

Análise da suscetibilidade à erosão linear, por meio de cenários de expansão urbana, em São Manuel/SP

Tamara Vieira Pascoto

Discente de Doutorado, UNESP, Brasil
tamara.pascoto@unesp.br

Simone Andrea Furegatti

Professora Doutora, UNESP, Brasil.
simone.furegatti@unesp.br

Anna Silvia Palcheco Peixoto

Professora Doutora, UNESP, Brasil.
anna.peixoto@unesp.br

RESUMO

Os cenários urbanos podem ser utilizados pelos tomadores de decisão em assuntos relacionados à expansão urbana, especialmente quando as áreas urbanas têm problemas socioambientais, tais como os resultantes de processos erosivos, especialmente as feições erosivas lineares. Com isso, o objetivo da pesquisa é analisar a suscetibilidade à erosão linear, com a construção de cenários urbanos, utilizando o método AHP (Processo Hierárquico Analítico), para auxiliar na tomada de decisões sobre a expansão urbana. Assim, foi utilizada a técnica AHP para analisar os dados coletados e um SIG para a espacialização e construção dos cenários. A metodologia foi desenvolvida a partir de um caso real de uma cidade brasileira localizada no estado de São Paulo. Para validar a metodologia, foi construído o cenário atual da área estudada e comparado com a situação real do local. Como conclusão, o estudo foi validado para a área aplicada e provou ser uma ferramenta capaz de auxiliar os governos locais no processo de tomada de decisão para a expansão urbana.

PALAVRAS-CHAVE: Cenários Urbanos. Suscetibilidade à Erosão. AHP.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento de cenários futuros com uma visão sustentável é uma ferramenta eficaz que orienta a organização, o funcionamento e a governança das cidades (IWANIEC, WIEK, 2014). Uma das principais vantagens do planejamento de cenários é que sua construção abrange a união da política, da sociedade e do meio acadêmico para processos de tomada de decisão precoces baseados na sustentabilidade a longo prazo (AMER ET AL., 2013; IWANIEC ET AL., 2020).

Há duas abordagens com visões diferentes para o desenvolvimento de cenários. A primeira se baseia nas condições passadas e previstas para uma previsão aleatória futura. Na segunda abordagem, comumente chamada de *backcasting*, uma condição futura é pensada para determinação posterior do que seria necessário para alcançá-la (DREBORG, 1996; IWANIEC, WIEK, 2014).

Independentemente da abordagem, com os meios para alcançar um resultado de melhor representatividade, o desenvolvimento de cenários deve sempre incluir uma equipe de pesquisadores, sociedade civil e funcionários governamentais de múltiplas áreas (NASSAUER, CORRY, 2004) que estão envolvidos em múltiplos aspectos, desde a consulta até a coprodução (JAHN ET AL., 2012; LANG ET AL., 2012; NORSTRÖM ET AL., 2020).

A construção de cenários pode ser aplicada em diversas áreas para auxiliar no planejamento de cidades. Por exemplo, mudança no uso do solo concomitantemente com o uso da água e mudanças na temperatura (IWANIEC ET AL., 2020). Outros exemplos de aplicação seriam: mudança no consumo de proteína animal para vegetal na Europa até o ano 2030, exigindo a alocação de uma área maior para a agricultura (MANNERS ET AL., 2020); mudanças na mobilidade urbana na Turquia até 2035, aumentando as caminhadas, o uso de bicicletas e transporte público e, conseqüentemente, diminuindo o uso de carros particulares (BIYIK, 2019); mudanças no sistema de pesca em cidades com uma economia baseada na pesca na África do Sul (GAMMAGE, 2019).

A aplicação de cenários pode, assim, contribuir para a tomada de decisões sobre a ocupação do ambiente físico nas cidades. A ocupação, quando desordenada, pode levar a problemas socioambientais, como erosão do solo e aumento da vulnerabilidade da área a movimentos de massa e inundações (KOKS ET AL., 2015), incluindo o assoreamento de rios na área urbana. A erosão do solo é um dos principais problemas socioambientais que preocupa a

sociedade por ser responsável pela perda de terras utilizáveis causada pelo assoreamento dos rios e, em áreas urbanas, pela deterioração da infraestrutura (DEVATHA ET AL., 2015; EL JAZOULI ET AL., 2017; JAZOULI ET AL., 2019). Nas áreas urbanas, a erosão hídrica linear representa o maior impacto, pois além da perda de volumes significativos de solo, devasta áreas consideráveis e pode causar danos em áreas ocupadas, ou tornar impossível a ocupação de novas áreas.

Há vários fatores que influenciam os processos de erosão hídrica linear, entre eles, aqueles relacionados às características da superfície (declividade, uso do solo, comprimento e forma do relevo), ao solo (permeabilidade, textura e erodibilidade), à precipitação e à intervenção antrópica (COSTA ET AL., 2018; EL JAZOULI ET AL., 2017; PHAM ET AL., 2018). Entretanto, um dos fatores com maior capacidade para acelerar os processos erosivos é o comportamento social. Entre as ações antrópicas estão a mudança da cobertura vegetal, o manejo inadequado do solo pela agricultura e pecuária e as obras de engenharia mal planejadas e/ou mal executadas (EZEZIKA, ADETONA, 2011; IPT, 1989).

Entre várias formas de avaliar a influência dos fatores erosivos, destaca-se o uso do método do processo hierárquico analítico (AHP) (ARABAMERI ET AL., 2018; HALEFOM, TESHOME, 2019; VIJITH, DODGE-WAN, 2019). É uma técnica de análise multicritério estruturada, que auxilia na tomada de decisões complexas envolvendo vários elementos (SAATY, 1980, 1987). A extrapolação dos dados obtidos na plataforma GIS - na forma de mapeamento e pela construção de cenários - ajuda na alocação de recursos e nos processos de tomada de decisão relativos às medidas preventivas ou corretivas necessárias (HAREGEWEYN ET AL., 2017).

Assim, este estudo propõe o uso do método AHP na construção de cenários urbanos, aplicados ao estudo de processos erosivos de feições lineares, considerando os fatores de influência. A pesquisa utilizou dados coletados na cidade de São Manuel, São Paulo, Brasil.

Na sequência, a metodologia proposta para a construção de cenários é descrita no tópico 2. No tópico 3 é realizada uma aplicação da metodologia com dados de uma cidade pequeno a médio porte, do centro oeste do estado de São Paulo, Brasil. E, no tópico 4, a construção do cenário futuro foi confirmada pela evolução da região, com a construção dos loteamentos urbanos planejados.

2 CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS

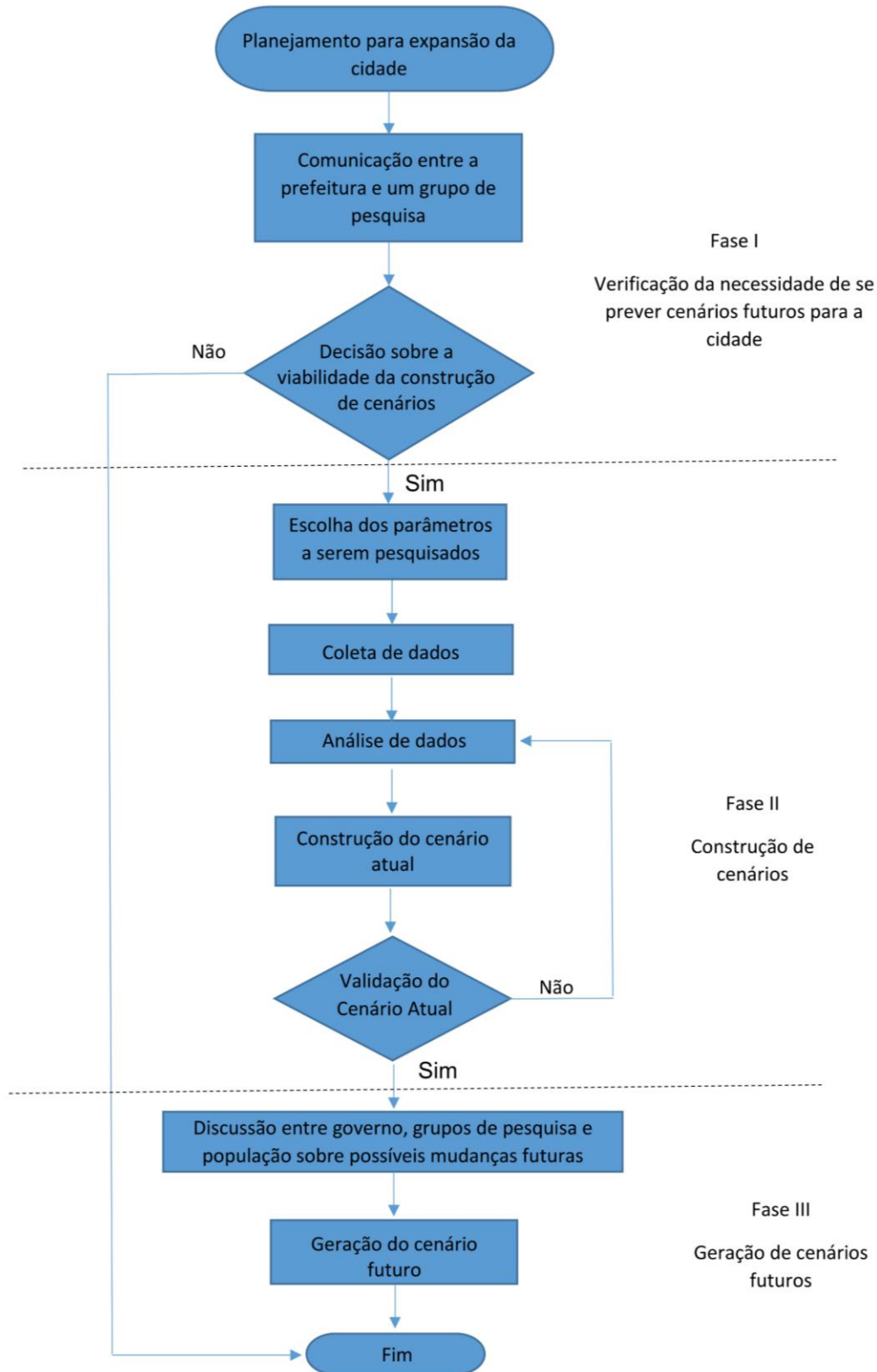
A Figura 1 contém um fluxograma dividido em três fases que ilustra como desenvolver a construção dos cenários relacionados com processos erosivos, para uma área urbana em expansão.

2.1 Fase I - Verificação da necessidade de previsão de cenários futuros para a cidade

O planejamento da expansão urbana de uma cidade envolve o estudo de possíveis cenários futuros. Esses cenários podem variar desde a necessidade de expansão urbana para resolver um problema de déficit habitacional, até a diminuição de problemas relacionados a inundações, bem como a prevenção ou redução da ocorrência de feições erosivas lineares. Nessa fase, grupos de pessoas com diferentes interesses, tais como funcionários do governo,

investidores e pesquisadores, se encontram e discutem a necessidade de construir os cenários com base em uma situação de mudança na cidade.

Figura 1 – Fluxograma para construção de cenários



2.2 Fase II: Construção de cenários para avaliação da suscetibilidade à erosão hídrica linear

Uma vez determinada a necessidade de se construir cenários, em relação à erosão linear urbana, é necessário determinar os fatores que influenciam as feições erosivas na área de estudo. Esses fatores variam de acordo com o local do estudo e, o mais importante, depende da disponibilidade de dados.

Para se determinar os parâmetros de entrada para a construção do cenário, é importante que a equipe de trabalho seja multidisciplinar, cobrindo elementos da sociedade civil, da academia de pesquisa e do governo local. O esforço multidisciplinar é crucial nessa fase, pois a população é a esfera que acompanha de perto todas as mudanças na região onde vivem. O governo local geralmente tem dados oficiais que podem contribuir para o desenvolvimento dos cenários e a universidade tem um papel fundamental na pesquisa, sendo capaz de desenvolver todo o estudo necessário, fechando o ciclo e contribuindo para a governança e o desenvolvimento da sociedade civil.

Assim, é proposta uma parceria, mesmo que informal, para que seja mais fácil obter dados iniciais com o governo local e um contato direto com a sociedade através de visitas constantes de campo e entrevistas com os moradores da região, para então decidir quais fatores podem ter influenciado os processos de erosão na área. Uma vez feito isso, os dados são coletados, seja por testes de laboratório ou usando bancos de dados abertos disponíveis na Internet, para depois serem espacializados em SIG.

Entretanto, é necessário analisar os dados para determinar o quanto cada fator influencia o desenvolvimento dos processos de erosão. Nesta pesquisa, o uso do método AHP foi sugerido utilizando vetores prioritários para determinar a influência de cada fator. Posteriormente, a matriz de julgamento pode ser formada a partir da escala fundamental desenvolvida por Saaty (1987) (Tabela 1). Nessa pesquisa, a construção da matriz foi baseada em outras matrizes encontradas na literatura (ALEXAKIS ET AL., 2013; BASILIO ET AL., 2019; KACHOURI ET AL., 2015; LOBÃO ET AL., 2011; PRADEEP ET AL., 2015; VULEVIĆ ET AL., 2015).

Tabela 1 - Escala fundamental do método AHP

Intensidade de importância em uma escala absoluta	Definição
1	Igual importância
3	Importância moderada de um sobre outro
5	Importância essencial ou forte
7	Importância muito forte
9	Extrema importância
2, 4, 6, 8	Valores intermédios entre os dois julgamentos adjuntos
Recíprocos	Se a atividade i tem um dos números acima atribuídos a ela quando comparada com a atividade j, j têm o valor recíproco quando comparados com i

Fonte: Adaptado de Saaty (1987)

Na sequência, deve ser calculado o vetor de prioridade dos critérios, o qual pode ser entendido como a importância de cada critério no evento em estudo (ARABAMERI ET AL., 2018; HALEFOM, TESHOME, 2019; VIJITH, DODGE-WAN, 2019). A veracidade da matriz de julgamento, e consequentemente o vetor de prioridade, pode ser dada calculando-se a Razão de

Consistência (CR). De acordo com Saaty (1980), valores de CR abaixo de 1,0 representam matrizes consistentes.

A suscetibilidade deve ser calculada de acordo com a equação 1, onde F_i é o valor do fator de influência obtido em função da espacialização e calculado por pixel e w_i é o peso obtido pela matriz de julgamento do método AHP.

$$Suscetibilidade = \sum F_i w_i \quad (1)$$

Obtidos os resultados, a álgebra dos mapas em SIG foi aplicada para levar à espacialização do cenário atual de suscetibilidade à erosão da área de estudo.

A validação do método deve ser feita através de comparações entre a área existente e o mapa desenvolvido, prestando atenção aos pontos onde existem feições erosivas lineares. Se o mapa for validado, ou seja, que o mapa representar o estado atual da área, pode ser considerado como o cenário atual. Se o cenário for verdadeiro, a elaboração do mapa vai para a terceira e última etapa, caso contrário é preciso voltar à etapa de análise dos dados, adaptando a matriz de julgamento do método AHP.

2.3 Fase III: Geração de cenários futuros

Nessa fase, deve ocorrer uma discussão entre todos os envolvidos, tendo em mente as melhores ações para possíveis alterações futuras. Uma vez definidas as diretrizes, será possível adaptar os mapas dos fatores de influência, gerando assim novos cenários que poderiam ajudar os tomadores de decisão a estabelecer qual cenário ideal deve ser adotado.

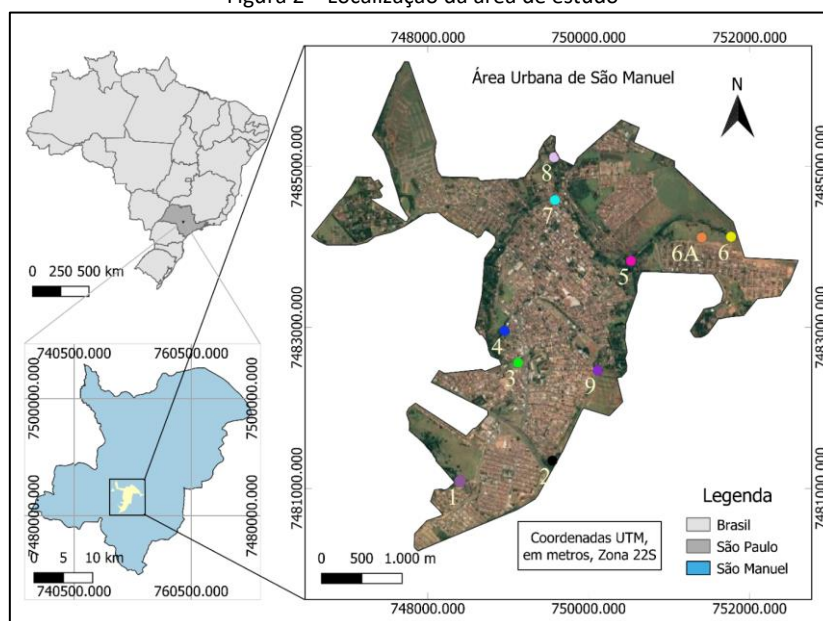
3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Para a aplicação da metodologia foi fundamental definir uma área de estudo adequada. Assim, foi escolhida a área urbana do São Manuel. A cidade é considerada de pequeno e médio porte, possui uma população estimada em 41287 habitantes e uma extensão territorial de 650734 km² (IBGE, 2022). Está localizada no Estado de São Paulo, Brasil, coordenada pela UTM: Zona 22S, E 749.454,27m, N 7.483.893,98m e altitude média de 700 metros (Figura 2). A temperatura média da cidade é de 20,8 °C, com uma precipitação média anual de 1.465mm, o que significa que a cidade tem um clima tropical de alta altitude com invernos secos e verões chuvosos. Essas condições climáticas, somadas às condições do solo e relevo, propiciam a ocorrência de erosões hídricas lineares.

A área urbana da cidade está localizada sobre arenitos da Formação Adamantina e sobre basaltos da Formação Serra Geral, que são cobertos por uma associação Latossolo vermelho escuro, Latossolo vermelho – amarelo, Solo roxo e Argissolo (RIDENTE JR ET AL., 2001). De acordo com a carta de risco de erosão desenvolvida por Ridente Jr et al. (2001), a área urbana da cidade tem um risco médio a alto de suscetibilidade à erosão da água.

Na área urbana, existem nove feições erosivas hídricas que foram catalogadas para compor o Plano Básico de Saneamento da Cidade (SECRETARIA DE ESTADO DE SANEMANETO E RECURSOS HÍDRICOS, 2017).

Figura 2 – Localização da área de estudo



Pascoto (2020) classificou as feições erosivas visitando os locais indicados no Plano. Durante as visitas, foram analisados o sistema de drenagem urbana, o sistema viário urbano, um possível afloramento do lençol freático e a vegetação que circunda as feições. Também foram entrevistados residentes da região das feições, para contribuir com a classificação. As entrevistas foram projetadas para descobrir as possíveis causas e de quando cada feição começou a se desenvolver. A Tabela 2 mostra a classificação das feições. Das nove feições erosivas existentes, foi impossível classificar uma (feição 3) por já estar recuperada no momento do levantamento. Embora Pascoto (2020) classifique a feição 6 como uma voçoroca estabilizada, um de seus braços está ativo devido a uma ruptura na tubulação do sistema de drenagem nas vizinhanças ao redor da feição (PASCOTO; FUREGATTI; PEIXOTO, 2020a), portanto, esse braço foi nomeado como feição 6A para estudá-la separadamente da feição 6. Assim, 3 feições foram classificadas como voçorocas ativas (feições 1, 2 e 6B), duas como erosões estabilizadas (feições 4 e 6), uma ravina ativa (feição 9) e uma ravina recuperada (feição 5), bem como duas erosões de margem (feições 7 e 8) e uma não-classificada (feição 3).

Tabela 2 - Classificação das feições de acordo com Pascoto (2020)

Feição	Classificação	Feição	Classificação	Feição	Classificação
1	Voçoroca ativa	5	Ravina recuperada	7	Erosão de margem
2	Voçoroca ativa	6	Voçoroca estabilizada	8	Erosão de margem
3	Sem classificação	6B	Voçoroca ativa	9	Ravina ativa
4	Voçoroca estabilizada				

3.1. Verificação da necessidade de se prever cenários futuros para a cidade (Fase I)

Este tópico compreendeu a Fase I da Figura 1. Por conversas informais com a população e com investidores imobiliários, notou-se que a cidade tinha um déficit habitacional, o que pode ser confirmado pelas disposições do documento que compõe as Bases do Plano habitacional de São Paulo, onde a região em que se localiza a cidade escolhida tem a necessidade da construção de mais de 1,1 milhão de casas (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2012).

Além disso, a escolha foi feita devido ao fato da cidade sofrer a pressão do desenvolvimento imobiliário e, conseqüentemente, precisar de um estudo sobre possíveis áreas de expansão urbana, considerando as mudanças que essa expansão poderia trazer à área em relação ao risco de desencadear processos erosivos lineares.

Como resultado, surgiu a necessidade de se construir diferentes cenários, incluindo a aplicação de mudanças no uso do solo de certas áreas de interesse no mercado imobiliário, para analisar as melhores opções de expansão, quando relacionadas com o risco de desenvolvimento de processos erosivos.

3.2. Construção de Cenários (Fase II)

Esta etapa compreende a Fase II da Figura 1. Aqui foi discutido como os parâmetros foram selecionados, a coleta de dados e a análise de dados usando o método AHP foi explicada. Finalmente, o cenário real foi construído, analisado e validado.

3.2.1. Parâmetros a serem pesquisados

Os parâmetros que influenciam os processos de erosão hídrica são objeto de muitos estudos (ALAGNA ET AL., 2019; COSTA ET AL., 2018; DA SILVA ET AL., 2019; DE PLOEY, 1981; JIONGXIN, 1996; MORGAN, 1983; SANTOS ET AL., 2011; SIMONETTI ET AL., 2018; SINGH, KHERA, 2009; VEZZANI, MIELNICZUK, 2011). Parte considerável desses estudos foi baseada nos parâmetros que constituem a equação universal de perda de solo (USLE). Assim, de acordo com os tomadores de decisão do município, a escolha foi baseada nos parâmetros da USLE, devido à facilidade de coleta dos dados na região: uso do solo, declividade média da bacia hidrográfica, textura do solo, permeabilidade e erodibilidade do solo (PASCOTO ET AL., 2020B).

3.2.2. Coleta de dados

Para quantificar os fatores de influência, Pascoto (2020) coletou amostras deformadas e indeformadas a 0,60 m de profundidade, na cabeceira de cada feição erosiva na área urbana e espacializou os resultados da análise.

Os resultados dos ensaios de granulometria conjunta (NBR 7181/2016) forneceram os mapas de fração de areia e fração de argila. Ao analisar a composição de ambos os mapas, é possível inferir que o solo estudado é tipicamente arenoso, variando entre 73% de areia e 18% de argila na composição da feição 4 e 88,5% de areia e 6% de argila na feição 6A.

A determinação da erodibilidade do solo utilizou a metodologia de Nogami e Villibor (1979) adaptada por Pejon (1992). A metodologia utiliza os ensaios de absorção de água e de perda de água por imersão. O ensaio de absorção de água consiste em medir quanta água uma amostra, previamente seca ao ar livre, absorve em períodos regulares de tempo até atingir a saturação (aproximadamente 1 hora). O ensaio de perda por imersão consiste em quantificar a porcentagem de solo solto em 24 horas, devido à imersão em água da amostra indeformada de solo. A partir dos resultados dos dois ensaios, a erodibilidade do material é calculada dividindo o índice de absorção, multiplicado por 40, pelo índice de perda por imersão. Se o resultado da erodibilidade (E) for um número menor que 1, o material é classificado como de alta erodibilidade; se a erodibilidade (E) for maior que 1, é considerado como de baixa erodibilidade.

Para facilitar a observação dos resultados, Pascoto et al. (2020b) traçaram o índice de absorção x perda por imersão, e traçaram o limite proposto por Pejon (1992). No gráfico, foi possível observar que as feições 1, 6 e 6A foram classificadas como de alta erodibilidade (E menor que 1), e as demais, feições 2, 3, 4, 5, 7, 8 e 9 classificadas como baixa erodibilidade (E maior que 1).

Os dados de permeabilidade (NBR 13292/2021 e NBR 14545/2021) apresentados por Pascoto et al. (2020b) mostram que as feições apresentavam uma grande variabilidade na ordem de grandeza desse parâmetro. Os valores variaram de 10^{-3} cm/s a 10^{-6} cm/s. Entretanto, foram considerados aceitáveis considerando os valores estimados pela literatura para a curva granulométrica de cada ponto.

Para o parâmetro de declividade média da área de contribuição da feição, Pascoto et al. (2020b) desenvolveram um mapa de declividade utilizando mapas topográficos do INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Espacial), em uma escala de 1: 10.000. No gráfico de Pascoto et al. (2020b), foi observado que existe uma pequena área com declividade entre 12,1% e 20%, mas com a maior parte da cidade na faixa de 3,1% a 6%. Entre as feições erosivas analisadas, a declividade variou entre 2,1% (feição 8) e 7,5% (feição 1).

A classificação do uso do solo foi baseada em imagens de satélite do Google Earth (PASCOTO et al., 2020a). As áreas foram então classificadas e medidas de acordo com a proposta por Costa et al. (2018). Assim, uma feição está localizada em mata ciliar (feição 1), duas em área de reflorestamento (feição 2 e 4), três em área residencial (feições 5, 6A e 9), duas em corpos d'água (feições 7 e 8) e duas em área de pastagem (feições 3 e 6).

3.2.3. Análise de dados usando o método AHP

O método do Processo Analítico Hierárquico (AHP) foi usado para analisar todos os mapas desenvolvidos por Pascoto et al. (2020b). O método utiliza comparações em pares para priorizar critérios e auxiliar na tomada de decisões complexas, onde os tomadores de decisão não precisam fornecer um julgamento numérico. Podem fazer uma avaliação qualitativa, definindo a intensidade da importância de cada julgamento, conforme proposto por Saaty (1980; 1987) (Tabela 1).

A Tabela 3 mostra a matriz de julgamento dos fatores influenciadores, com a última coluna mostrando os pesos obtidos após a comparação das variáveis em pares. Em ordem decrescente, o maior peso obtido foi para o uso do solo (0,393), seguido por frações de argila e areia (0,200 cada), declividade (0,129) e permeabilidade e erodibilidade (0,039 cada). A matriz de julgamento foi considerada satisfatória, pois a taxa de consistência (CR) obtida foi de 0,045, abaixo de 1 (SAATY, 1980).

Tabela 3 - Matriz de julgamento, pesos e taxa de consistência (CR) do método AHP

Variáveis	Declividade	Areia	Argila	Permeabilidade	Erodibilidade	Uso e ocupação	Pesos
Declividade	1	1/3	1/3	5	5	1/3	0,129
Areia	3	1	1	5	5	1/3	0,200
Argila	3	1	1	5	5	1/3	0,200
Permeabilidade	1/5	1/5	1/5	1	1	1/7	0,039
Erodibilidade	1/5	1/5	1/5	1	1	1/7	0,039
Uso e ocupação	3	3	3	7	7	1	0,393
Taxa de consistência (CR): 0,045							

Tendo definido os pesos de cada fator que influenciam os processos erosivos usando o método AHP, foi gerada uma equação (2), embasada na equação (1). Essa equação pode descrever o cenário atual de suscetibilidade ao desenvolvimento de feições erosivas lineares, uma vez que os parâmetros pesquisados explicam apenas estas características, com os fatores de influência (F) dados por $F_{uso\ e\ ocupação}$, F_{areia} , F_{argila} , $F_{declividade}$, $F_{permeabilidade}$ e $F_{erodibilidade}$:

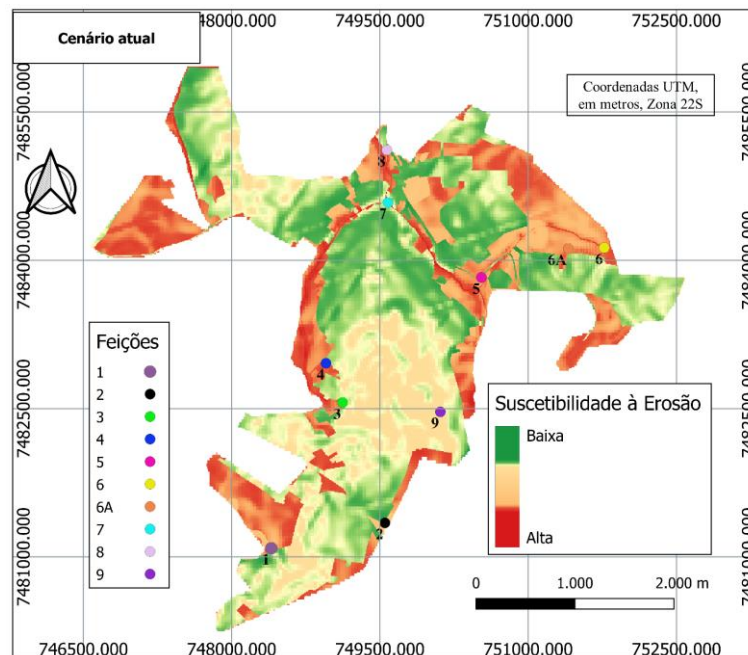
$$Suscetibilidade = (F_{uso\ e\ ocupação} * 0,393) + (F_{areia} * 0,200) + (F_{argila} * 0,200) + (F_{declividade} * 0,129) + (F_{permeabilidade} * 0,039) + (F_{erodibilidade} * 0,039) \quad (2)$$

Os valores de cada um desses fatores foram determinados de duas maneiras diferentes. Para uso do solo, areia, argila, permeabilidade e erodibilidade, o valor do parâmetro foi retirado de cada pixel de interesse. Para a declividade, foi calculado a declividade média.

3.2.4. Construção do cenário atual

Com a ajuda da álgebra do mapa SIG, foi gerado o cenário atual de suscetibilidade para o desenvolvimento de processos erosivos lineares (Figura 3), usando a equação (2) na calculadora raster do programa QGIS 3.4.14.

Figura 3 - Cenário atual de suscetibilidade ao desenvolvimento de feições erosivas lineares



3.2.5. Validação do Cenário Atual

Todas as feições estão localizadas nas áreas mais suscetíveis à erosão. A única exceção é a feição 9, que está localizada em uma região intermediária de suscetibilidade. Essa feição foi a única classificada como ravina ativa, de acordo com Pascoto (2020). As demais erosões hídricas foram classificadas como voçorocas. A principal diferença entre a classificação em ravinas ou voçorocas levou em conta o tamanho da feição e o afloramento do lençol freático. Assim, a classificação da feição 9 no cenário atual como suscetibilidade intermediária está relacionada a

um tipo de feição de erosão de menor proporção e que, portanto, não alcançou e provavelmente não alcançará o lençol freático.

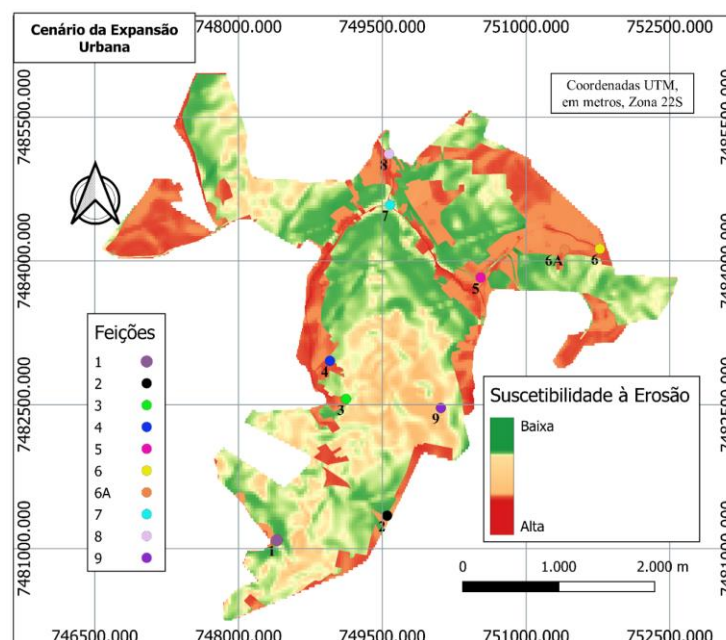
Tais fatos foram comprovados com a observação da região da feição erosiva, que aponta para declividades menores em relação às outras feições e à ação antrópica específica, indicando a presença de uma galeria pluvial que, no entanto, é ineficiente como mostra a Tabela 1. Esta análise corrobora a validação do cenário atual de suscetibilidade ao desenvolvimento de feições erosivas lineares.

Além disso, observa-se que as áreas urbanizadas com alta impermeabilização devido à pavimentação das ruas são os lugares com as menores taxas de suscetibilidade, enquanto os lugares mais distantes, mais próximos da periferia da cidade, são os que apresentam as maiores taxas. Isso pode ser explicado devido ao fato de que essas áreas são geralmente a transição entre o solo impermeabilizado da cidade e o solo permeável da zona rural. Os locais onde há concentração do fluxo através da rua indicam a necessidade da adoção de obras para dissipar a energia do escoamento, além da manutenção periódica em todo o sistema de drenagem da cidade, corroborando o estudo de Pascoto et al. (2020a)

3.3 Geração de cenários futuros

Com o cenário atual validado, foi possível criar um cenário futuro (Figura 4) com uma suposta expansão urbana. Como resultado da discussão entre as autoridades governamentais, investidores, grupos de pesquisa e população sobre possíveis mudanças futuras, a escolha da expansão sobre a região sudoeste foi motivada pela possível implementação futura de dois loteamentos urbanos, totalizando 600 lotes de casas.

Figura 4 - Cenário futuro de suscetibilidade ao desenvolvimento de feições erosivas lineares com uma possível expansão urbana na região sudoeste do município



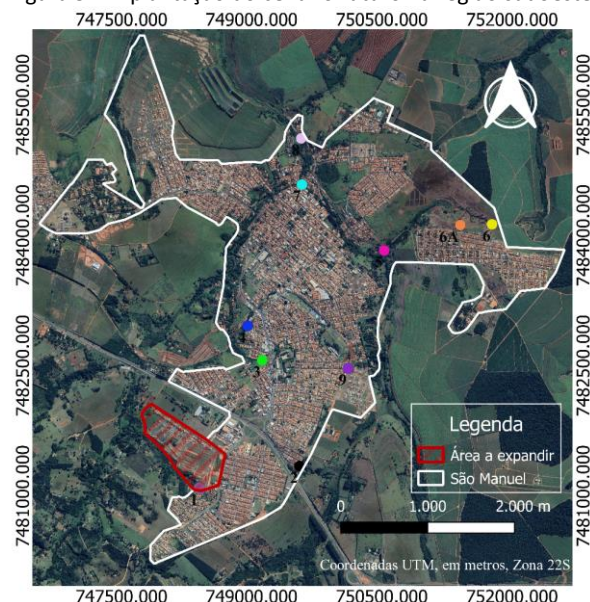
O cenário futuro gerado mostrou três pontos de alta suscetibilidade à erosão na região sudoeste, indicando aos investidores possíveis pontos que poderiam apresentar problemas

relacionados à erosão hídrica linear e, assim, indicando possíveis locais onde seria interessante estudar a implementação de obras para dissipar a energia do escoamento superficial concentrado, como escadas hidráulicas ou o uso de gabiões. Também é possível sugerir um estudo de interferência de vizinhança e propor medidas compensatórias para a aprovação do projeto.

4. IMPLEMENTAÇÃO DO CENÁRIO FUTURO

Os loteamentos começaram a ser implementados em 2019 e as primeiras casas foram construídas em 2021. A pesquisa foi realizada antes do início da implementação e foi possível avaliar o efeito sobre a suscetibilidade à erosão, validando o cenário futuro gerado no estudo. Assim, foram realizadas visitas ao local e não foram encontradas novas feições erosivas na área, corroborando o resultado encontrado no desenvolvimento do cenário futuro (Figura 5).

Figura 5 - Implantação do cenário futuro na região sudoeste



5. CONCLUSÕES

A construção dos cenários para avaliar a suscetibilidade à erosão linear deve considerar, entre outros fatores, o ambiente físico através do levantamento de parâmetros capazes de representar os processos naturais. O uso dessa metodologia é eficaz para o funcionamento e governança das cidades, devido ao sucesso obtido com a aplicação em diversas áreas, tais como mudança no uso do solo, uso da água, mobilidade urbana, entre outros.

Na área estudada, a análise dos resultados dos fatores que influenciam os processos erosivos indicou a prioridade do fator uso do solo, seguido pela textura do solo, declividade e permeabilidade com erodibilidade. A definição da prioridade dos fatores pelo método AHP, independentemente da ordem obtida, comprova a eficiência do uso de cenários futuros como ferramenta para a gestão de territórios que enfrentarão a expansão urbana. Este estudo indicou o fator de uso do solo como a prioridade máxima, indicando a necessidade de tomada de decisão para mitigar esta interferência. Portanto, a quantificação cuidadosa dos fatores é crucial para

garantir o sucesso da aplicação e garantir a prioridade dos fatores de forma mais precisa, proporcionando a geração de cenários mais consistentes com a realidade.

A metodologia mostrou-se eficaz em cidades de pequeno e médio porte no Brasil, com condições físicas semelhantes, pois sua validação e aplicação a um caso real provou a importância para a compreensão do comportamento da área urbana quando expandida em relação à suscetibilidade aos processos erosivos em desenvolvimento. Esses cenários permitem o planejamento de futuras ações antrópicas, que são necessárias para evitar ou mitigar problemas sociais e ambientais existentes em áreas suscetíveis ao desenvolvimento de feições erosivas lineares.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor.

REFERENCIAS

ALAGNA, V.; BAGARELLO, V.; DI PRIMA, S.; GUAITOLI, F.; IOVINO, M.; KEESSTRA, S.; CERDÀ, A. Using Beerkan experiments to estimate hydraulic conductivity of a crusted loamy soil in a Mediterranean vineyard. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 191–200, 2019.

ALEXAKIS, D. D.; HADJIMITSIS, D. G.; AGAPIOU, A. Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of “Yialias” in Cyprus. **Atmospheric Research**, [s. l.], v. 131, p. 108–124, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.02.013>>

AMER, M.; DAIM, T. U.; JETTER, A. A review of scenario planning. **Futures**, [s. l.], v. 46, p. 23–40, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2012.10.003>>

ARABAMERI, A.; REZAEI, K.; POURGHASEMI, H. R.; LEE, S.; YAMANI, M. GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison among three data-driven models and AHP knowledge-based technique. **Environmental Earth Sciences**, [s. l.], v. 77, n. 17, p. 1–22, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-018-7808-5>>

BASILIO, T. C. C.; FUJIMOTO, J. T.; LOPES, T.; ASCIUTTI, G. A. M.; LORANDI, R.; DE LOLLO, J. A. Influência da Forma das Encostas na Suscetibilidade à Erosão na Bacia Hidrográfica do Rio Claro (Santa Rita do Passa Quatro, SP). **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 71, n. 1, p. 233–252, 2019.

BIYIK, C. Developing urban transport in Turkey with greater consideration for sustainability. **Preprint**, [s. l.], n. April, 2019. Disponível em: <<https://www.preprints.org/manuscript/201904.0198>>

COSTA, C. W.; LORANDI, R.; DE LOLLO, J. A.; IMANI, M.; DUPAS, F. A. Surface runoff and accelerated erosion in a peri-urban wellhead area in southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, [s. l.], v. 77, n. 5, p. 1–18, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7366-x>>

DA SILVA, A. M.; MORADI, E.; RODRIGO-COMINO, J.; CERDÀ, A. Spatial variability of soil roughness in persimmon plantations: A new combined ISUM (improved stock unearthing method) approach. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 106, n. June, p. 105528, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105528>>

DE PLOEY, L. Crusting and time-dependent rainwash mechanisms on loamy soil. **RPC Morgan**, [s. l.], p. 139–152, 1981.

DEVATHA, C. P.; DESHPANDE, V.; RENUKAPRASAD, M. S. Estimation of Soil loss Using USLE Model for Kulhan Watershed, Chattisgarh- A Case Study. **Aquatic Procedia**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 1429–1436, 2015.

DREBORG, K. H. Essence of backcasting. **Futures**, [s. l.], v. 28, n. 9, p. 813–828, 1996.

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**, [s. l.], v. 4, n. 1, 2017.

EZEZIKA, O. C.; 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**, [s. l.], v. 2, n. 10, p. 286–291, 2011. Disponível em: <<http://www.academicjournals.org/JSSEM>>

GAMMAGE, L. C. **Development of a scenario-based approach for responding to change in fishery systems: A case study in the small-scale fisheries of South Africa's Southern Cape**. 2019. University of Cape Town, [s. l.], 2019.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, ... **Bases para o Plano Estadual de Habitação de São Paulo**, 2012.

HALEFOM, A.; TESHOME, A. Modelling and mapping of erosion potentiality watersheds using AHP and GIS technique: a case study of Alamata Watershed, South Tigray, Ethiopia. **Modeling Earth Systems and Environment**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 819–831, 2019.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s40808-018-00568-6>>

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**, [s. l.], v. 574, p. 95–108, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.019>>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Cidades e Estados**. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-manuel.html>>. Acesso em: 14 dez. 2022.

IPT, I. de P. T. **Consolidação do projeto orientação para o controle à erosão no Estado de São Paulo**, IPT, 1989.

IWANIEC, D. M.; COOK, E. M.; DAVIDSON, M. J.; BERBÉS-BLÁZQUEZ, M.; GEORGESCU, M.; KRAYENHOFF, E. S.; MIDDEL, A.; SAMPSON, D. A.; GRIMM, N. B. The co-production of sustainable future scenarios. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 197, n. December 2019, p. 103744, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103744>>

IWANIEC, D.; WIEK, A. Advancing Sustainability Visioning Practice in Planning—The General Plan Update in Phoenix, Arizona. **Planning Practice and Research**, [s. l.], v. 29, n. 5, p. 543–568, 2014.

JAHN, T.; BERGMANN, M.; KEIL, F. Transdisciplinarity: Between mainstreaming and marginalization. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 79, p. 1–10, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.04.017>>

JAZOULI, A. El; BARAKAT, A.; KHELLOUK, R.; RAIS, J.; BAGHDADI, M. El. 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**, [s. l.], v. 13, p. 361–374, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.12.004>>

JIONGXIN, X. Benggang erosion: The influencing factors. **Catena**, [s. l.], v. 27, n. 3–4, p. 249–263, 1996.

KACHOURI, S.; ACHOUR, H.; ABIDA, H.; BOUAZIZ, S. Soil erosion hazard mapping using Analytic Hierarchy Process and logistic regression: a case study of Haffouz watershed, central Tunisia. **Arabian Journal of Geosciences**, [s. l.], v. 8, n. 6, p. 4257–4268, 2015.

KOKS, E. E.; JONGMAN, B.; HUSBY, T. G.; BOTZEN, W. J. W. Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. **Environmental Science and Policy**, [s. l.], v. 47, p. 42–52, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2014.10.013>>

LANG, D. J.; WIEK, A.; BERGMANN, M.; STAUFFACHER, M.; MARTENS, P.; MOLL, P.; SWILLING, M.; THOMAS, C. J. Transdisciplinary research in sustainability science: Practice, principles, and challenges. **Sustainability Science**, [s. l.], v. 7, n. SUPPL. 1, p. 25–43, 2012.

LOBÃO, J. S. B.; FRANCA-ROCHA, W. de J. S. Da; SILVA, A. B. Da. GEOPROCESSAMENTO NA MODELAGEM DA VULNERABILIDADE NATURAL À EROSÃO NO MUNICÍPIO DE MORRO DO CHAPÉU-BA Geoprocessing in Modeling Vulnerability to Natural Erosion in the City of Morro do Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS Universidade Estadual. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 63, n. 1, p. 101–114, 2011. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/viewFile/362/354>>

MANNERS, R.; BLANCO-GUTIÉRREZ, I.; VARELA-ORTEGA, C.; TARQUIS, A. M. Transitioning European protein-rich food consumption and production towards more sustainable patterns-Strategies and policy suggestions. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 5, 2020.

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

NASSAUER, J. I.; CORRY, R. Using Normative Scenarios in Landscape Ecology. **Landscape Ecology**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 343–356, 2004.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 196–199, 1979.

NORSTRÖM, A. V.; CVITANOVIC, C.; LÖF, M. F.; WEST, S.; WYBORN, C.; BALVANERA, P.; BEDNAREK, A. T.; BENNETT, E. M.; BIGGS, R.; DE BREMOND, A.; CAMPBELL, B. M.; CANADELL, J. G.; CARPENTER, S. R.; FOLKE, C.; FULTON, E. A.; GAFFNEY, O.; GELCICH, S.; JOUFFRAY, J. B.; LEACH, M.; LE TISSIER, M.; MARTÍN-LÓPEZ, B.; LOUDER, E.; LOUTRE, M. F.; MEADOW, A. M.; NAGENDRA, H.; PAYNE, D.; PETERSON, G. D.; REYERS, B.; SCHOLES, R.; SPERANZA, C. I.; SPIERENBURG, M.; STAFFORD-SMITH, M.; TENGÖ, M.; VAN DER HEL, S.; VAN PUTTEN, I.; ÖSTERBLOM, H. Principles for knowledge co-production in sustainability research. **Nature Sustainability**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 182–190, 2020.

PASCOTO, T. V. **Análise fatorial e de componentes principais aplicadas ao estudo dos fatores influenciadores de processos erosivos**. 2020. Universidade Estadual Paulista, [s. l.], 2020.

PASCOTO, T. V.; FUREGATTI, S. A.; PEIXOTO, A. S. P. Consideration of land luse in the evaluation of erosive process in gully erosion. **Revista Eletronica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [s. l.], v. 24, 2020. a.

PASCOTO, T. V.; FUREGATTI, S. A.; PEIXOTO, A. S. P. Avaliação do fator erodibilidade nos processos erosivos , na cidade de São Manuel / SP. **XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, [s. l.], 2020. b.

PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba - SP (Escala 1:100.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos - Volume I**. 1992. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

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**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 99–110, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001>>

PRADEEP, G. S.; KRISHNAN, M. V. N.; VIJITH, H. Identification of critical soil erosion prone areas and annual average soil loss in an upland agricultural watershed of Western Ghats, using analytical hierarchy process (AHP) and RUSLE techniques. **Arabian Journal of Geosciences**, [s. l.], v. 8, n. 6, p. 3697–3711, 2015.

RIDENTE JR, J. L.; CANIL, K.; ALMEIDA, M. C. J.; MONTEIRO, M. C.; TECNOL, P. ANÁLISE DA EROSÃO NO MUNICÍPIO DE SÃO MANUEL , SP. [s. l.], p. 1–8, 2001.

SAATY, R. W. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, [s. l.], v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1987.

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**, [s. l.], v. 35, p. 1735–1744, 2011.

SECRETARIA DE ESTADO DE SANEMANETO E RECURSOS HÍDRICOS. **Plano Municipal de Saneamento de São Manuel**, 2017.

SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C.; OLIVEIRA, R. A.; SABONARO, D. Z.; ROSA, A. H. Análise da suscetibilidade do solo a processos erosivos do parque natural municipal corredores de biodiversidade (PNMCBIO) de Sorocaba (SP). **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, [s. l.], v. 44, p. 169–180, 2018.

SINGH, M. J.; KHERA, K. L. Nomographic estimation and evaluation of soil erodibility under simulated and natural rainfall conditions. **Land Degradation e Development**, [s. l.], v. 20, p. 471–480, 2009.

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

VIJITH, H.; DODGE-WAN, D. Modelling terrain erosion susceptibility of logged and regenerated forested region in northern Borneo through the Analytical Hierarchy Process (AHP) and GIS techniques. **Geoenvironmental Disasters**, [s. l.], v. 6, n. 1, 2019.

VULEVIĆ, T.; DRAGOVIĆ, N.; KOSTADINOV, S.; SIMIĆ, S. B.; MILOVANOVIĆ, I. Prioritization of soil erosion vulnerable areas using multi-criteria analysis methods. **Polish Journal of Environmental Studies**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 317–323, 2015.