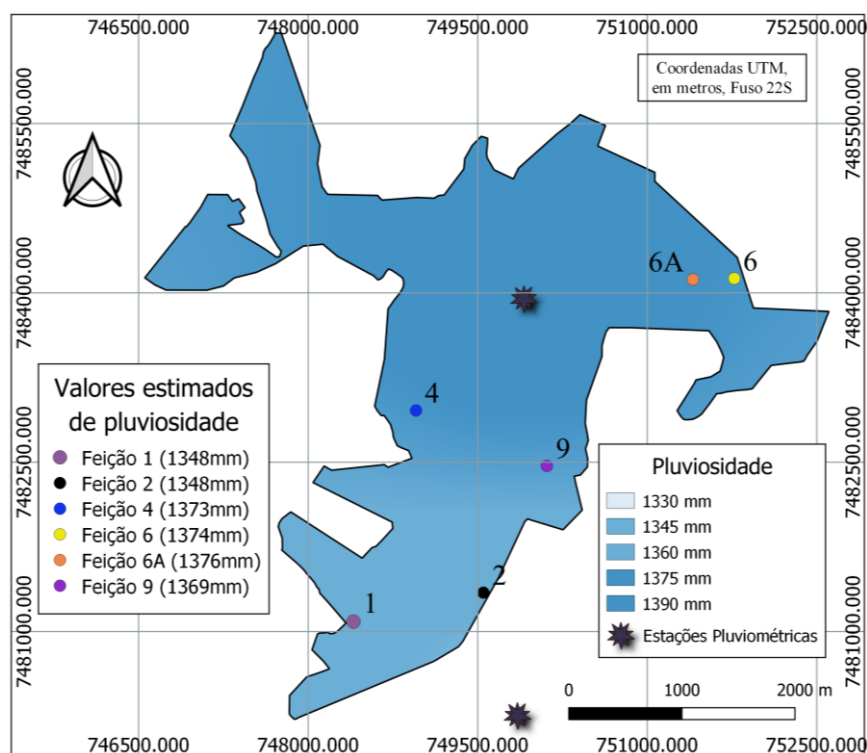


Figura 39: Locação das Erosões no Mapa Pluviométrico de São Manuel

4.3.4 Uso e Ocupação

Ao todo, o uso e ocupação resultaram em cinco categorias, com os respectivos valores de fatores atribuídos, conforme Costa *et al.* (2018), que são: locais com reservatórios de água artificiais, rios (valor 1), mata ciliar (valor 2), pastagem, linha de transmissão, pequenas propriedades rurais (valor 3), floresta de reflorestamento (valor 10),

e solo exposto, área urbanizada, postos de gasolina, estradas, horticultura e fazenda de suínos e aves (valor 30).

A Figura 40 ilustra o uso e ocupação de parte da área urbana de São Manuel. Nota-se que as feições 7 e 8 estão localizadas nas margens de rios, e por isso, adotou-se 1 como valor para o fator influenciador. Para a feição 1 se adotou valor 2,0, por se tratar de uma área de mata ciliar. Para as feições 2 e 4, adotou-se valor 10, pois estão situadas em local de floresta de reflorestamento. As feições 3, 6 e 6A estão localizadas em local de pastagem, e, portanto, adotou-se valor de 3 para o fator influenciador. Por fim, para as feições 5 e 9, localizadas na área urbanizada, adotou-se 30 para o fator influenciador. A Tabela 17 sintetiza os valores atribuídos a cada feição erosiva.

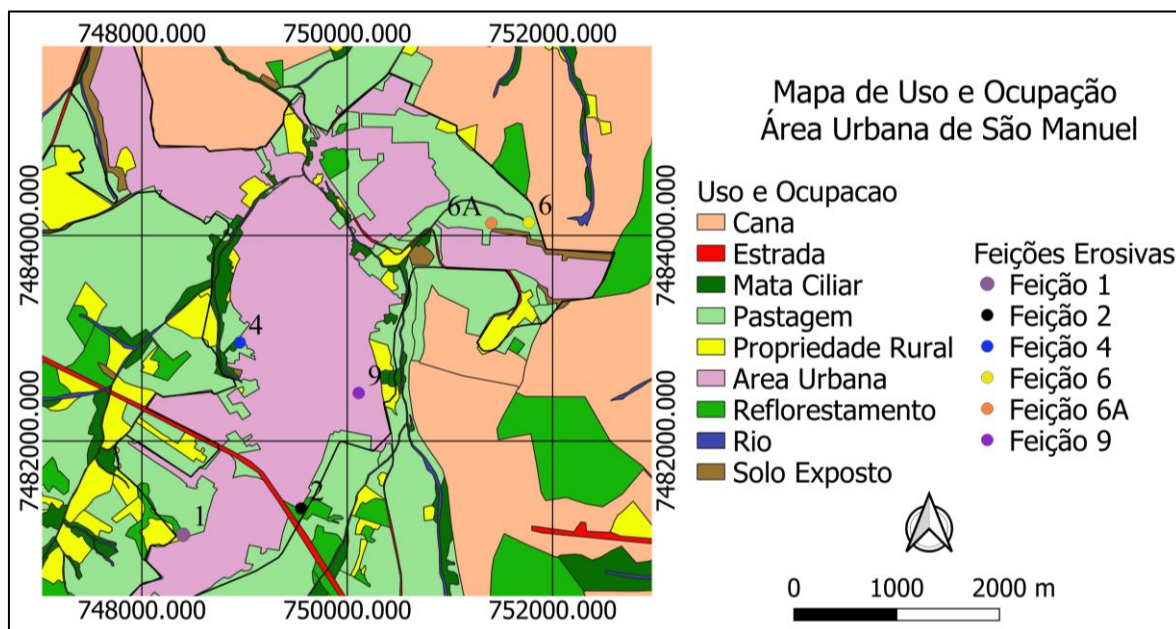


Figura 40: Mapa de Uso e Ocupação da Área Urbana de São Manuel

Tabela 17: Valores adotados para uso e ocupação das feições de acordo com o proposto por Costa *et al.* (2018)

Feição	Fator de Uso e Ocupação
Feição 01	02
Feição 02	10
Feição 03	03
Feição 04	10
Feição 05	30
Feição 06	03
Feição 6.A	03
Feição 07	01
Feição 08	01
Feição 09	30

4.4 Determinação dos Índices de Erosão

A seguir estão os resultados obtidos nas diferentes metodologias para a determinação dos índices de erosão com as suas respectivas análises.

4.4.1. Banco de Dados

Na Tabela 18 é mostrado o conjunto de fatores de influência nos processos erosivos que foram determinados, junto das medidas de média e desvio padrão das amostras.

Tabela 18: Conjunto de fatores de influência nos processos erosivos

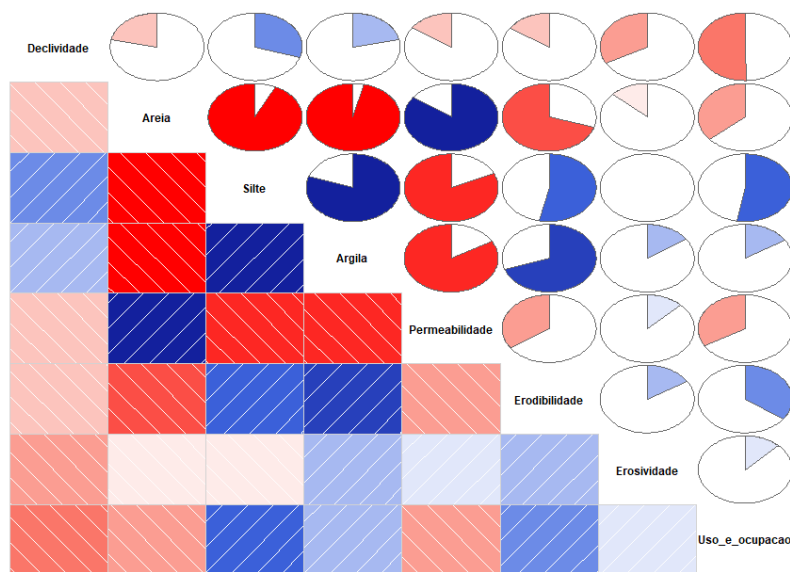
Feições	Variáveis							
	Declividade	% de Areia	% de Silte	% de Argila	Coef. de Permeabilidade	Erodibilidade dos solos (E)	Pluviosidade	Uso e ocupação
1	7,5	80	8	12	3,8E-04	0,2	1348	2
2	4,1	85	5	9	2,2E-03	2,8	1348	10
4	5,6	73	9	18	1,9E-06	7,4	1373	10
6	4,7	81	6	13	2,8 E-05	0,2	1374	3
6A	5,1	88,5	4	6	5,2E-03	0,2	1376	3
9	4,3	78	9	12	1,4*E-06	2,6	1369	30
Média	5,22	80,9	6,8	11,7	1,30E-03	2,23	1364,6	9,6
Sd	1,13	5,4	2,1	4,0	2,10E-03	2,81	13,2	10,6

A Tabela 19 é a tabela de correlação dos conjuntos de dados, e a Figura 41 mostra respectivo correlograma. Apesar do correlograma mostrar que não há correlação entre silte e pluviosidade (círculo sem coloração), pela tabela de correlação é possível observar, apesar de baixa, que há uma correlação inversa entre eles. De fato a ocorrência da chuva pouco depende dos outros fatores. Entretanto, de uma forma geral, todos os parâmetros, inclusive a pluviosidade e a erodibilidade influenciam nos processos erosivos, mesmo a erodibilidade sendo intrínseca do material.

As correlações também indicam que a permeabilidade é elevada quando se tem um alto teor de areia (correlação de 0,849) e, consequentemente, baixos teores de silte de argila (correlações de -0,820 e -0,833). O que é comprovado pelos valores típicos de coeficiente de permeabilidade para argilas (menor que 10^{-7} cm/s), siltes (entre 10^{-4} a 10^{-7} cm/s) e areias (10^{-1} cm/s a 10^{-5} cm/s) (PINTO, 2006).

Tabela 19: Matriz de Correlação dos dados originais (erodibilidade = E)

	Decliv.	Areia	Silte	Argila	Perme.	Erodib.	Pluv.	Uso/Ocu.
Decliv.	1.000	-0.215	0.304	0.215	-0.154	-0.156	-0.329	-0.505
Areia	-0.215	1.000	-0.927	-0.964	0.849	-0.702	-0.131	-0.365
Silte	0.304	-0.927	1.000	0.804	-0.820	0.534	-0.001	0.527
Argila	0.215	-0.964	0.804	1.000	-0.833	0.696	0.156	0.161
Perme.	-0.154	0.849	-0.820	-0.833	1.000	-0.346	0.127	-0.335
Erodib.	-0.156	-0.702	0.534	0.696	-0.346	1.000	0.163	0.349
Erosiv.	-0.329	-0.131	-0.001	0.156	0.127	0.163	1.000	0.126
Uso/Ocu.	-0.505	-0.365	0.527	0.161	-0.335	0.349	0.126	1.000



Legenda: Escala de cor: vermelha indica correlação negativa e azul correlação positiva, sendo coloração mais escura para correlações maiores em módulo. Escala de preenchimento dos círculos: quando mais próximo de 1,0 a correlação mais preenchido é o círculo, sendo o preenchimento a partir do sentido horário para correlações positivas e do sentido anti-horário para correlações negativas.

Figura 41: Correlograma da matriz de correlação R

Levando-se em consideração que para a Tabela 19 e para a Figura 41, um valor de E elevado, significa uma baixa erodibilidade, as correlações entre erodibilidade e as frações granulométricas indicam que há alta erodibilidade quando há menor teor de areia e maiores teores de finos.

4.4.2. Método A: Análise de Componente Principal

A Tabela 20 mostra os autovalores, seguida dos autovalores acumulados, a variância total e a variância acumulada de cada componente principal determinado. Nela é possível notar que as três primeiras componentes explicam juntas 87,11% da variabilidade

total dos dados, sendo que a CP1 explica individualmente 53,05%, a CP2 21,66% e a CP3 12,40% dos dados.

Tabela 20: Autovalores e variância acumulada de cada componente principal				
Componente Principal	Autovalores (λ)	Autovalores Acumulados	Variância Total (%)	Variância acumulada (%)
CP1	4,243777	4,2438	53,05	53,05
CP2	1,732991	5,9768	21,66	74,71
CP3	0,9918056	6,9686	12,40	87,11
CP4	0,6127712	7,5813	7,66	94,77
CP5	0,4186546	8,0000	5,23	100,00
CP6	5.850642 e-16	8,0000	0,00	100,00
CP7	2.070318 e-17	8,0000	0,00	100,00
CP8	-6.767241e-16	8,0000	0,00	100,00

A Figura 42 traz o gráfico *Scree Plot*. A maior queda entre as componentes estão entre a CP1 e a CP2, seguida da queda entre a CP2 e a CP3. As seguintes, entre as CPs 3 e 4 e entre as CPs 4 e 5, possuem uma pequena diferença de queda entre elas. A linha pontilhada sobre o autovalor de 1,0 traz uma visualização de regra de Kaiser. Analisando-a em conjunto com a Tabela 20, as componentes que possuem autovalor acima de 1,0 são as CPs 1 e 2, sendo a CP3 com um valor bem próximo a 1,0. Analisando as três regras, decidiu-se então extrair as 3 primeiras componentes principais.

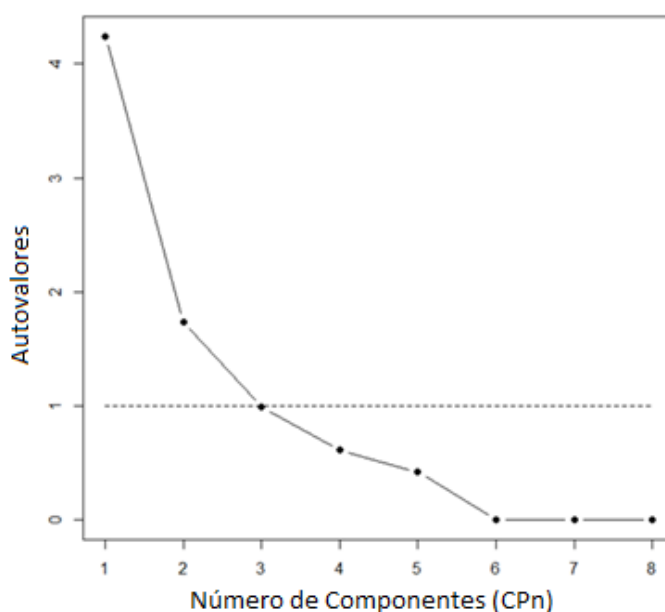


Figura 42: *Scree Plot* dos autovalores dos componentes principais

A Tabela 21 mostra os autovetores das três componentes principais. Os fatores que mais influenciam na CP1 são os relacionados à textura do solo, seguido da permeabilidade. Nela há evidência de que a permeabilidade aumenta quando há uma maior quantidade de areia e uma menor quantidade de silte e argila no solo. Como os autovetores das frações são maiores, em módulo, do que o autovetor relacionado à permeabilidade, esta componente principal foi chamado de índice textural (CP1).

Tabela 21: Autovetores da matriz de correlação dos componentes principais e dos fatores influenciadores

Variável	CP1	CP2	CP3
Declividade	-0.06922800	0.68939469	0.1617244
Areia	0.48201439	-0.04584120	-0.1015093
Silte	-0.45632114	0.08081319	-0.1531356
Argila	-0.45603138	0.09248551	0.2554761
Permeabilidade	0.41992276	-0.13788144	0.2159496
Erodibilidade	-0.34486131	-0.22484086	0.2043584
Pluviosidade	-0.04396649	-0.44047113	0.7112591
Uso e Ocupação	-0.22243765	-0.49393287	-0.5296569

Os fatores que mais influenciam na componente 2 são a declividade, seguida do uso e ocupação e da pluviosidade, e por isso, esta CP foi chamada de índice de declividade. Este índice indica que as feições que ocorreram em declividades elevadas possuíam baixos valores para os parâmetros de pluviosidade e de uso e ocupação. Isso é o que ocorre com a feição 01, a qual possui a maior declividade (7,5%) entre as feições e apresentou baixa pluviosidade (1348 mm) estando localizada em local de mata ciliar (valor 2 de uso e ocupação atribuído).

Na CP3, chamada de índice de pluviosidade, o fator com maior influência é o da pluviosidade, seguido do uso e ocupação. Esta componente mostra que pluviosidade alta (maior precipitação) ocorreu em áreas em que foram atribuídos baixos valores de uso e ocupação. De fato isso ocorreu na feição 6A, a qual possuiu o maior valor de pluviosidade estimada (1376 mm) entre as feições e está localizada em local de pastagem (valor 03 atribuído de uso e ocupação).

As equações 10, 11 e 12 representam os índices gerados pela *Análise de Componente Principal*, em que Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 , Y_5 , Y_6 , Y_7 e Y_8 são os fatores influenciadores, declividade, areia, silte, argila, permeabilidade, erodibilidade, pluviosidade e uso e ocupação respectivamente.

$$CP1 = \text{Índice textural} = -0.06922800Y_1 + 0.48201439Y_2 - 0.45632114Y_3 - 0.45603138Y_4 + 0.41992276Y_5 - 0.34486131Y_6 - 0.04396649Y_7 - 0.2224370Y_8 \quad (10)$$

$$CP2 = \text{Índice de declividade} = 0.68939469Y_1 - 0.04584120Y_2 + 0.08081319Y_3 + 0.09248551Y_4 - 0.13788144Y_5 - 0.22484086Y_6 - 0.44047113Y_7 - 0.49393287Y_8 \quad (11)$$

$$CP3 = \text{Índice de pluviosidade} = 0.1617244Y_1 - 0.1015093Y_2 - 0.1531356Y_3 + 0.2554761Y_4 + 0.2159496Y_5 + 0.2043584Y_6 + 0.7112591Y_7 - 0.5296569Y_8 \quad (12)$$

Para gerar os *scores* foram aplicados nas equações 10, 11 e 12 os valores do banco de dados (Tabela 22). Os *scores* foram normalizados em relação ao módulo da média, equação 8 (Tabela 23).

Tabela 22: *Scores* dos índices de erosão

Feição	CP1	CP2	CP3
Feição 01	-30,8465	-591,4057	952,4680
Feição 02	-28,1527	-599,1132	947,5752
Feição 04	-42,6672	-608,6216	969,6813
Feição 06	-31,0681	-605,1972	970,1921
Feição 6.A	-23,4965	-607,3196	970,0115
Feição 09	-40,0528	-617,3408	953,052
Média	-32,7140	-604,8330	960,0497

Com os *scores* normalizados foram gerados os mapas das 3 componentes principais. A Figura 43 representa o mapa da CP1, chamado de índice textural, a Figura 44 representa a CP2, chamada de índice de declividade e a Figura 45, a CP3, chamada de índice de pluviosidade.

Tabela 23: *Scores* normalizados dos índices de erosão

Feição	CP1	CP2	CP3
Feição 01	1.867476	13.42729	-7,5817
Feição 02	4.561273	5.719813	-12.92148
Feição 04	-9.95329	-3.788546	9.184638
Feição 06	1.645898	-0.3641956	9.69538
Feição 6.A	9.217503	-2.486605	9.51483
Feição 09	-7.338861	-12.50776	-7.444686

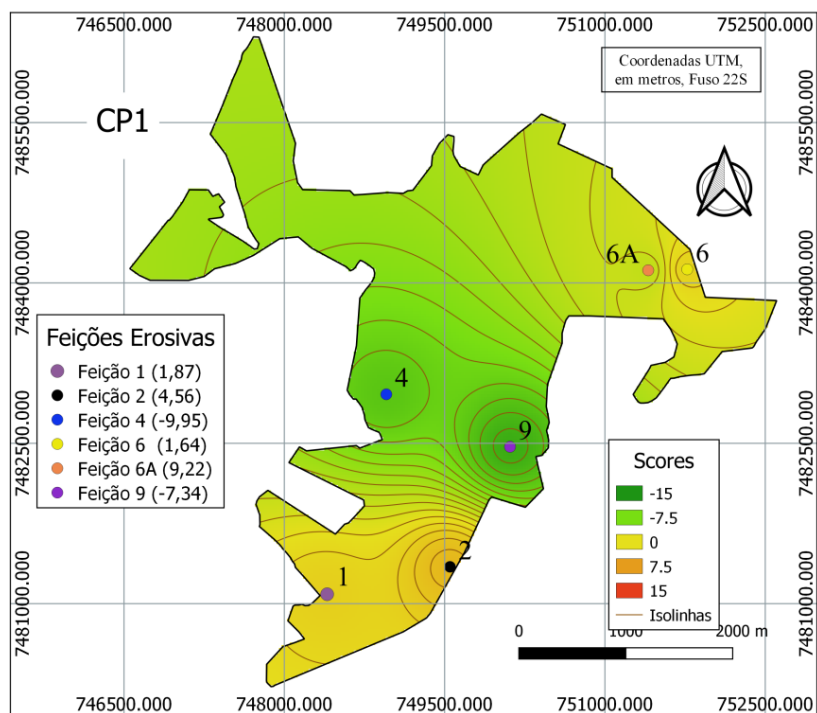


Figura 43: Mapa do índice textural

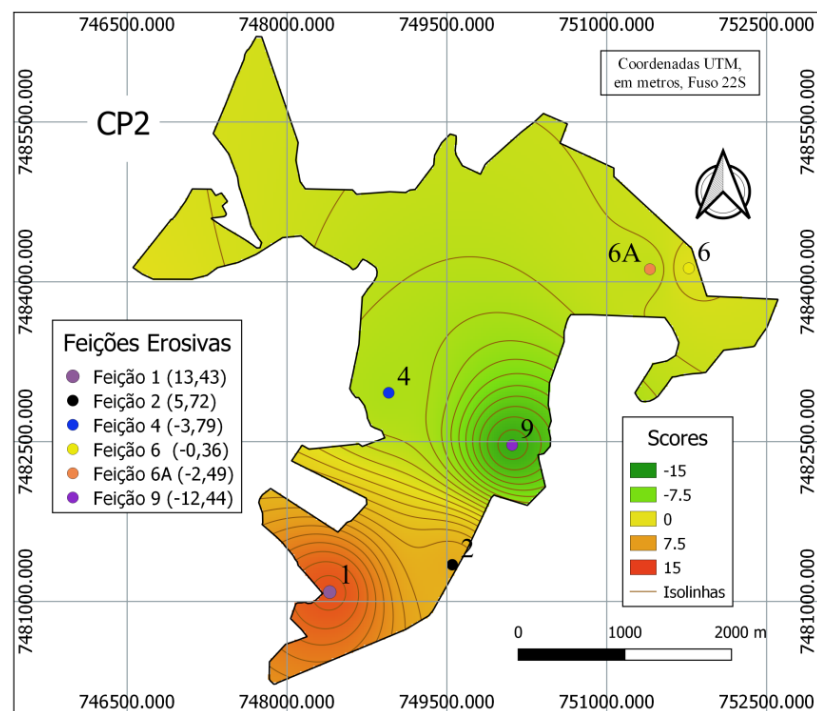


Figura 44: Mapa do índice declividade

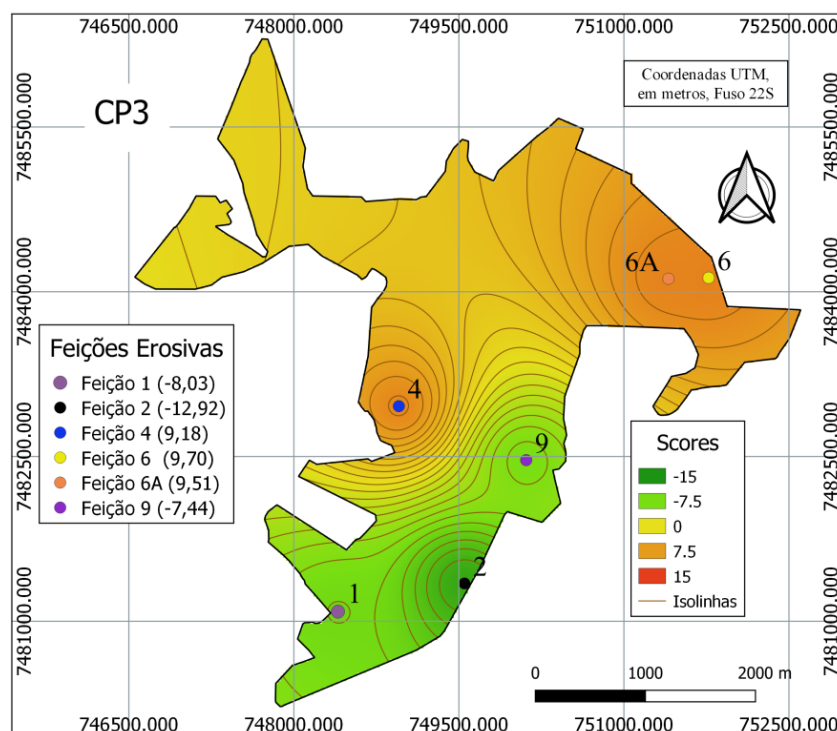


Figura 45: Mapa do índice de pluviosidade

4.4.3. Método B: Análise de Fator

Na Tabela 24 é mostrado o banco de dados padronizado obtido a partir da Tabela 18 com centralização da média em zero e escala em desvio padrão, que de acordo com o Teste de Bartlett ($p\text{-valor} = 2,448 \times 10^{-22}$) é adequado para utilização da análise fatorial.

Tabela 24: Banco de dados com os fatores padronizados

Feições	Variáveis							Uso e ocupação
	Declividade	% de Areia	% de Silte	% de Argila	Coef. de Permeab.	Erodibilidade dos solos (E)	Pluviosidade	
1	1.842	-0.163	0.546	0.083	-0.438	-0.723	-1.282	-0.724
2	-0.892	0.755	-0.858	-0.661	0.418	0.201	-1.264	0.032
4	0.271	-1.464	1.014	1.570	-0.620	1.837	0.656	0.032
6	-0.388	0.015	-0.390	0.330	-0.608	-0.723	0.660	-0.629
6A	-0.071	1.402	-1.326	-1.405	1.869	-0.723	0.873	-0.629
9	-0.762	-0.540	1.014	0.083	-0.621	0.130	0.357	1.919

A Figura 46 e a Tabela 25 mostram o gráfico *Scree Plot* e as variâncias de cada componente. Pelos mesmos parâmetros utilizados no método A (queda no gráfico, autovalores acima de 1,0 e variância acumulada acima de 80%), decidiu-se extrair os três

primeiros componentes, uma vez que, juntos, explicam 87,11% da variabilidade total dos dados.

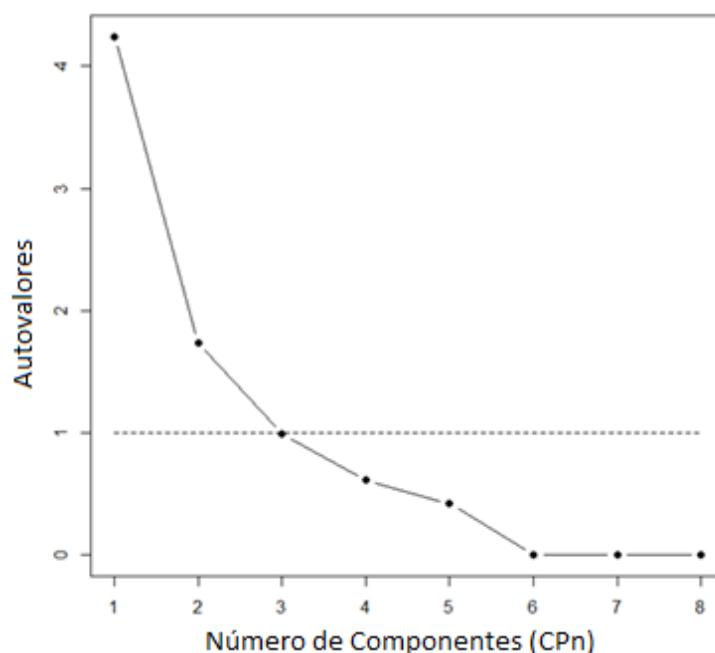


Figura 46: Scree Plot dos autovalores do método B

Tabela 25: Autovalores e variância acumulada

Componente	Autovalores Iniciais			Extração pela variância acumulada		
	Autovalores (λ)	Variância Total	Variância acumulada (%)	Autovalores (λ)	Variância Total	Variância acumulada (%)
1	4,243777	0,5304722	53,05	4,243777	0,5304722	53,05
2	1,732991	0,2166239	74,71	1,732991	0,2166239	74,71
3	0,9918056	0,1239757	87,11	0,9918056	0,1239757	87,11
4	0,6127712	0,07659640	94,77			
5	0,4186546	0,05233182	100,00			

A Tabela 26 traz as comunalidades de cada variável. Os três componentes extraídos conseguiram representar acima de 50% todas as variáveis, exceto a pluviosidade, os quais explicam 22% apenas. Isso pode ter ocorrido devido ao fato da variável possuir valores estimados e serem provenientes de apenas duas estações pluviométricas, o que pode ter tornado os dados não confiáveis.

Na Tabela 27 estão listadas as cargas fatoriais dos componentes extraídos por componentes principais com os dados rotacionados pelo método Varimax. Nela é possível notar que os fatores influenciadores que mais influenciam na componente 1 são a argila (1,013), na componente 2 é o uso e ocupação (0,977) e na componente 3 é a declividade (-0,701).

Tabela 26: Comunalidades

Fator influenciador	Inicial	Extração
Declividade	1,0	0.7477
Areia	1,0	1.0359
Silte	1,0	0.9803
Argila	1,0	1.0706
Permeabilidade	1,0	0.7121
Erodibilidade	1,0	0.5413
Pluviosidade	1,0	0.2210
Uso e Ocupação	1,0	1.0656

Tabela 27: Cargas Fatoriais da matriz rotacionada (Varimax)

Fator Influenciador	Componentes		
	1	2	3
Declividade	0,256	-0,440	-0,704
Areia	-1,012		
Silte	0,901	0,335	-0,242
Argila	1,013	-0,140	0,159
Permeabilidade	-0,800	-0,192	0,187
Erodibilidade	0,624	0,105	0,374
Pluviosidade			0,464
Uso e Ocupação	0,261	0,968	0,209

Esperava-se que, entre os fatores relacionados à textura, o fator que mais influenciasse na componente fosse a areia. De acordo com a literatura, solos arenosos apesar de possuir uma maior permeabilidade e, conseqüentemente, menor escoamento superficial, possui uma maior dificuldade em formar agregados (SANTOS *et al.*, 2011), acarretando em uma maior facilidade no destacamento e no transporte das partículas. Enquanto solos mais finos, apesar de possuírem uma permeabilidade mais baixa, e, com isso, um maior escoamento superficial, tem mais facilidade em se agregar (VEZZANI e MIELNICZUK, 2011), tornando o desprendimento e o transporte das partículas mais difíceis.

Vale ressaltar que a argila e a areia apresentaram praticamente o mesmo valor de carga fatorial, em módulo. Por isso, outras análises, modificando o banco de dados, foram realizadas para poder comparar as cargas fatoriais (Apêndice B).

Foram feitas três outras análises modificando os fatores relacionados à textura do solo: somente com as frações de argila e areia, retirando a fração de silte; somente com a

fração de areia, sem constar a fração de argila e silte; e com fração de areia e com um fator chamado de finos, que foi composto pela soma de argila e silte.

Para os dois primeiros bancos de dados (areia e argila; e somente areia) a plataforma R não conseguiu calcular o valor de p para o Teste de Bartlett. Sem o teste, não é possível garantir a aplicabilidade dos dados para o método de análise fatorial, impossibilitando garantir a veracidade das cargas fatoriais obtidas.

Para o terceiro banco de dados (areia e finos), chegou-se em um p -valor = 5.695854E-19 para o Teste de Bartlett, garantindo a aplicabilidade dos dados. Entretanto, para este método a quantidade de finos também obteve uma carga fatorial maior em módulo do que a fração de areia. Isso fez com que se mantivesse a escolha do fator argila como fator mais importante na componente 1.

A Tabela 28 mostra a importância de cada fator influenciador escolhido para cada componente extraído. A importância foi calculada pelo produto entre a variância de cada fator extraído e a carga fatorial rotacionada ao quadrado. A argila possuiu uma importância de 54,43%, o uso e ocupação 20,68% e a declividade de 6,09%. Ao calcular a importância para a areia, chegou-se em um valor de 54,43%, mesmo valor da argila, o que fez manter a argila como o fator a ser utilizado no índice do método B.

Tabela 28: Ordem de importância dos fatores influenciadores

Fator Influenciador	Carga rotacionada	Rotação quadrada	Variância do componente	Importância (I)
Argila	1,013	1,026	0,5305	0,5443
Uso e Ocupação	0,977	0,954	0,2166	0,2068
Declividade	-0,701	0,491	0,1240	0,0609

A importância (I) de cada fator influenciador calculada foi utilizada para determinar os índices de erosão através da equação 13:

$$IE_{feição} = \frac{(I_{Argila} * F_{Argila}) * (I_{Uso e Ocupação} * F_{Uso e Ocupação})}{(I_{Declividade} * F_{Declividade})} \quad (13)$$

Em que:

I_{Argila} , $I_{Uso e Ocupação}$, $I_{Declividade}$ são as importâncias da argila (0,5443), do uso e ocupação (0,2068) e da declividade (0,0609) e F_{Argila} , $F_{Uso e Ocupação}$, $F_{Declividade}$ são dados de argila, uso e ocupação e da declividade de cada feição.

A Tabela 29 traz os valores dos fatores para cada feição e os índices de cada feição calculados. Enquanto a Figura 47 ilustra o mapa gerado no SIG com os índices de cada feição.

Tabela 29: Índices de Erosão das Feições

Feição	Argila	Uso e Ocupação	Declividade	Índice de Erosão
1	12,00	2,00	7,48	5,93
2	9,00	10,00	4,12	40,36
4	18,00	10,00	5,55	59,92
6	13,00	3,00	4,74	15,20
6A	6,00	3,00	5,13	6,48
9	12,00	30,00	4,28	155,40

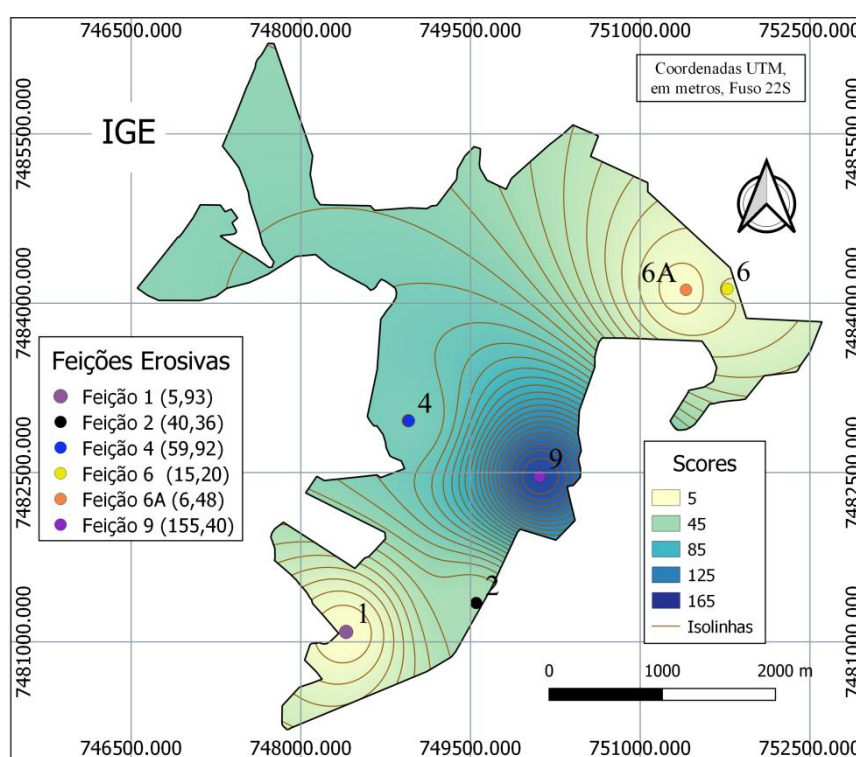


Figura 47: Mapa do índice de erosão (*valores estimados)

4.4.4. Análise dos mapas

A análise prévia dos mapas fundamentou-se na classificação das feições contidas na Tabela 13. Para facilitar, a Figura 48 ilustra todos os mapas desenvolvidos pelo método A. A Figura 48a ilustra o mapa desenvolvido a partir do CP1, chamado de Índice Textural, em que é possível observar que a única ravina que há na área urbana (feição 9) está localizada

na parte com o tom com o mais verde do mapa. Por outro lado, os pontos mais amarelados estão localizadas as voçorocas ativas 1, 2, e a voçoroca estabilizada 6.

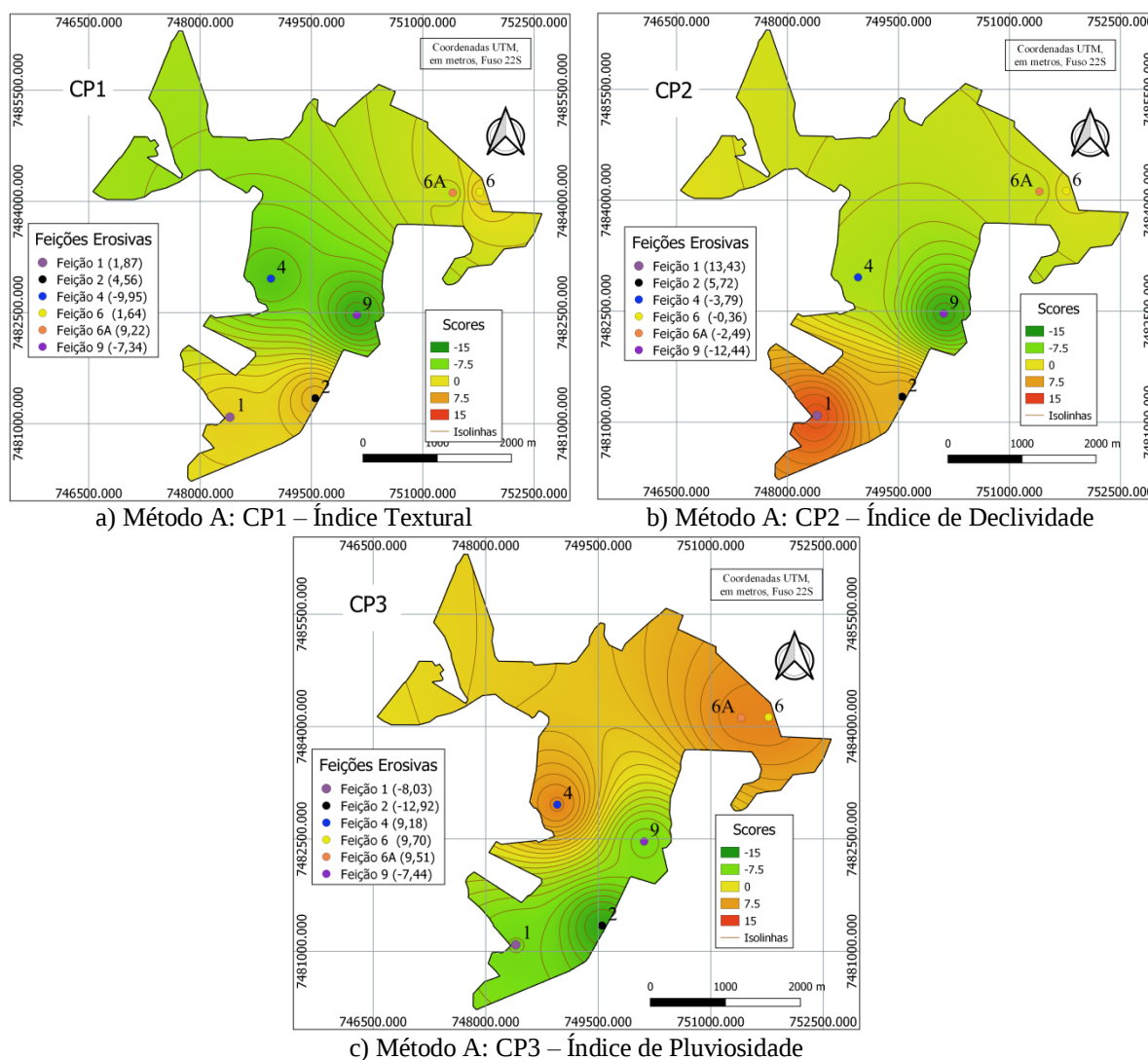


Figura 48: Comparação entre os mapas obtidos no método A (*valores estimados)

A Figura 48b ilustra o mapa da CP2, com maior influência da declividade. Neste mapa há dois pontos distintos nos quais estão localizadas a feição 1, classificada como voçoroca, e a feição 9, classificada como ravina. Ambas possuem os mesmos processos desencadeadores: pluvial e antrópico.

O último mapa do método A, o qual possui como principal fator influenciador a pluviosidade, ilustrado na Figura 48c, possui duas áreas distintas, uma compreendendo as feições 4, 6 e 6A e outra as feições 1, 2 e 9. Todas as feições foram classificadas como voçorocas, exceto a feição 9. Isto mostra que a pluviosidade não auxilia na diferenciação dos processos erosivos, o que era esperado, uma vez que este fator é derivado de média anual de chuva.

A Figura 47 ilustra o mapa elaborado com o método B, o qual possui a única ravina, feição 9, na área mais azulada e as voçorocas 1, 6 e 6A nas áreas mais amareladas.

Na Figura 49 estão apresentados, em uma única figura, os mapas dos fatores influenciadores determinados. Em relação ao mapa da CP1 (Figura 48 a), por ser mais influenciado pelas características das texturas do solo, o mapa se parece mais com o mapa da fração de argila (Figura 49 f), seguido do mapa de erodibilidade (Figura 49 c) e de permeabilidade (Figura 49 e). As feições 2 e 6A possuem menores quantidades de argila, e consequentemente as maiores permeabilidades. Em relação à permeabilidade, a feição 4 apresenta o menor valor de permeabilidade, entre as feições (10^{-6} cm/s).

O mapa da CP2 (Figura 48b) está mais relacionado com o mapa de declividade (Figura 49d), uma vez que o fator influenciador de maior relevância é a declividade. Apesar de não haver ligação entre dados de pluviosidade e de declividade, as feições 1 e 2, localizadas na parte mais avermelhada do mapa, são as feições que possuem as menores pluviosidades (1348mm), e, no caso da feição 01, a maior declividade (7,5%).

O mapa da CP3 (Figura 48 c) possui relação com o mapa da pluviosidade (Figura 49b). Os locais com os tons mais esverdeados (feições 1, 2 e 9) possuem as menores pluviosidade (feição 1 e 2, 1348mm; e feição 9, 1369mm). Sobrepondo o mapa hidrográfico ao mapa da CP3 (Figura 50), é possível notar que as partes mais alaranjadas do mapa estão localizadas mais próximas dos rios, enquanto que as mais esverdeadas estão localizadas mais distantes dos rios.

Apesar da equação do método B levar em consideração os parâmetros de argila, uso e ocupação e declividade, observa-se que também se relaciona com a erodibilidade (Figura 49c). As feições localizadas na parte esverdeada do mapa (feições 1, 6 e 6A) possuem alta erodibilidade.

De modo geral, os mapas provenientes do método A (Figura 48) se assemelham mais com o mapa do fator que cada um representa (CP1 – fator argila e areia, CP2 – fator declividade e CP3 – fator pluviosidade), dando a entender que, ao estudar de maneira isolada esses fatores, é possível compreender os processos erosivos. Entretanto, sabe-se que os processos são provenientes do conjunto dos fatores, o que faz com que o método B (Figura 47) seja mais eficiente que o método A. O método B propicia uma identificação mais diversificada com os mapas individuais dos fatores.

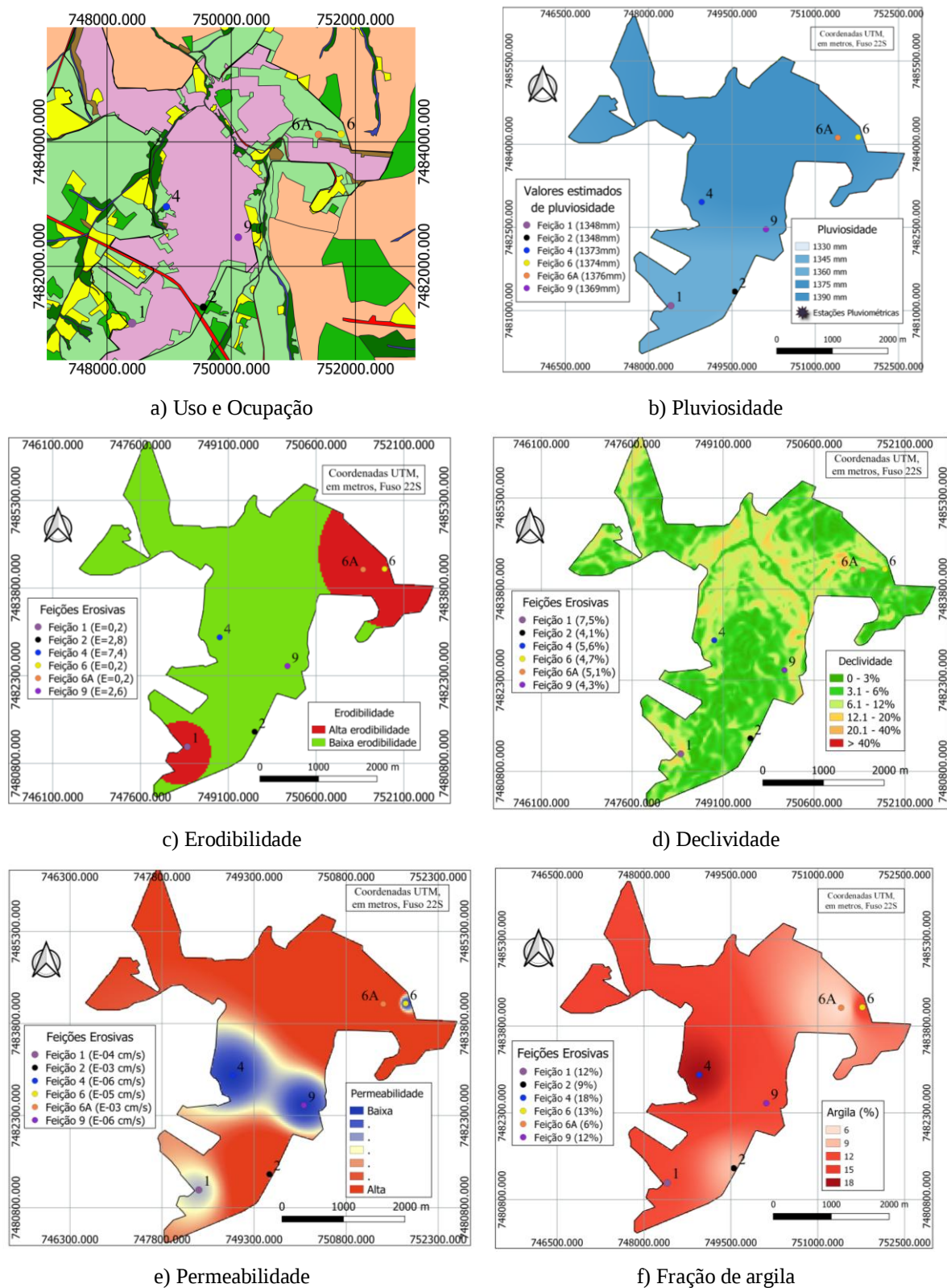


Figura 49: Comparação entre os parâmetros uso e ocupação, pluviosidade (valores maiores em azul mais escuro), erodibilidade (alta erodibilidade em vermelho e baixa erodibilidade em verde), declividade (menores declividades em verde, maiores em vermelho), permeabilidade (altas em vermelho e baixas em azul) e textura de solo (maior quantidade de areia em amarelo e maior quantidade de argila em vermelho) (*valores estimados)

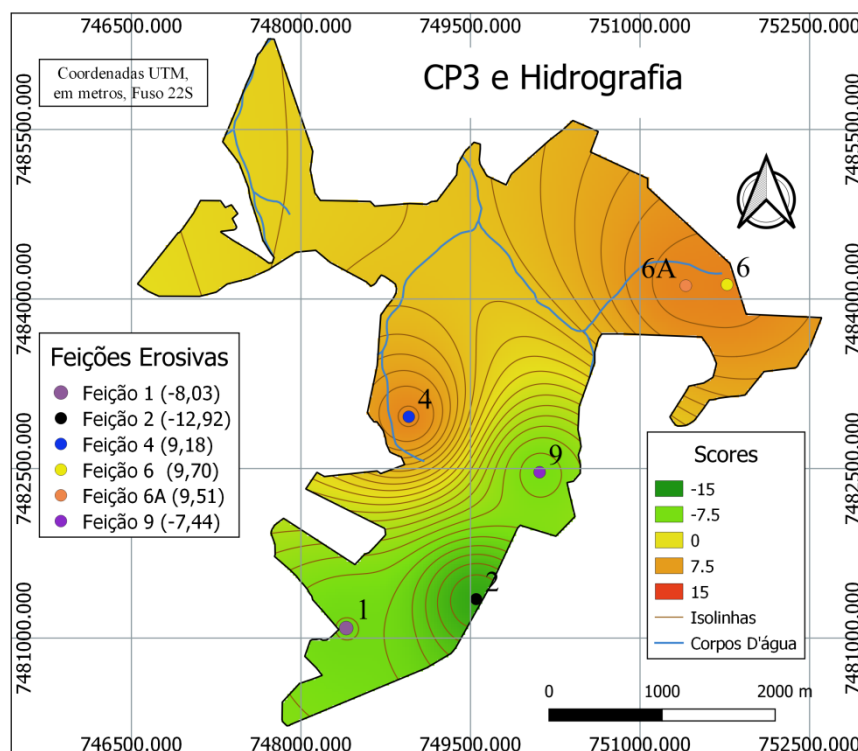


Figura 50: Sobreposição do mapa hidrológico sobre o mapa da CP3 (*valores estimados)

Ambos os métodos apresentam limitações, provavelmente devido à falta de informação de chuva (intensidade). Isso também pode ter ocorrido devido aos poucos números de feições em que foram determinados os fatores influenciadores. Também é importante ressaltar que todos os mapas gerados, de ambas as metodologias, devem ser utilizados apenas para a área urbana, pois os parâmetros determinados estão localizados na área urbana do município. Caso seja necessário analisar uma área fora do perímetro urbano, é preciso aumentar a malha de amostragem, considerando pontos com e sem erosão.

Entre os dois métodos, para reduzir o espaço amostral, o método B apresenta ser mais eficaz que o método A, uma vez que, determinados todos os parâmetros da área em estudo e a equação dos índices, basta mensurar os parâmetros utilizados na equação (textura; uso e ocupação; e declividade), nas novas áreas, para se gerar diferentes cenários na região. Enquanto, no método A, todos os parâmetros são necessários para gerar os valores dos três diferentes índices.

O método B se mostrou mais eficiente, pois o método A considerou os dados de pluviosidade na CP2 e na CP3. Cabe ressaltar que a pluviosidade foi resultante da interpolação de apenas duas estações pluviométricas, com dados relativamente homogêneos.

Também para o método B se notou a dificuldade de se analisar o parâmetro de uso e ocupação do solo (ver Tabela 29). Por exemplo, a feição 9 está localizada em área urbanizada (peso 30,0) e sofre influencia de tubulação de drenagem urbana. Por outro lado, a feição 6A está localizada em área de pasto (peso 3,0), porém também sofre influência de uma tubulação de drenagem urbana que chega ao local. Ambas encontram-se em desenvolvimento, apesar da primeira ser classificada como ravina e a outra como voçoroca. Dessa maneira, deve-se aprofundar o estudo da categorização dos pesos dados ao parâmetro de uso e ocupação.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Nas primeiras etapas da pesquisa foi possível identificar os processos erosivos e classificar as feições existentes na área urbana do município de São Manuel, definindo as cinco feições amostrais que foram consideradas para determinação dos Índices de Erosão pelas metodologias utilizadas.

Concluiu-se com esta etapa que a ação antrópica ocorrida durante o período de expansão urbana desencadeou, ou acelerou processos erosivos ao asfaltar ruas sem as medidas técnicas necessárias para adequado manejo das águas pluviais.

Isso faz acreditar que para evitar o surgimento de novas feições deve-se fazer o correto manejo das águas pluviais do município, uma vez que o solo é propício para o desenvolvimento dos processos erosivos.

Na etapa seguinte, de determinação dos fatores influenciadores dos processos erosivos, se estimaram a declividade do terreno, a pluviosidade e o uso e ocupação do local das feições com o uso da plataforma SIG e, também, se determinaram a textura do solo, o coeficiente de permeabilidade e a erodibilidade dos solos através de ensaios de laboratório. Os parâmetros foram fundamentais no desenvolvimento dos índices.

Uma vez que as duas metodologias mostraram a importância de cada parâmetro dentro da referida equação, foram elaborados mapas que possibilitaram a compreensão dos resultados. Nesse sentido, foi possível concluir que o mapa que melhor representa a realidade, entre os mapas do método A, foi o relacionado a CP1 (índice textural). Este mapa, apesar de não possuir uma relação alta com uso e ocupação, permitiu ter uma ideia da localização das feições em relação à distância com as edificações, mesmo este parâmetro não tendo sido levantado. A feição 9, por exemplo, está inserida totalmente

dentro de uma área urbana, enquanto as feições 6 e 6A estão inseridas em uma área de contribuição composta principalmente por pasto, com pouca área urbanizada, por isso foi considerada como categoria pasto. Este resultado está diretamente relacionado ao uso e ocupação, parâmetro que não foi o mais influenciador na CP1, do método A, mas sim no índice do mapa do método B. Vale ressaltar a necessidade de um estudo mais aprofundado da categorização do parâmetro uso e ocupação do solo, visto que as condições da feição 6A se aproximam mais da feição 9 do que da feição 6, apesar de ambas (feições 6 e 6A) receberem o mesmo peso 3,0.

Em relação aos métodos utilizados na pesquisa, foi possível concluir que a metodologia B é a mais adequada devido a alguns fatores, entre eles:

- O método A apresenta correlações entre as feições e alguns parâmetros que são contraditórias, ou que não apresentam correlações técnicas, como o caso com as correlações entre a pluviosidade e os demais parâmetros.
- O método B possui maior facilidade de análise, quando aplicado à problemas práticos, devido ao método gerar um único índice;
- O método B possui maior facilidade de extrapolação da área estudada, uma vez que a equação do método B não utiliza todos os parâmetros;

É importante ressaltar que, pelo parâmetro de uso e ocupação possuir uma variação maior nos valores atribuídos na equação do método B, deve-se tomar um cuidado especial na adoção desses dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24:141-151, 2000

ALLMARAS, R. R, BURWELL, R. E, LARSON, W. E, HOLT, R. F. USDA (US Department of Agriculture). Conservation Research Report N° 7. **Total Porosity and Random Roughness of the Interrow Zone As Influenced By Tillage**. Washington, p.01-22 , jun. 1966.

ALMEIDA, W. S., CARVALHO, D. F., PANACHUKI, E., VALIM, W. C., RODRIGUES, S. A., VARELLA, C. A. A. Erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.51, n.9, p.1110-1119, 2016.

ARANTES, L. T. Limiares topográficos de processos erosivos na bacia do Rio Bonito (SP) obtidos a partir de modelo digital de elevação de dados de radar (PALSAR/ALOS). Ilha Solteira, 2019. 96p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019.

ARAÚJO, T. P. Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro/ SP. São Carlos, 2011. 181p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

ARAÚJO, G. H. S.; GUERRA, A. J. T.; ALMEIDA, J. R. *Gestão ambiental de áreas degradadas*. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 2008, 320p.

BAUER, T., STRAUSS, P., GRIMS, M., KAMPTNER, E., MANSBERGER, R., SPIEGEL, H. Longterm agricultural management effects on surface roughness and consolidation of soils. *Soil Tillage Res.* 151, 28–38, 2015.

BERTOLANI, Fernando. C, GONZÁLEZ, Antonio. P, LIÑARES, Marcos. L, VÁZQUEZ, Eva. V, MIRANDA, José. G. V. Física de solo. Variabilidade espacial da rugosidade superficial do solo medida com rugosímetros de agulha e laser. Campinas, 2000.

BERTONI, J. & LOMBARDI, N. F. **Conservação do Solo**. 9 ed. São Paulo: Editora Ícone, 355p. 2014.

BEZERRA, J. F. R., GUERRA, A. J. T., RODRIGUES, S. C. Monitoramento e avaliação de geotêxteis na recuperação de um solo degradado por erosão, Fazenda Experimental do Glória, Uberlândia-MG. *In: Anais do VI Simpósio Nacional de Geomorfologia - SINAGEO*. Goiânia. 2006.

BITAR, O. (ORG) **O meio físico em Estados de Impacto Ambiental**. 25p. São Paulo: IPT, Boletim 56. 1990.

BOARDMAN, L. Soil erosion on the Sollth Downs: A review. **Soil erosion**. Editores: Boardllan, L., Foster, I.D.L. e Dearing, J. p.87-105. 1990

BOARDMAN, L. Soil erosion at Albourne, West Sussex, Inglaterra. **Applied** v. 3, p.317-329. 1983.

BOARDMAN, J, BURT, T.P, EVANS, R , SLATTERY, M.C, e SHUTTLEWORTH, H.. Soil erosion and flooding as a result of a summer thunderstorm in Oxfordshire and Berkshire. **Applied jeogmphy**, v.16, p.21-34. 1993.

BOOTH, D. B., FISCHENICH, C. J. A channel evolution model to guide sustainable urban stream restoration. **Area** v.47. n.4, p.408–421. 2015.

BRITO, J. L. S, LIMA, S. C, SHIKI, S., MOREIRA, M. R. Uso do geoprocessamento na estimativa da perda de solos por erosão laminar em Iraí de Minas – MG. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*,9, Uberlândia. 1998.

BUENO, C. R. P., ARRAES, C. L., PEREIRA, G. P., CORA, J. E., CAMPOS, S. Análise multivariada na determinação do risco de erosão em solos sob irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 15. n.1, p. 23-35, 2010

CAMAPUM DE CARVALHO, J., SALES, M. M., MORTARI, D., FÁZIO, J. A., MOTTA, N. O., FRANCISCO, R. A. *Processos Erosivos*. *In: CAMAPUM DE CARVALHO, J., SALES, M. M., SOUZA, N. M., MELO, M. T. S. (Ed.). Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. Brasília, Distrito Federal: Finattec. Cap. 2., 2006.

CASTRO, S. S. de. Erosão hídrica na alta bacia do rio Araguaia: distribuição, condicionantes, origem e dinâmica atual. **Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo**, São Paulo, v. 17, p. 38-60, 2005.

CASTRO, S.S.; BARBALHO, M.G.S.; MARINHO, G.V.; CAMPOS, A.B.; SALOMÃO, F.X.T.; VECHIATTO, A. Condicionantes hidrológicos, geomorfológicos, pedológicos e de uso e manejo dos solos na circulação hídrica e processos de voçorocamento na alta bacia do rio Araguaia (GO/MT). *In: COUTO, E. G.; BUENO, J. F. (Ed.). Os (Des) caminhos do uso da água na agricultura brasileira*. Cuiabá: Ed. UFMT/SBCS. p.408-448, 2004.

CLEMENTE, E. de P.; OLIVEIRA, A. P. de; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. da S.; SCHULER. A. E.; FIDALGO, E. C. C.; MONTEIRO, L. M. G. Erodibilidade dos solos da Região Serrana do Rio de Janeiro obtida por diferentes equações de predição indireta.

Embrapa Solos – Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 52p. 2017.

CONCIANI, W. **Processos erosivos: conceitos e ações de controle**. Cuiabá: CEFET/MT, 148p, 2008.

COSTA C. W., LORANDI, R., LOLLO, J. A. IRMANI, M. DUPAS, F. A. Surface runoff and accelerated erosion in a peri-urban wellhead area in southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences** 77:160, 2018

CROCKER, L., ALGINA, J. **Introduction to classical and modern test theory**. New York: Harcourt Brace Jovanovich, 527p. 1986.

DANIELS, R. B. e HAMMER, R.D. **Soil Geomorphology**. John Wiley and sons, Inc. Nova York, 216p, 1992.

DARBOUX, F., GASCUEL, ODOUX, C., DAVY, P. Effects of surface water storage by soil roughness on overland flow generation. **Earth Surface Processes and Landforms** 27, 223–233, 2002.

DE PLOEY, L. Crusting and time-dependent rainwash mechanisms on loamy soil. Editor: RPC Morgan, p.139-152, 1981.

DEBIASI, H.. Erosão causa prejuízos econômicos e ambientais no Paraná. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/noticia/36905812/erosao-causa-prejuizos-economicos-e-ambientais-no-parana>. Acessado em: 31 de outubro de 2019.

DEVATHA, C. P.; DESHPANDE, V.; RENUKAPRASAD, M. S. Estimation of soil loss using USLE model for Kulhan Watershed, Chattisgarh-A case study. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1429-1436, 2015.

DIAS, J. E, GOMES, O. V. O, GOES, M. H. B. Áreas de riscos de erosão do solo: uma aplicação por geoprocessamento. **Revista Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro – RJ, v.8, n.1, p.01-10, 2001.

DIAS, F. P & HERRMANN, M. L. P. Susceptibilidade e a deslizamentos: Estudos de caso no bairro saco grande, Florianópolis – SC. **Revista Online: Caminhos de Geografia**, Florianópolis – SC, v.3, n.6, p.57-73, 2002.

DOUGLAS, I. E PIETRONIRO, A. Predicting road erosion rates in selectively logged tropical rain forests. In: De Boer, D.; Froehlich, W. e Mizuyama, T. (Eds.) - Erosion Prediction in Ungauged Basins, Integrating Methods and Techniques. Proceedings of an International Symposium Sapporo, Japan, 8-9 July 2003, IAHS Press, Wallingford, UK, pp. 199-205, 2003.

DURRAH, M. A. & BRADFORD, J.M. New Methods of Studying Soil Detachment due to Waterdrop Impact. **Soil Science**. v.45, p.949-953. 1981.

EL JAZOULI, A.; BARAKAT, A.; GHAFIRI, A.; EL MOUTAKI, S.; ETTAQY, A.; KHELLOUK, R.. Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco). **Geoscience Letters**, v.4, n.25, p.1-12, 2017.

EL JAZOULI, A.; BARAKAT, A.; KHELLOUK, R.; RAIS, J.; EL BAGHDADI, M.. Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco). **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v.13, p.361-374, 2019.

ELTNER, A., MAAS, H.G., FAUST, D. Soil micro-topography change detection at hillslopes in fragile Mediterranean landscapes. **Geoderma** 313, 217–232. 2018.

EZEZIKA, O. E., ADETONA, O. Resolving the gully erosion problem in Southeastern Nigeria: Innovation through public awareness and community-based approaches. **Journal of Soil Science and Environmental Management** Vol. 2(10), pp. 286-291. 2011.

FARRES, P. The role of time and aggregate size in the crusting process. **Earth Surface Process and Landforms**, p. 243-254. 1978.

FENDRICH, R., OBLADEN, N. L., AISSE, M. M., GARCIAS, C. M. **Drenagem e controle da erosão urbana**. 2 ed. Curitiba: Universitária Champagnat, 442p. 1988.

FOSTER, G. R. Understanding Ephemeral Gully Erosion. In: Soil Conservation: An Assessment of the National Resources Inventory. V.2. Cap 4. p. 90- 128. 1986.

FULLEN, M.A. & CATT, J.A. Soil Management: Problems and Solutions. **European Journal of Soil Science**. v 56, p.681-687, 2005.

FUREGATTI, S. A. Avaliação da variabilidade das características geotécnicas relacionadas aos processos erosivos com ensaios IN SITU. 2012. 467p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2012.

GAJBHIYE, S. SHARMA S. K., TIGNATH, S. Development of a Geomorphological Erosion Index for Shakkar Watershed. **Journal Geological Society of India**. v.86, p361-370, 2015

GOMES, E. J. S.; BATISTA, I.S.; LIMA, Z. M. C. Cobertura, ocupação do solo e erosão no entorno da Laguna Guaraíras/RN, Brasil. **Holos**, ano 34, v. 01. 2018.

GORSUCH, R. L. **Factor analysis**. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 2ed, 425p. 1983.

GOTTSTEIN, P.; BORGES JUNIOR, M. A.; ARANTES, E. J.. Uso de sistema de informação geográfica para determinação do potencial erosivo de bacias hidrográficas: estudo de caso na bacia do Rio do Campo/PR. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.3, p.352-367, 2019.

GRAY, D. Effect of slope shape on soil erosion. **Journal of Civil e Environmental Engineering**. v. 06, 2016

GREVE P, GUDMUNDSSON L, SENEVIRATNE S. I. Regional scaling of annual mean precipitation and water availability with global temperature change. **Earth System Dynamics** .9, 227–240, 2018.

GUERRA, A. J. T. O papel da matéria orgânica e dos agregados na erodibilidade dos solos. Anuário do Instituto de Geociências, vol. 13, p.43-52, 1990.

GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. Características e propriedades dos solos relevantes para os estudos pedológicos e análise dos processos erosivos. Anuário do Instituto de Geociências. v.19. 1996.

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

GUADAGNOLI, E. VELICER, W. F. Relation of Sample Size to the Stability of Component Patterns. **Psychological Bulletin**. 103(2): 265-275, 1988.

GUNN, R., KINZER, G.D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. **Journal Meteorol**. V.6, n4, p.243–248. 1949.

HAIR JR, J. F., BLACK, W. C., BABIN, B. J., ANDERSON, R. E. **Multivariate Data Analysis**. 7ed. Pearson Education Limited, 734p. 2014

HAREGEWEYN, N.; TSUNEKAWA, A.; POESEN, J.; TSUBO, M.; MESHESHA, D. T.; FENTA, A. A.; NYSSSEN, J.; ADGO, E..Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River. **Science of the Total Environment**, v.574, p.95-108, 2017.

HELMING, K., RÖMKENS, M.J.M., PRASAD, S. Surface roughness related processes of runoff and soil loss: a flume study. **Soil Science Society of America Journal** 62, 243–250, 1998.

HORTON, R. E.. Erosional development os streams and their drainage basins: hydrological approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, 56, 275-370, 1945.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Perfil dos municípios brasileiros: 2017. IBGE, Coordenação de População e Indicadores Sociais. - Rio de Janeiro. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>
Acessado em: 15 de março de 2018

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAIS - INPE. TopoData: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil [mapas]. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/> Acessado em: 24 de outubro de 2018

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Consolidação do projeto orientação para o controle à erosão no Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1989.

IWASA, O. Y.; FENDRICH, R.. Controle da Erosão Urbana. In: Oliveira, A. M. dos S. ; Brito, S. N. A. de Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, Cap. 16, 1998.

JOHNSON, R. A., WICHERN D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6ed. Upper Saddle River, NJ:Pearson Prentice-Hall International, 773p. 2007.

KARMANN, I. Ciclo de Água, Água Subterrânea e Sua Ação Geológica. In: Teixeira, W.; Toledo, M. C. M. de; Fairchild, T. R.; Taioli, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, Cap. 7, 2ª Reimpressão, 2000.

LAWS, J.O. Measurements of the fall-velocity of water-drops and raindrops. **Transactions of the American Geophysical Union**. V. 22, n.3, p.709–721. 1941.

LIMA, E. R. V., PINTO, S. A. F., LANDIM, P. M. B. Análise Multivariada e Cartografia de Síntese no Estudo da Erosão dos Solos. **Revista do Departamento de Geografia – USP**. Volume especial Cartogeo, p. 40-93, 2014.

MARQUES J. F. Custos da erosão do solo em razão dos seus efeitos internos e externos à área de produção agrícola. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v36, n1, p.61-80, 1998.

MARTINS, B.; LOURENÇO, L.; LIMA, H. R. Ação antrópica e risco de ravinamento: o exemplo da ravina do Corgo (Rio Alva). **Territorium**, nº 24, 221-234, 2017.

MASSAD, F.. **Obras de terra: Curso básico de geotecnia**. 2 ed , São Paulo: Oficina de Textos, 216p. 2010.

MELLO, C.R.; VIOLA, M.R.; BESKOW, S.; NORTON, L.D. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, v.202-203, p.88-102, 2013.

MENDONÇA, F. de A. A erosão urbana de Paranavaí/PR: estudo com base no emprego de fotografias aéreas. **Semina: Ciências Sociais e Humanas**, Londrina, v. 14, n. 3,p. 151-154, set. 1993.

MERRITT, E. The identification of four stages during micro-rill development. **Earth Surface Process and Landforms**, v.9, p.493- 496. 1984.

MINELLA, J. P. G, MERTEN, G. H, RUHOFF, A. L. Utilização de métodos de representação espacial para cálculo do fator topográfico na equação universal de perda de solo revisada em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Porto Alegre – RS, n.34, p.1455-1462, 2010.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 297p. 2005.

MIQUELONI, D.P., BUENO, C. R. P. Análise Multivariada e variabilidade espacial na estimativa da erodibilidade de um argissolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, 35:2175-2182, 2011.

MORGAN, R.P.C. . Field studies of rainsplash erosion. **Earth Surface Processes and Landforms**, 3. p. 295-299, 1978.

MORGAN, R.P.C. The non-idenpendence of rainfall erosivity and soil erodibility. **Earth Surface Processes and Landforms**. v.8, p. 323-338. 1983

MORGAN, R P. C. **Soil erosion and conservation**. 3ed. Inglaterra: Blackwell Publishing Ltd, 304p, 2005.

NASCIMENTO M. A. L. D. Erosões Urbanas em Goiânia. Departamento de Geografia – Instituto de Química e Geociências - Universidade Federal de Goiás Boletim Goiano de Geografia, v14, n1, 1994.

NEARING, M. A., YIN, S., BORRELLI, P., POLYAKOV, V. O. Rainfall erosivity: An historical review. **Catena**, v.157, p.357-362, 2017.

NETO, F. L. & MONDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas - SP. **Bragantia**, vol.51, n.2, p.189-196.1992.

NYSSSEN, J.; MOEYERSONS, J.; POESEN, J.; DECKERS, J. E MITIKU, H. The environmental significance of the remobilisation of ancient mass movements in the Atbara-Tekeze headwaters, Northern Ethiopia. **Geomorphology** 49: 303–322, 2002.

OLIVEIRA, M. A. T. Depósitos tectogênicos e assoreamento de reservatórios: exemplo do reservatório de Capivara, rio Paranapanema, SP/PR. 1994. 211 f. Tese (Doutorado na Faculdade de Filosofia, Ciências Humanas e Letras), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

OLIVEIRA, P.T.S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **Catena**, v.100, p.139-147, 2013.

ONSTAD, C. A. Depressional Storage on tilled soil surfasse. **Transactions of the ASAE, St Joseph**, v. 27, p. 729-732. 1984.

OSBORNE, J. W.; COSTELLO, A. B. Sample size and subject to item ratio in principal components analysis. Practical **Assessment, Research & Evaluation**, v.9, n.11, 2004.

PANAGOS, P.;BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; YU, B.; KLIK, A.; LIM, K. J.; YANG, J. E.; NI, J.; MIAO, C.; CHATTOPADHYAY, N.; SADEGHI, S. H.; HAZBAVI, Z.; ZABIHI, M.; LARIONOV, G. A.; KRASNOV, S. F.; GOROBETS, A. V.; LEVI, Y.; ERPUL, G.; BIRKEL, C.; HOYOS, N.; NAIPAL, V.; OLIVEIRA, P. T. S.; BONILLA, C. A.; MEDDI, M.; NEL, W.; DASHTI, H. A.; BONI, M.; DIODATO, N.; OOST, K. V.; NEARING, M.; BALLABIO, C.. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. **Scientific Reports**. 7: 4175, 2017.

PARSONS, A. J. Hillslope form. Nova York, **Rougledge**, 212 p. 1988.

PASCOTO, T. V. FUREGATTI, S. A., PEIXOTO, A. S. P. Classificação das Erosões da Área Urbana de São Manuel – SP. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador, 2018.

PHAM, T. G.; DEGENER, J.; KAPPAS, M.. Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. **International Soil and Water Conservation Research**, v.6, n.2, p.99-110, 2018.

PINESE JUNIOR, J. F.; CRUZ, L. M.; NOGUEIRA, T. C.; RODRIGUES, S. C. Monitoramento de processos erosivos em parcelas experimentais no município de uberlandia – MG. **Caminhos de Geografia**. Uberlandia, v.10, n.31, p. 92-108, 2009.

PINTO, Carlos S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3ed. São Paulo: Oficina de texto, 367p. 2006.

RAMOS, F. T, RAMOS, D. T, CREMON, C. ROQUE, M. W. Erosão por salpicamento sob diferentes sistemas de manejo em um neosolo quartzarênico em Cáceres – MT. **Revista Global science and technology**, v.4, n.1, p.38-50, 2011.

RAUWS, G. E GOVERS, G. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *Journal of Soil Science*, n.39, p.111-124, 1988. In: Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias, 3, Botucatu, 2013

REID, L. M. E DUNE, T. Rapid Evaluation of Sediment Budgets, 1996. **Catena**, Verlag Gmbh, Reiskirchen, Germany, p.200, 1996.

RIDENTE JR, J. L., CANIL, k., ALMAIEDA, M. C. J., MONTEIRO A.C.M.C, Análise da erosão no município de São Manuel, SP, *VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão*, Goiânia, GO, 2001.

RODRIGO-COMINO, J., CERDÀ, A.. Improving stock unearthing method to measure soil erosion rates in vineyards. **Ecological Indicators**, 85, 509–517, 2018.

SALEH, A. Soil roughness measurement: chain method. **Jounal Soil Water Conservation**. 48, 527–529, 1993.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e preservação dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T, SILVA, A. B., BOTELHO, R. C. M (Orgs). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 2012.

SANTOS, J. C. N. ANDRADE, E. M.; GUERREIRO, M. J. S.; MEDEIROS, P. H. A.; PALÁCIO, H. A. Q; ARAÚJO NETO, J. R.. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 541, n. 4, p. 1057-1066, 2016.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; PALACIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R.; RIBEIRO FILHO, J. C.. Erosive process control in the Brazilian Semiarid Region. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.31, n. 3, p. 695-703, 2018.

SANTOS, G. S. dos; DEUS, P. M. O.; VITORIANO, G. R., ROSA, D. R. Q. Avaliação das perdas de solo em canal de solo devido a presença de cobertura vegetal morta. **Revista Científica Univiçosa**. v.7, n.1, p.571-576, 2015.

SANTOS, D. C. dos., PILLON, C. N., FLORES, C. A., LIMA, C. L. R. de, CARDOSO, E. M. C., PERERIA, B. F., MANGRICH, A. A.. Agregação e frações físicas da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso no bioma Pampa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1735-1744, 2011.

SECRETARIA DE ESTADO DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS. Plano Municipal de Saneamento. 179p, 2017.

SILVA, A.M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, v. 54, p. 251-259, 2004.

SILVA, D. D. E. da; FELIZMINO, F. T. A.; OLIVEIRA, M. G. de. Avaliação da degradação ambiental a partir da prática da cultura do feijão no município de Tavares-PB. **Holos**, ano 31, vol. 8, 2015.

SNAPIR, B., HOBBS, S., WAINE, T.W. Roughness measurements over an agricultural soil surface with Structure from Motion (SfM). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. 96, 210–223, 2014.

SINGH, M.J. & KHERA, K.L. Nomographic estimation and evaluation of soil erodibility under simulated and natural rainfall conditions. **Land Degradation e Development**, 20:471-480, 2009.

SIQUEIRA, G. M, DAFONTE, J. D, VÁZQUEZ, E. V, ARMESTO, M. V. Distribuição espacial da rugosidade do solo em microparcelas experimentais sob. **Revista Brasileira de Ciencias Agrárias**, v.7, n.4, p.671-679, Viçosa – MG, 2012.

THOMSEN, L.M., BAARTMAN, J.E.M., BARNEVELD, R.J., STARKLOFF, T., STOLTE, J. Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model. **Soil** 1, 399–410, 2015.

TRINDADE, A. L. F.; OLIVEIRA, P. T. S.; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.12, p.1918-1928, dez. 2016

TROEH, F. R. Landform parameters correlated to soil drainage. **Soil Science Society Proceedings**. 1964.

TROEH, F. R. Landform equation fitted to contour maps. **American Journal of Science**, v.263, p. 616-627. 1965.

USDA-Agricultural Research Service. Science Documentation Revised Universal Soil Loss Equation Version 2. 2013. Disponível em: https://www.ars.usda.gov/ARSEUserFiles/60600505/RUSLE/RUSLE2_Science_Doc.pdf

USDA- Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Indicators: Bulk Density. 2008. Disponível em: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053256.pdf

VEZZANI, F. M. e MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.213-223, 2011.

VITÓRIO J. A. P. Danos e Acidentes Estruturais Causados pela Erosão e pelas Cheias nas Fundações e nos Aterros de Acesso de Pontes Rodoviárias. IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro, 2016.

WISCHMEIER, W.H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. **Soil Science Society of America**. V.23, p. 322–326. 1959.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B. & CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil Water Conservation**, 26:189-193, 1971.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**. V.39, n.2, p.285–291. 1958.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D.. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. In: Agriculture Handbook No. 537. USDA-SEA, US. Govt. Printing Office, Washington, DC 58p. 1978.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D., UHLAND, R.E., 1958. Evaluation of factors in the soil-loss equation. **Journal of Agricultural Engineering** V.39, p.458–462. 1958

WOLINS, L. A Monte Carlo study of constrained factor analysis using maximum likelihood and unweighted least squares. **Educational and Psychological Measurement**, 55(4), 545–557, 1995.

XUJIONGXIN, J. Benggang erosion: the influencing factors. **Catena**, v 27, p 249-263, 1996.

YAMASAKI, M. T. Influência da salinidade do fluido na avaliação da compactação e da resistividade elétrica de dois solos. 2012. 124 f. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2012.

ZHAO, L., HOU, R., WU, F., KEESSTRA, S. Effect of soil surface roughness on infiltration water, ponding and runoff on tilled soils under rainfall simulation experiments. **Soil Tillage Research**. 179, 47–53, 2018.

ZHENG, M.G., CHEN, X. Statistical determination of rainfall-runoff erosivity indices for single storms in the Chinese loess plateau. **PLOS ONE** v.10, n. 3. 2015.

APÊNDICES

Apêndice A

➤ Script utilizado para método A

```
##### Inserção dos Dados no R #####
require(xlsx)
setwd("C:/Users/tapas/Google Drive/Tamara/Fatores _e_R")
dados=read.xlsx("fatores.xlsx","Planilha1", header=T)
dadosf=dados[, -1]

# Vetor de médias amostrais e dos desvios padrão
apply( dadosf, 2, mean )
apply(dadosf, 2, sd)

# Matriz de Correlação
R = cor( dadosf ); R
# Pacote corrgram para correlograma
library(corrgram)
corrgram(R, type = "cor", lower.panel = panel.shade,
upper.panel = panel.pie)

##### Desenvolvimento da Análise de componente Principal #####
DE = eigen(R); DE # Decomposição espectral a partir da Matriz de Correlação
lambda= DE$values; lambda # Indicação dos autovalores
v=DE$vectors; v # Indicação da matriz de autovetores normalizados
TR = lambda / sum( lambda ) # Porcentagem de variação explicada por cada
componente
TR_Ac = cumsum( TR ) # Porcentagem de variação acumulada
Tab = data.frame( TRr, TR_Ac); round(Tab, 2) # Mostrar em forma
de tabela a porcentagem da variação e da variação acumulada
## Determinação dos scores de cada componente principal
Ym=as.matrix(Y)
```

```

Z1=v[,1] %*%t(Ym)
Z2=v[,2] %*%t(Ym)
Z3=v[,3] %*%t(Ym)
Z4=v[,4] %*%t(Ym)
Z5=v[,5] %*%t(Ym)
Z6=v[,6] %*%t(Ym)
Z7=v[,7] %*%t(Ym)
#Normalizar em relação à média
Z1N=Z1 - mean(Z1)
Z2N=Z2 - mean(Z2)
Z3N=Z3 - mean(Z3)
Z4N=Z4 - mean(Z4)
Z5N=Z5 - mean(Z5)
Z6N=Z6 - mean(Z6)
Z7N=Z7 - mean(Z7)
Z8N=Z8 - mean(Z8)

```

➤ Script utilizado para método B

```

##### Inserção dos Dados no R #####
require(xlsx)
setwd("C:/Users/tapas/Google Drive/Tamara/Fatores _e_R")
dados=read.xlsx("fatores.xlsx","Planilha1", header=T)
dadosf=dados[,-1]
dadosp=scale(dadosf) #padronizar dados
dados_final=dadosp

# Vetor de médias amostrais e dos desvios padrão
apply( dadosf, 2, mean )
apply(dadosf, 2, sd)

# Matriz de Correlação
R = cor( dadosf ); R

```

```
# Pacote corrgram para correlograma
```

```
library(corrgram)
```

```
corrgram(R, type = "cor", lower.panel = panel.shade,  
upper.panel = panel.pie)
```

```
#####Adequação amostral #####
```

```
#Teste de Bartlett
```

```
require(psych)
```

```
matcor= cor(dados_final)
```

```
cortest.bartlett(matcor, n=nrow(dados_final) )
```

```
##### Análise Fatorial - metodo PCA, varimax #####
```

```
library(psy)
```

```
scree.plot(dados_final, use="P")
```

```
library(psych)
```

```
k=3
```

```
fit3=fa(r=dados_final,nfactofitrs=k, fm="pa", scores="regressio  
n", rotate="varimax")
```

```
fit3[["e.values"]] #autovalores
```

```
fit3[["loadings"]] #Cargas fatoriais e Porcentagem explicada por cada FA
```

```
fit3[["communality"]] #comunalidades
```

Apêndice B

- Banco de dados com areia e argila, sem silte:

A Tabela 30 mostra as cargas fatoriais da matriz rotacionada (Varimax) do banco de dados composto sem a fração de silte. Neste caso a primeira componente é influenciada principalmente pela areia, a segunda pela declividade e a terceira pela argila.

Tabela 30: Cargas Fatoriais da matriz rotacionada (Varimax)			
Fator Influenciador	Componentes		
	1	2	3
Declividade	0,209	-0,913	-0,298
Areia	-1,006		
Argila	0,996		0,688
Permeabilidade	-0,814	-0,214	0,320
Erodibilidade	0,683	-0,219	0,359
Pluviosidade	0,105	-0,218	
Uso e Ocupação	0,263	0,621	

- Banco de dados somente com areia, sem silte e argila:

A Tabela 31 mostra as cargas fatoriais da matriz rotacionada (Varimax) do banco de dados composto sem a fração de silte e argila. Neste caso a primeira componente é influenciada principalmente pela areia, a segunda pela declividade e a terceira pela pluviosidade.

Tabela 31: Cargas Fatoriais da matriz rotacionada (Varimax)			
Fator Influenciador	Componentes		
	1	2	3
Declividade	-0,163	-0,780	-0,422
Areia	1,258		-0,148
Permeabilidade	0,722	-0,133	0,338
Erodibilidade	-0,548	0,210	0,203
Pluviosidade		0,138	0,539
Uso e Ocupação	-0,344	0,710	

- Banco de dados com areia e finos:

A Tabela 32 mostra as cargas fatoriais da matriz rotacionada (Varimax) do banco de dados composto sem a fração de silte e argila, com a fração de finos. Neste caso a primeira componente é influenciada principalmente pela quantidade de finos, a segunda pela declividade e a terceira pela permeabilidade.

Tabela 32: Cargas Fatoriais da matriz rotacionada (Varimax)

Fator Influenciador	Componentes		
	1	2	3
Declividade	0,223	1,220	
Areia	-0,874		0,437
Finos	0,992		-0,283
Permeabilidade	-0,425		1,061
Erodibilidade	0,789	-0,261	
Pluviosidade	0,156	-0,284	0,158
Uso e Ocupação	0,305	-0,468	-0,216