

Carta de Suscetibilidade à Erosão Linear Utilizando Parâmetros Geotécnicos de Subsolo na Análise Multicritérios – Teste de Aplicação na Microbacia do Córrego Mineirinho

Linear Erosion Susceptibility Map Using Subsoil Geotechnical Parameters in Multicriteria Analysis– Application Test in The Mineirinho Stream Microbasin

Ileana Carolina Osorio-Acosta  & Denise Balestrero Menezes 

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana, São Carlos, SP, Brasil

E-mails: icoa12@gmail.com; denisebm@ufscar.br

Autor Correspondente: Ileana Carolina Osorio-Acosta; icoa12@gmail.com

Resumo

A necessidade de aprofundar a análise dos processos geológicos de origem combinada (natural-antropogênica) em áreas urbanizadas exige a revisão constante das metodologias a serem utilizadas. Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo construir uma proposta metodológica de inserção de dados geotécnicos de subsolo para elaboração de carta de susceptibilidade a processos erosivos lineares, em uma microbacia. Inicialmente procedeu-se à caracterização do meio físico da microbacia do córrego Mineirinho, na cidade de São Carlos - SP; foram selecionadas variáveis topográficas, antrópicas e atributos dos solos relacionados ao desenvolvimento de processos erosivos: declividade, curvatura das vertentes, variação vertical das texturas dos materiais inconsolidados, parâmetros geotécnicos de resistência à penetração, ângulo de atrito, massa específica do solo, uso e cobertura do solo. Foi feita a caracterização geotécnica dos materiais inconsolidados em laboratório com identificação tátil-visual, análise granulométrica e massa específica dos grãos, e *in situ* com resistência à penetração. O levantamento foi completado com a coleta de dados pré-existentes de sondagens, poços tubulares e ensaios de trabalhos prévios realizados na região de estudo. A junção de dados de campo com correlações empíricas para parâmetros como ângulo de atrito, massa específica do solo e resistência à penetração foi importante para melhor caracterização dos materiais. Foi gerada para a microbacia uma carta de susceptibilidade à erosão linear na escala 1:15.000. A carta apresentou tendência de concentração da classe “susceptibilidade alta” associada a materiais inconsolidados menos resistentes (coluvionares e hidromórficos), com ocupação urbana nas regiões de cabeceira e topografia favorável ao escoamento superficial e ao lançamento de drenagem pluvial nos cursos hídricos; nessa classe foram evidenciadas moderadamente as áreas reconhecidas em campo com desenvolvimento de processos erosivos lineares como a voçoroca da cabeceira do córrego Santa Fé. A metodologia adotada foi adequada e consideramos sua utilização em um mapeamento em escala de detalhe poderia evidenciar melhor as áreas de ocorrência de erosões.

Palavras-chave: Caracterização geotécnica; Correlações empíricas; São Carlos

Abstract

The need to deepen the analysis of combined origin (natural-anthropogenic) geological processes in urbanized areas requires a constant review of the methodologies to be used. In this context, the present research aimed to build a methodological proposal for the insertion of subsoil geotechnical data in the elaboration of a susceptibility map to linear erosive processes, in a microbasin. Initially we carried out the physical environment characterization of the Mineirinho stream microbasin, in the city of São Carlos - SP; topographic, anthropic and soil attributes related to the development of erosive processes were selected: slope, curvature of the slopes, vertical variation of textures of unconsolidated materials, geotechnical parameters of penetration resistance, friction angle, soil density, land use and cover. The geotechnical characterization of the unconsolidated materials was carried out in laboratory with tactile-visual identification, granulometric analysis and specific gravity of the grains, and *in situ* with resistance to penetration. The survey was completed with the collection of pre-existing data from drillings, tubular wells and tests from previous works carried out in the study region. The combination of field data with empirical correlations for parameters such as friction angle, soil density and penetration resistance, was important for a better characterization of the materials. We generated for the watershed a linear erosion susceptibility chart at 1:15,000 scale. The chart showed a trend towards concentration of the “high susceptibility” class associated with less resistant unconsolidated materials (colluvionar and hydromorphic), with urban occupation in the headwaters and topography favorable to surface runoff and the release of rainwater drainage into watercourses. In this class were moderately evidenced the areas with the development of linear erosive processes recognized in the field, such as the gully at the head of the Santa Fé stream. The adopted methodology in GIS was adequate and we consider its use in a detailed scale mapping could better evidence the erosion occurrence areas.

Keywords: Empirical correlations; Geotechnical characterization; São Carlos

1 Introdução

A cartografia das áreas suscetíveis a processos geológicos de erosão está se tornando necessária para o planejamento urbano desde que esses processos, considerados como fator de risco de importância socioeconômica, estão ganhando cada vez mais espaço em áreas urbanizadas.

Nos últimos 30 anos, com o aumento dos acidentes geológicos de origem antropogênica pela pressão de desenvolvimento urbano sobre áreas suscetíveis a processos no Brasil (deslizamento, colapso, erosão, inundação e alagamento), têm sido importantes os esforços em estudos especializados neste tema. No entanto, a maioria das metodologias desenvolvidas até o momento carece de dados de subsolo mais pontuais, que permitam refinar as avaliações das respostas defeituosas dos solos construídos ou as consequências de agravamento das condições geotécnicas dos locais que ainda não foram ocupados (Zaine 2000; Abreu 2006).

Neste sentido é notória a carência de um banco de dados de carácter geológico-geotécnico referente aos materiais subsuperficiais, com aproveitamento de dados de subsolo gerados de escavações e sondagens efetuadas para ocupação urbana, muitos deles inéditos e conservados em arquivos públicos e privados.

Tal situação, comum nas grandes cidades, tanto em São Paulo como em outras regiões do país, se traduz na existência de lacunas nas cartografias de suscetibilidade e risco convencionais e destaca a importância de dedicar uma maior atenção à criação de bancos de dados de geologia urbana, já comuns em outros países (Culshaw & Price 2011).

Há autores no contexto internacional e no Brasil que utilizaram dados da resistência à penetração dos solos, coesão, ângulo de atrito e massa específica do solo em estudos de instabilidade de encostas (Padrón 2019), e especificamente de resistência à penetração dos solos na ocorrência de processos erosivos (Guimarães 2008), obtendo algumas vezes resultados diferenciados aos estudos convencionais que excluem estes parâmetros nas suas metodologias. Já Câmara e Pereira (2005) aproveitaram dados existentes para a correlação dos resultados dos ensaios de *Standard Penetration Test* (SPT) e parâmetros geotécnicos dos solos para um zoneamento geotécnico na cidade de Natal (RN)

Dentro desse contexto, apresenta-se uma proposta metodológica de análise multicritérios em Sistema de Informações Geográficas (SIG), baseada no aproveitamento de dados de subsolo (ensaios de resistência, sondagens geotécnicas, poços, etc.), próprios e preexistentes, para um zoneamento da suscetibilidade à erosão linear, considerando que as propriedades físicas do solo são determinantes na ocorrência de processos erosivos (Guerra & Botelho 1996).

Considerando algumas dificuldades de se obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento quando a amostragem indeformada é complexa para alguns tipos de solos, como no caso das areias, recorre-se, em geral, a procedimentos indiretos para obtenção de dados das características *in situ* de resistência ao cisalhamento. No caso deste trabalho, isso ocorreu com alguns dos parâmetros geotécnicos de interesse, obtidos por correlações principalmente com o valor do N_{SPT} (Bowles 1977; Godoy 1983).

Foi definido o teste de aplicação nas erosões da microbacia do córrego Mineirinho, considerando os parâmetros geotécnicos e texturais dos materiais inconsolidados ocorrentes na área, assim como as características do relevo e as mudanças nos usos e cobertura do solo acarretando na concentração de despejos de água e erosões.

1.1 Caracterização da Área de Estudo

A microbacia hidrográfica do córrego Mineirinho, Município de São Carlos, no interior do Estado de São Paulo (Figura 1), foi escolhida por conter regiões onde estão se desenvolvendo processos erosivos. Estes processos ocorrem nas cabeceiras e no percurso das drenagens, abrangendo áreas já urbanizadas, outras em urbanização recente e áreas rurais, com construções públicas e privadas que poderiam fornecer informações de subsolo.

A microbacia do Mineirinho, com área aproximada de 4,44 km², localiza-se na região centro-oeste da área urbana do município. Inserida na bacia do Rio Monjolinho, a área abrange os bairros Santa Felícia, Santa Angelina, Ipanema, Romeu Tortorelli e Parque Faber.

O córrego Mineirinho possui três nascentes (Figura 1). Duas delas estão completamente inseridas na malha urbana: a nascente principal (1) e o córrego Santa Fé (2); a terceira (3) se encontra dentro do perímetro do campus II da Universidade de São Paulo (USP). A nascente principal (1) se situa no bairro Santa Angelina, com coordenadas UTM 197393.00 m E - 7565298.00 m S (23K), seu curso recebe os dois afluentes (2 e 3) e desemboca no Rio Monjolinho após um percurso de aproximadamente 4 km.

A Microbacia estudada está em área de alta fragilidade geológica-geotécnica, pois drena predominantemente materiais superficiais coluvionares e hidromórficos, arenitos finos pertencentes à Formação Itaqueri e argilas arenosas residuais dos magmatitos básicos da formação Serra Geral (Aguiar 1989); se encontra em região condicionada para a expansão urbana do município de São Carlos-SP, de acordo com o Plano Diretor Vigente (São Carlos 2016).

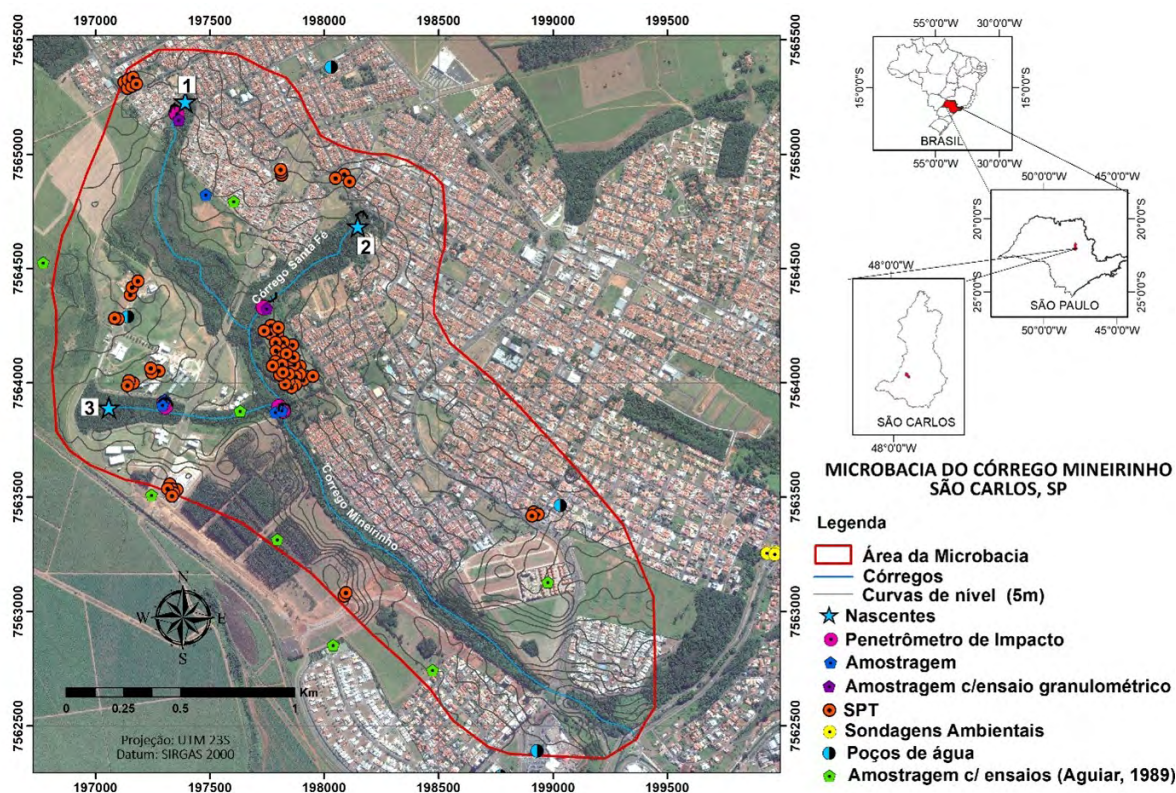


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo, com indicação das nascentes, dos furos de sondagens preexistentes, ensaios *in situ* e coleta de amostras.

2 Materiais e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida seguindo as 7 etapas descritas a seguir, que foram desde os primeiros levantamentos de dados, processamentos intermediários, definição do método, até a geração da carta final.

2.1 Levantamento e Aproveitamento de Dados de Subsolo

Para o levantamento de dados de sondagens (boletins e perfis geotécnicos com SPT) feitas na região de estudo foram contatadas instituições públicas (prefeitura do município, prefeitura do campus USP de São Carlos, companhias de distribuição de gás encanado, de energia elétrica, saneamento e CETESB), empresas que executam sondagens e empresas construtoras que possuem obras civis já executadas ou em andamento em São Carlos. Para os poços de água consultou-se as bases de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e o Portal do Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE), buscando perfis geológicos e informações de nível de água (NA).

A análise de atributos obtidos em relatórios de sondagem SPT, poços tubulares profundos, perfis simples de sondagens de estudos ambientais e ensaios de trabalhos prévios (Aguiar 1989), foi precedida de discussões e revisão bibliográfica sobre características mais relevantes no contexto deste trabalho que deveriam ser avaliadas. Para tanto, foi necessária a avaliação comparativa de informações contidas nos diferentes dados.

Todos os dados foram georreferenciados em coordenadas UTM, *datum* SIRGAS 2000.

Para separação dos diferentes materiais inconsolidados foi feita uma revisão criteriosa em cada um dos boletins de sondagens (Osorio 2020), observando, limite entre as camadas, separação de camadas por faixas de resistência SPT, posição do impenetrável, presença de linha de seixos, cor, textura.

2.2 Seleção das Bases Cartográficas, Imagens Aéreas e de Satélite Disponíveis

Para o reconhecimento da evolução dos processos erosivos e sua relação com as mudanças de usos e cobertura do solo na microbacia do córrego Mineirinho, foram

selecionadas fotografias áreas do projeto IBC- GERCA, voo de agosto de 1971, escala 1:25.000, e do projeto Macro – Metrópole, voo em julho de 1978, escala 1:35.000. Para dados mais recentes foram selecionadas imagens digitais do satélite World View – 2 (WV2), de maio de 2014 e julho de 2018, com resolução espacial de 50cm, cedidas pelo laboratório GESTAU/PPGEU e pelas World Imagery do software ArcGis 10.5, respectivamente.

Para a análise do relevo (Declividade e Curvatura) foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) da imagem de radar do sensor PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) do satélite Alos (Advanced Land Observing Satellite) de 2011, com uma resolução de 12,5m.

2.3 Avaliação Geológico-Geotécnica de Campo

Foi feito o levantamento de campo na microbacia do córrego Mineirinho, com a intenção de observar feições erosivas, algumas previamente identificadas em imagens de satélite, e identificar diferentes características geológico-geotécnicas dos materiais superficiais. Em pontos selecionados o estudo foi aprofundado, com imagens de drone para delimitação de feições de difícil acesso, 9 ensaios de resistência à penetração *in situ* distribuídos em 7 pontos de coleta de amostras em perfil para caracterização e ensaios granulométricos, visando contribuir na geração do mapa de materiais inconsolidados da microbacia. Informações detalhadas podem ser consultadas no trabalho de dissertação de Osorio (2020).

2.3.1. Ensaio *in situ* de Resistência à Penetração e Coleta de Amostras

Foram realizados ensaios *in situ* de resistência à penetração com coleta de amostras, utilizando o penetrômetro de impacto de Stolf (Stolf, Fernandes & Furlani Neto 1983) e trado manual.

As determinações de resistência do solo à penetração foram realizadas em diferentes tipos de solos e com distintos usos, nas profundidades de 10 cm; 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm. Em perfis erosivos, foram realizados ensaios nas diferentes camadas expostas, possibilitando que houvesse a caracterização de todo o pacote de materiais do perfil.

A haste com ponta cônica do aparelho penetra no solo através do impacto do peso (4 kg) que cai de uma altura constante de 40 cm, em queda livre, contando-se o número de impactos (NG) necessários para a penetração, medidos de 10 em 10 cm, até atingir a profundidade de 60 cm (Stolf, Fernandes & Furlani Neto 1983).

A obtenção da resistência à penetração (força por unidade de área) é feita pela conversão dos resultados de

NG obtidos em campo (número de golpes pela distância penetrada), com uso da planilha Excel proposta por Stolf et al. (2014), que contém a “fórmula dos Holandeses modificada”. Sanglerat (1972, apud Oliveira 2019) afirma que a fórmula resultou de uma simplificação da fórmula de Sanders, considerando a energia perdida por o impacto entre as massas (M e m), com um choque totalmente inelástico, sem deformações permanentes.

Os resultados médios de resistência à penetração obtidos deste procedimento foram extrapolados para os materiais onde ocorrem e processados em SIG como um dos parâmetros das cartas das propriedades geotécnicas do solo.

Em cada ponto de ensaio foram retiradas amostras do solo a cada 10 cm de profundidade, utilizando trado de 2 polegadas, segundo a NBR 9603 (Associação Brasileira de Normas Técnicas 2015) acondicionadas em sacos plásticos bem lacrados, para determinação da umidade e ensaios de caracterização em laboratório.

2.3.2. Caracterização de Amostras em Laboratório

Em laboratório as amostras foram pesadas e secas ao ar até próximo à umidade higroscópica seguindo a norma NBR-6457 (Associação Brasileira de Normas Técnicas 2016a). Posteriormente procedeu-se à identificação visual e tátil das amostras, seguindo o roteiro de Ensaios de Laboratório de Mecânica dos Solos (Bonuccelli 2004).

Na sequência foi realizada a análise granulométrica conjunta em 9 amostras de 3 tipos de materiais inconsolidados coletados na pesquisa, todos granulares médios a finos, contemplando o uso de peneiramento e sedimentação das amostras secas ao ar (Associação Brasileira de Normas Técnicas 2016b). O resultado permitiu uma correlação mais acertada entre os materiais inconsolidados descritos em trabalhos anteriores (Aguiar 1989; boletins de sondagens) com os identificados durante a avaliação de campo desta pesquisa.

2.4 Validação e Integração da Informação Geotécnica

Após a revisão das informações dos perfis de solo obtidos de sondagens ambientais, geotécnicas e poços de água, foi realizada a correlação entre as camadas descritas nos relatórios, a interpolação para toda a área estudada (Osorio 2020), e a posterior integração dessas informações com as obtidas em campo (ensaios *in situ*), laboratório e interpretação de fotografias aéreas antigas.

Esta integração de dados permitiu a produção do mapa de materiais inconsolidados da microbacia do córrego Mineirinho, atualizado e com maior detalhamento das unidades.

2.5 Geração de Mapas Temáticos em SIG

Esta etapa compreendeu o processamento de fotografias aéreas, MDE, imagens de radar e de satélite na elaboração dos cartogramas topográfico, declividade, curvatura, materiais inconsolidados e usos e cobertura do solo; foram utilizados os softwares Global Mapper 20 e ArcGIS 10.5.

2.5.1. Cartas de Morfologia do Relevo

A geração das cartas topográfica, de declividade e curvatura se deu pelo processamento das imagens (MDE) do radar Palsar, do satélite Alos, de 2011.

A carta topográfica para a microbacia foi gerada com a ferramenta *Generate Contour (Analysis > Generate contours [from TIN Areas])* do Global Mapper 20, com equidistância de 5 m entre curvas. Posteriormente foi gerada a carta de declividade com a ferramenta *Slope (Spatial Analyst Tools > Surface > Slope)* do ArcGis 10.5, inserindo o MDE como Input Raster. A carta gerada foi reclassificada adaptando às classes de declividade do Instituto de Terras do Estado de São Paulo (ITESP 2000). Como área da microbacia apresenta uma distribuição maior do relevo entre plano e colinoso, foram definidas 5 classes: plana (0-2°), suave (2-5°), moderado (5-10°) colinoso (10-20°) e forte (>20°).

Finalmente foi criada a carta de curvatura, que mostra a forma ou curvatura da declividade, com a ferramenta *Curvature (Spatial Analyst Tools > Surface > Curvature)* do ArcGis 10.5. A área foi classificada em côncava (<0), retilínea (=0) e convexa (>0). Uma curvatura positiva indica que a superfície é convexa na célula, uma curvatura negativa indica que a superfície é côncava na célula e valor 0 indica que a superfície é plana (Sirtoli et al. 2008). As cartas de morfologia do relevo geradas encontram-se disponíveis no trabalho de Osorio (2020).

2.5.2. Mapa de Materiais Inconsolidados e Cartas de Parâmetros Geotécnicos

As informações base utilizadas no mapa de materiais inconsolidados foram obtidas dos trabalhos prévios de Pons (2006) e de Aguiar (1989), acrescidas dos dados de fotointerpretação, trabalho de campo e dados da carta pedológica das áreas urbanas e suburbanas de São Carlos, de Lorandi et al. (1999). A definição das unidades de materiais inconsolidados foi feita de acordo com os atributos dos perfis típicos de alteração, dos ensaios laboratoriais,

de trabalhos de campo e fotointerpretações, seguindo a proposta metodológica de Zuquette & Gandolfi (2004).

A partir do mapa de materiais inconsolidados (texturas), foram geradas as cartas de parâmetros geotécnicos de resistência à penetração, ângulo de atrito e massa específica do solo, baseadas nos dados obtidos de 11 afloramentos de solos residuais e retrabalhados, 74 sondagens de simples reconhecimento (SPT), 5 sondagens ambientais, 7 poços de água e 14 amostras deformadas caracterizadas em laboratório.

A partir dos dados adquiridos do ensaio de resistência à penetração *in situ* e dos valores de N_{SPT} das sondagens geotécnicas existentes, foram calculados os valores de massa específica do solo e ângulo de atrito para cada um dos materiais, através de correlações de parâmetros dos solos propostas inicialmente por Bowles (1977) (Tabela 1) e adaptadas às condições brasileiras por Godoy (1983) (Equação 1).

Tabela 1 Correlações entre parâmetros dos solos e valores obtidos em sondagens SPT. Adaptado de Bowles (1977).

Descrição	AREIAS				
	Muito mole	Fofa	Média	Compacta	Muito compacta
SPT	0 a 4	4 a 10	10 a 30	30 a 50	> 50
γ (g/cm ³)	1,1 a 1,6	1,4 a 1,8	1,7 a 2,0	2,0 a 2,2	2,2 a 2,4

Foi aplicada a equação de correlação de ângulo de atrito (ϕ) a seguir:

$$\phi = 28^\circ + 0,4 \cdot N_{SPT} \text{ em graus proposta por Godoy (1983) (1)}$$

A correlação adotada para o cálculo de resistência à penetração foi derivada do método de Aoki & Velloso (1975, apud Cintra & Aoki 2010), que se baseou na fórmula de capacidade de carga para estacas padrões, com correlações com o ensaio de penetração estática do cone (CPT), por meio dos valores da resistência de ponta do cone (q_c) e do atrito lateral na luva (f_s). Estes autores propuseram que o valor de resistência de ponta do cone (q_c) poderia ser substituído por uma correlação com o índice de resistência à penetração (N_{SPT}), pela seguinte equação:

$$q_c = K \cdot N_{SPT} \quad (2)$$

Onde o coeficiente K depende do tipo do solo (Tabela 2).

Tabela 2 Coeficiente K. Modificado de Aoki & Velloso (1975, apud Cintra & Aoki 2010, p. 25).

SOLO	K (MPa)
Areia	1,00
Areia siltosa	0,80
Areia siltoargilosa	0,70
Areia argilosa	0,60
Areias argilosiltosa	0,50
Silte	0,40
Silte arenoso	0,55
Silte arenoargiloso	0,45
Silte argilosa	0,23
Silte argiloarenosa	0,25
Argila	0,20
Argila arenosa	0,35
Argila arenosiltosa	0,30

O mapa de materiais inconsolidados foi subdividido em 4 subcartas, uma para cada atributo avaliado (textura, resistência à penetração, ângulo de atrito e massa específica do solo).

2.5.3. Mapas de Uso e Cobertura do Solo

Nesta etapa foi realizado o mapa de uso e cobertura do solo a partir de análise e interpretação de imagens do satélite WV2, datadas de julho de 2018, seguindo a parametrização do Manual Técnico de Uso da Terra do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2013).

2.6 Elaboração de Carta de Suscetibilidade à Erosão Linear

Para a geração da carta de suscetibilidade à erosão linear da área de estudo foram aplicadas a análise multicritério e a álgebra de mapas, considerando como fatores condicionantes os parâmetros morfológicos e os tipos de materiais inconsolidados (Figura 2).

Uma vez definidas as variáveis que seriam consideradas, procedeu-se à geração dos mapas e cartas base, que receberam pesos como insumo para a geração da carta de suscetibilidade à erosão linear. Estes cartogramas passaram pela conversão para *raster* para viabilizar os cruzamentos de informações no SIG.

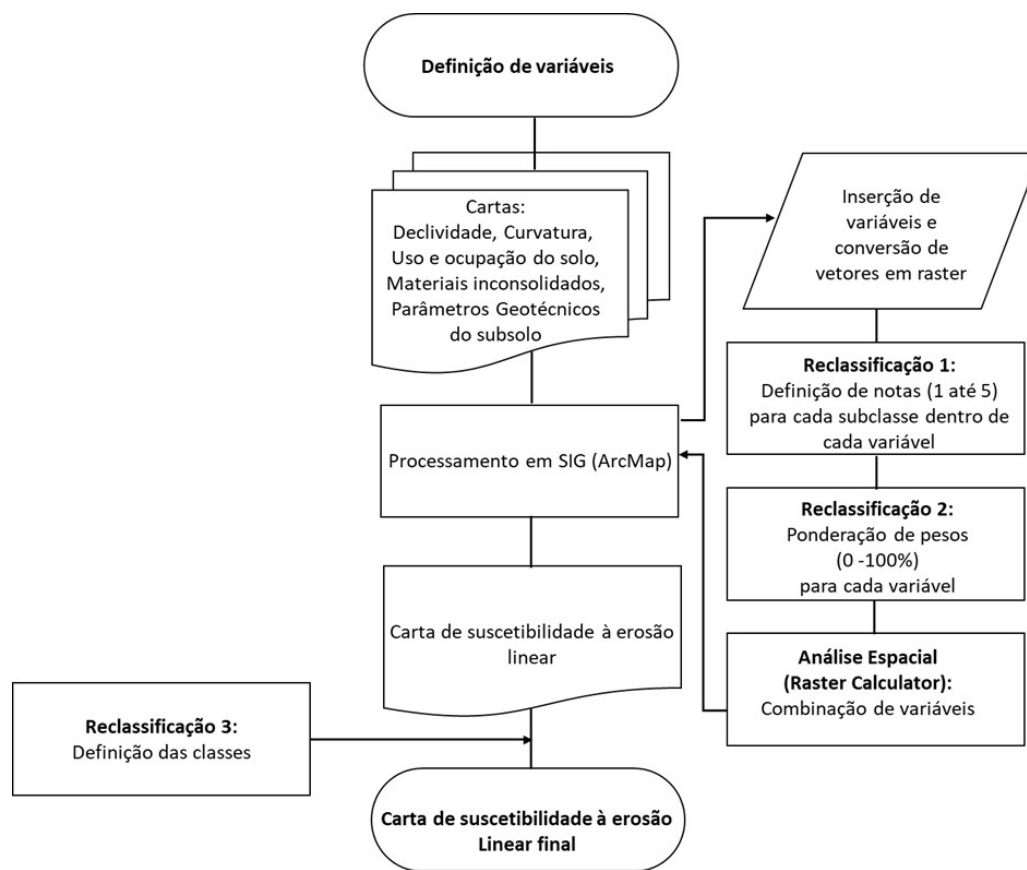


Figura 2 Fluxograma metodológico para a geração da carta de susceptibilidade à erosão linear.

Para converter o arquivo vetorial em matricial foi necessário utilizar a coluna da tabela de atributos correspondente à informação que foi considerada na análise (abrindo o *ArcToolbox* e clicado em *Conversion tools > To raster > Feature to raster*). Para cada uma das variáveis consideradas foram geradas subclasses com notas de 1 até 5 (Reclassificação 1, Figura 2), de maneira que quanto maior a nota, maior a importância na susceptibilidade erosiva.

Na sequência, cada variável recebeu um peso que, somados, completaram 100% (0-1) (Reclassificação 2, Figura 2). Diferentemente do procedimento anterior, no qual os pesos foram atribuídos a cada subclasse, nesta etapa os pesos foram atribuídos a cada carta de uma forma geral, para indicar a influência de cada fator condicionante na potencialização de processos erosivos.

Após converter todos os *shapefiles* (de cada variável) em arquivo *raster*, foi necessário reclassificar os valores/informações da coluna da tabela de atributos selecionada (*Spatial Analyst > Reclassify*). Em seguida, para combinar as variáveis e criar o mapa de susceptibilidade à erosão utilizou-se a ferramenta *Spatial Analyst > Raster Calculator*; e uma vez gerado o *raster* de susceptibilidade à erosão foram definidas e renomeadas as classes (*Symbology > Classified*) (Reclassificação 3, Figura 2).

O resultado foi uma carta de Suscetibilidade à Erosão Linear, reclassificada.

3 Resultados e Discussão

A partir da coleta dados de subsolo pré-existentes foram obtidos 86 perfis de sondagens de subsolo: 74 sondagens SPT, 5 sondagens de simples reconhecimento de estudos ambientais e 7 perfis de poços tubulares de água (Figura 1).

Os dados de sondagens e perfis geológicos de poços tubulares compilados serviram para o zoneamento dos diferentes materiais do subsolo da região e suas características, por meio da extrapolação das informações obtidas de cada perfil. Porém deve-se ressaltar que para a correlação de camadas, por serem aproveitados relatórios de diversas instituições que usaram termos e formatos diferentes, foi necessário aprofundar com verificações visuais e com ensaios em campo. Dos perfis de poços foram extraídas apenas as separações entre os materiais coluvionar, Itaqueri e basalto, pois não há uma individualização das variações internas de cada um. As individualizações foram obtidas dos perfis de sondagens e dos trabalhos de campo.

Na avaliação em campo foram identificados 11 afloramentos das camadas de materiais inconsolidados, em 9 pontos de observação, e 5 pontos com desenvolvimentos de feições erosivas lineares (4 ravinas e 1 voçoroca), de diversas

dimensões e profundidade, nas quais foram coletadas amostras (para descrição e ensaios laboratoriais). Foram realizados 9 pontos de ensaios *in situ* de resistência à penetração, para 5 tipos de materiais inconsolidados, separados em 3 unidades denominadas de “Coluvionar”, “Hidromórficos” e “Residual Itaqueri” (Figura 3). A transição entre os materiais hidromórficos e coluvionar é lateral, indicando que foram formados a partir do hidromorfismo do próprio material coluvionar com acresção de matéria orgânica, na região dos cursos d’água.

Embora apareçam juntas na unidade “Hidromórficos” (Figura 3), nos perfis laterais aos cursos d’água observa-se a presença de 3 camadas de espessuras variáveis. O material mais superficial desta unidade é de coloração preta, com muita matéria orgânica decomposta, fração arenosa de pouco mais de 50% e resistência à penetração de 0,56 a 1,81 MPa, classificado como areia argilo-siltosa muito mole. A camada intermédia branco-acinzentada, é predominantemente arenosa (69,6%) e com resistência à penetração de 0,56 a 8,1 MPa. A camada inferior corresponde a uma areia silto-argilosa (aproximadamente 70% de areia) de coloração amarelada com presença de pedregulhos na base e com resistência à penetração média de 2,735 MPa.

Estes materiais foram caracterizados em laboratório para a posterior integração da informação geológico-geotécnica reunida (compilada e gerada) para cada um dos materiais inconsolidados reconhecidos na área de estudo, elaborando-se o Mapa de Materiais Inconsolidados da área (Figura 4A). Na Figura 4B é apresentado o mapa de uso e cobertura do solo para correlacioná-lo aos processos erosivos lineares na microbacia do córrego Mineirinho, ligados ao arruamento e drenagem urbana que acompanham a declividade do terreno em direção aos cursos d’água. Os materiais hidromórficos cinza e amarelo não foram inseridos nos mapas por aflorarem apenas nas calhas dos córregos, impossibilitando seu registro em superfície. O material Residual Itaqueri aflora somente nos pontos das erosões e aparece no mapa de detalhe da cabeceira do córrego Santa Fé (Figura 4C), uma vez que neste local o processo erosivo é de dimensões maiores, com afloramento do lençol freático, já sendo considerado uma voçoroca.

Considerando-se as unidades de materiais inconsolidados definidas anteriormente e incluindo os residuais dos basaltos caracterizados por Aguiar (1989), gerou-se a Tabela 3 que agrupa além da classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), as espessuras, valores médios de massa específica dos sólidos (ou dos grãos) de cada material inconsolidado, os valores médios dos parâmetros geotécnicos de resistência à penetração e as correlações com massa específica do solo e ângulo de atrito.

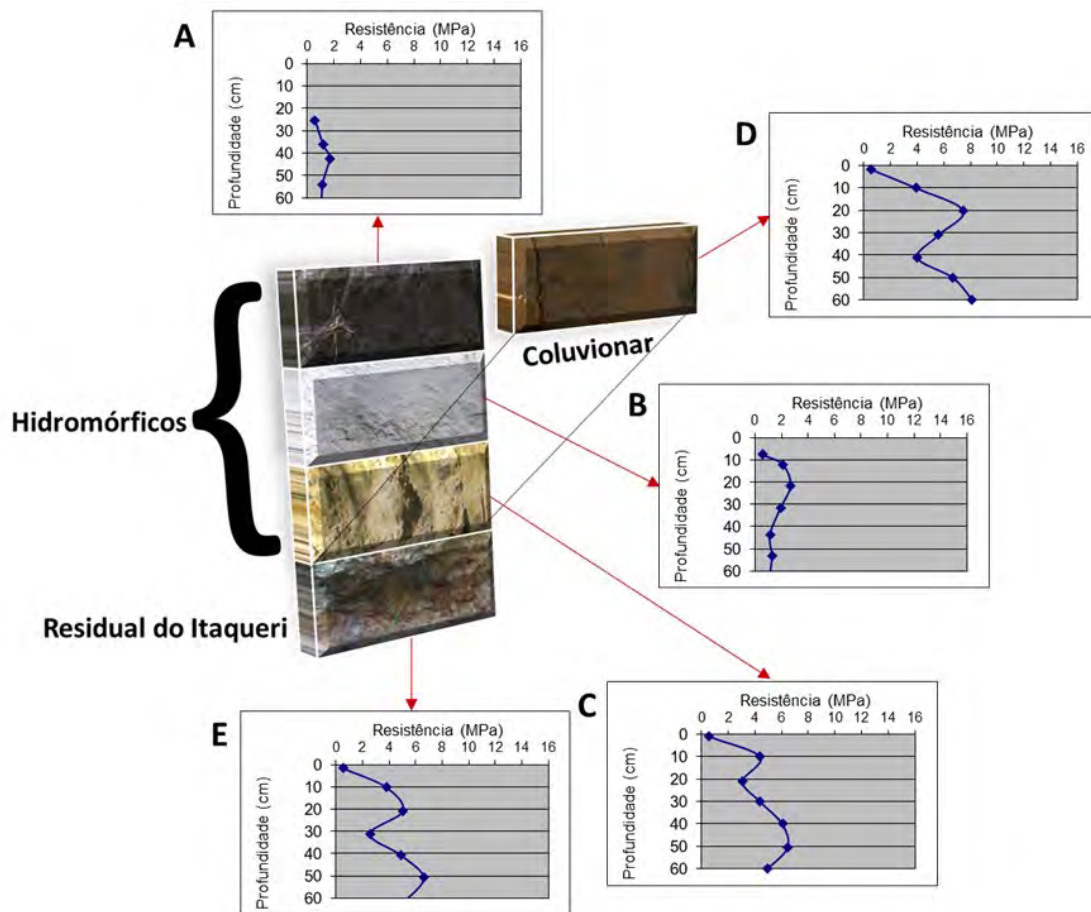


Figura 3 Esquema do empilhamento estratigráfico dos materiais inconsolidados e gráficos de resistência à penetração para cada camada: A. Material Hidromórfico Preto; B. Material Hidromórfico Branco-Acinzentado; C. Material Hidromórfico Amarelado; D. Coluvionar; E. Residual Itaqueri.

Tabela 3 Classificação dos materiais inconsolidados. Espessura (medições em campo e de sondagens SPT); valores médios dos parâmetros geotécnicos medidos e correlacionados: γ_s - massa específica dos sólidos (ensaios laboratoriais próprios para os materiais Hidromórficos e Residual Itaqueri, e de Aguiar (1989) para os materiais Coluvionar e Residual do Basalto); ϕ - ângulo de atrito, obtido da equação de correlação de Godoy (1983); γ - massa específica do solo, obtida das correlações de Bowles (1977). Modificado de Osorio (2020).

Material Inconsolidado	Classificação SUCS	Espessura (m)	γ_s	Resistência à Penetração (MPa)	Parâmetros Geotécnicos	
			(g/cm ³)		ϕ (°)	γ (g/cm ³)
Coluvionar	Areia (fina a média) argilo-siltosa	1 - 35	2,61	1,88	29	1,80
Hidromórfico Preto	Areia (fina a média) silto-argilosa com matéria orgânica	< 2	2,42	1,19	25	1,10
Hidromórfico Cinza	Areia (média a fina argilosa com silte)	2-5	2,82	2,52	29	1,80
Hidromórfico Amarelado	Areia (média-fina) siltoargilosa	2-5	2,87	2,74	30	1,80
Residual da Formação Itaqueri	Areia (média-fina) argilosiltosa com pedregulhos	2 - 28	2,87	6,75	31	1,90
Residual do Basalto	Argila arenosa (Aguiar 1989)	2 - 15	2,80	9,34	38	1,95

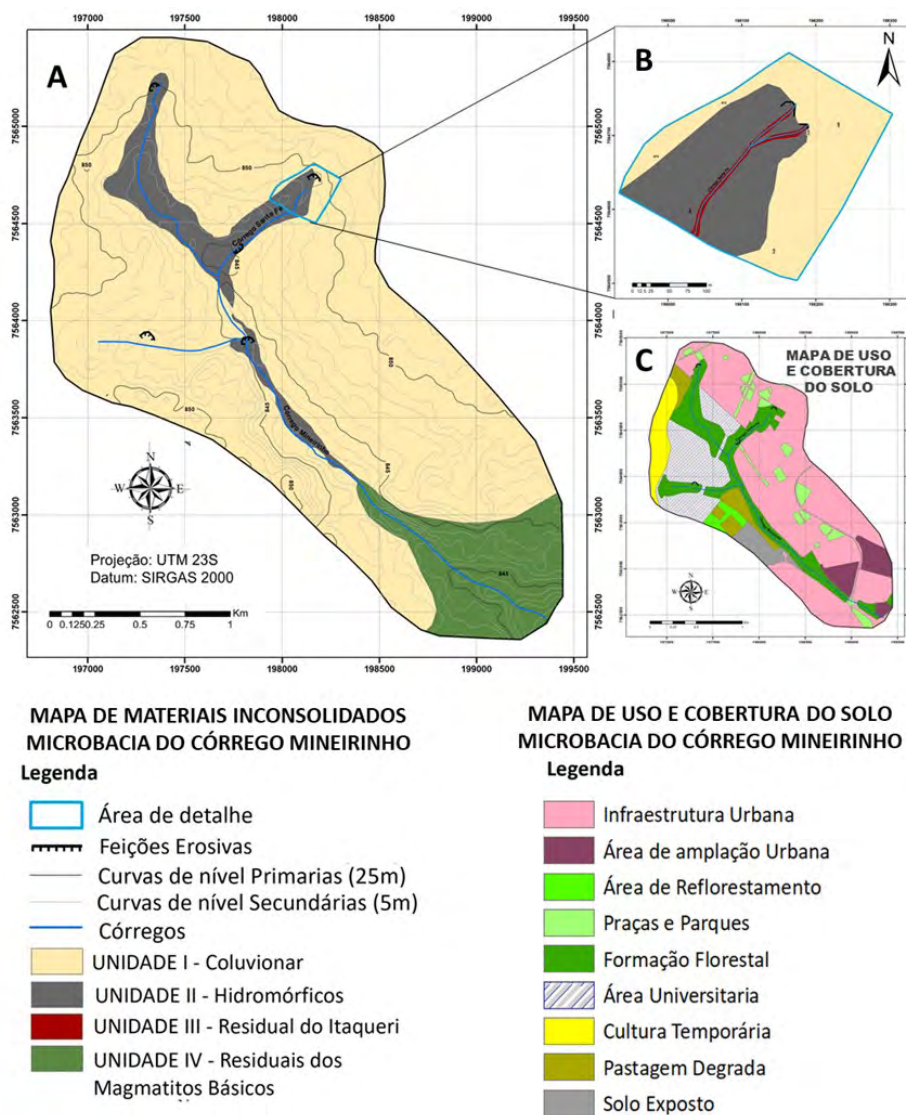


Figura 4 A. Mapa de Materiais Inconsolidados com locação das feições erosivas; B. usos e cobertura do solo; C. detalhe da cabeceira do córrego Santa Fé na microbacia do córrego Mineirinho, São Carlos, SP.

Os mapas, cartas e subcartas foram reclassificados (Reclassificação 1, Figura 2), recebendo a atribuição de pesos equivalentes à sua importância na suscetibilidade à erosão linear (Tabelas 4 a 10) segundo parâmetros (Tabela 3) definidos a partir da revisão de trabalhos prévios e outros obtidos de ensaios laboratoriais e de campo.

Foram utilizados pesos de 1 a 5 para cada variável. Quanto maior o peso, maior a sua importância e influência como condicionante erosivo.

Os mapas e cartas base obtidos para cada variável e processados no ArcMap para o formato *raster* foram novamente reclassificados (Reclassificação 2, Figura 2; Tabela 11). Diferentemente do procedimento anterior, no qual os pesos foram atribuídos a cada classe, nesta etapa

Tabela 4 Atribuição dos pesos para as classes de declividade.

DECLIVIDADE		
Classes (°)	Peso	Importância
0.00000001-2	1	Muito Baixa
2.00000001-5	2	Baixa
5.00000001-10	3	Média
10.00000001-20	4	Alta
> 20.00000001	5	Muito Alta

Fonte: Osorio (2020).

os pesos foram atribuídos a cada cartograma de uma forma geral, para indicar a influência de cada fator condicionante na potencialização de processos erosivos.

Tabela 5 Atribuição dos pesos para as classes de curvatura.
Fonte: Osorio (2020).

CURVATURA		
Classes	Peso	Importância
Convexo	2	Baixa
Retilíneo	3	Média
Côncavo	4	Alta

Fonte: Osorio (2020).

Tabela 6 Atribuição dos pesos para as classes de usos e cobertura do solo.

USOS E COBERTURA DO SOLO		
Tipo de ocupação	Peso	Importância
Área de Reflorestamento e Formação Florestal	1	Muito Baixa
Praças e parques	2	Baixa
Área Universitária, Área de Ampliação Urbana e Cultura Temporária	3	Média
Infraestrutura urbana e Pastagem degradada	4	Alta
Solo Exposto	5	Muito Alta

Fonte: Osorio (2020).

Tabela 7 Atribuição dos pesos para as classes de textura dos materiais inconsolidados.

TEXTURA			
Unidade	Classes	Peso	Importância
Residual do Basalto	Argilas arenosas	1	Muito Baixa
Residual Itaqueri	Areias médias siltoargilosas com pedregulhos	2	Baixa
Coluvionar	Areia (fina) argilo-siltosa	3	Média
Hidromórfico Preto	Areia (fina a média) silto-argilosa, com matéria orgânica	4	Alta

Fonte: Osorio (2020).

Tabela 8 Atribuição dos pesos para as classes de resistência à penetração dos materiais inconsolidados.

RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO		
Classes (MPa)	Peso	Importância
9,34	1	Muito Baixa
6,75	2	Baixa
1,88	4	Alta
1,18	5	Muito Alta

Fonte: Modificado de Osorio (2020).

Tabela 9 Atribuição dos pesos para as classes de ângulo de atrito dos materiais inconsolidados.

ÂNGULO DE ATRITO		
Classes (°)	Peso	Importância
38	1	Muito Baixa
31	3	Média
29	4	Alta
25	5	Muito Alta

Fonte: Osorio (2020).

Tabela 10 Atribuição dos pesos para as classes de massa específica dos materiais inconsolidados.

MASSA ESPECÍFICA		
Classes (kN/m ³)	Peso	Importância
19,5	1	Muito Baixa
19,0	2	Baixa
18,0	3	Média
11,0	5	Muito Alta

Fonte: Osorio (2020).

Importante ressaltar que a eleição de parâmetros e ponderação de pesos na Análise Multicritérios para a avaliação da suscetibilidade à erosão linear, neste trabalho, baseou-se na correlação das características das feições erosivas existentes na área de estudo com a variação vertical de texturas e consequentes propriedades geotécnicas das camadas, a topografia e o uso e cobertura do solo. Foi identificada essa ordem de importância para o desenvolvimento destes processos no contexto local depois de terem sido avaliadas algumas outras combinações nos pesos que resultavam em mapas de suscetibilidade mais distantes da realidade atual.

A carta de suscetibilidade à erosão linear resultante para a microbacia do Mineirinho (Figura 5A), apresentou valores de suscetibilidade entre 1,3 e 4,1 sendo que os valores de suscetibilidade entre 3,00000001 e 4,1 (alta e muito alta) coincidiram com regiões onde foram identificados processos erosivos e desta forma considerou-se que as atribuições de peso foram adequadas.

Para uma melhor análise da distribuição das classes de suscetibilidade à erosão linear foi necessário reclassificar a carta de suscetibilidade, ajustando os valores obtidos às 5 classes de suscetibilidade (S) definidas previamente: $S \leq 1$ para suscetibilidade muito baixa; $1 < S \leq 2$ para suscetibilidade baixa; $2 < S \leq 3$ para suscetibilidade média; $3 < S \leq 4$ para suscetibilidade alta; e $S \geq 4$ para

suscetibilidade muito alta. O resultado foi uma carta de suscetibilidade de aparência discretizada em 4 conjuntos: suscetibilidade baixa, suscetibilidade média, suscetibilidade alta e suscetibilidade muito alta (Figura 5B). Destaca-se que a classe de “suscetibilidade muito baixa” não apresentou nenhum percentual na área de estudo.

No resultado final da carta de suscetibilidade à erosão linear verificou-se que a “suscetibilidade alta” foi predominante na região onde se tinham as classes de materiais inconsolidados coluvionares e hidromórficos (Figura 4), de características geotécnicas favoráveis à ocorrência de processos erosivos (baixa resistência à penetração e menor massa específica do solo), além da pressão urbana exercida sobre os solos nas regiões de cabeceiras com topografia que direciona o fluxo de água superficial pelo arruamento e drenagem pluvial aos locais erodidos. O efeito destes fluxos de escoamento superficial e drenagem pluvial no processo de aprofundamento das

erosões é evidenciado em campo pela maior dimensão das erosões nas áreas mais ocupadas, como na voçoroca da cabeceira do córrego Santa Fé.

Tabela 11 Ponderação de pesos para cada variável estudada.

Fator Condicionante	Variável	Peso (0-1)
Topografia	Declividade	0,20
	Curvatura	0,15
Influência Antrópica	Usos e cobertura do solo	0,15
	Textura	0,20
Característica dos Materiais inconsolidados	Resistência à penetração	0,20
	Ângulo de Atrito	0,05
	Massa Específica do solo	0,05

Fonte: Osorio (2020).

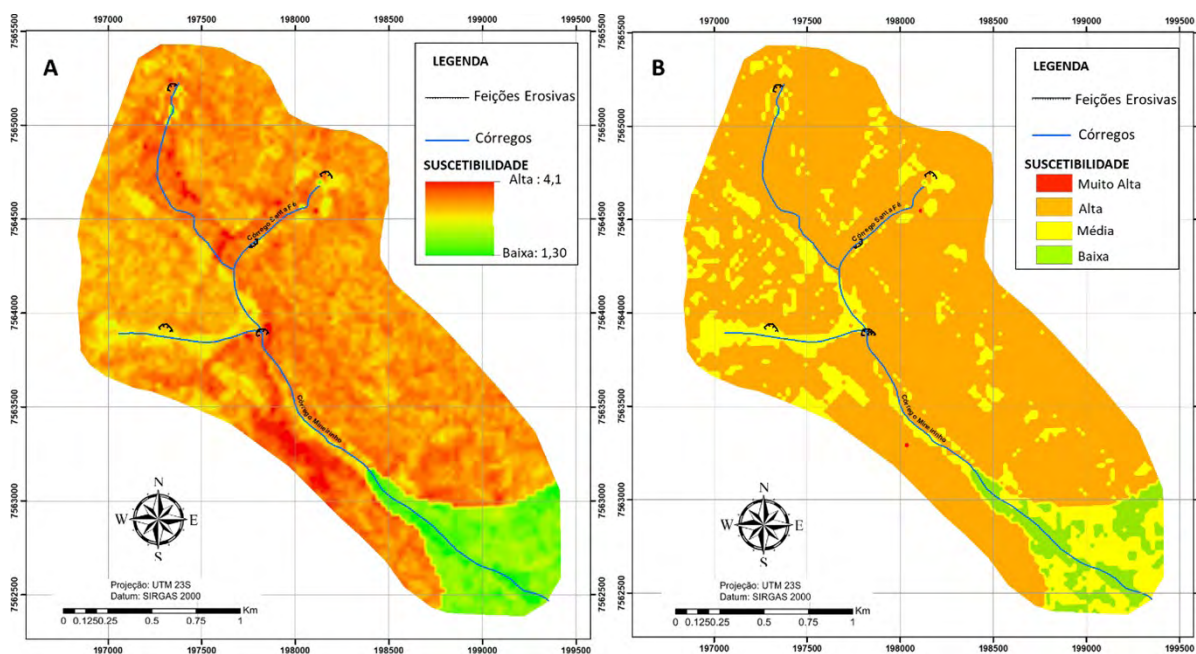


Figura 5 Carta de Suscetibilidade à erosão linear para a microbacia do córrego Mineirinho: A. Suscetibilidade original; B. Suscetibilidade reclassificada.

4 Conclusões

Esta pesquisa oferece uma contribuição para o fortalecimento do escopo da geologia urbana com base no aproveitamento de dados de subsolo preexistentes (sondagens geotécnicas, poços, sondagens ambientais e ensaios) como fonte de informação, o que não é habitual nas cartas de suscetibilidade à erosão linear produzidas no país.

Esta incorporação visa não só compensar a muito frequente inexistência de afloramentos geológicos no contexto urbano, mas também a apropriação do patrimônio técnico muito disperso nas cidades em crescimento.

Os dados de sondagens e perfis geológicos de poços compilados nesta pesquisa serviram para o zoneamento das características do subsolo da região, por meio da extrapolação das informações obtidas de cada perfil. Porém

deve-se ressaltar que para a correlação de camadas foi necessário aprofundar com verificações visuais e de ensaios em campo, por serem aproveitados relatórios de diversas instituições que usaram termos e formatos diferentes. A utilização do penetrômetro de impacto possibilitou ensaios de resistência de campo destas camadas mais superficiais e relacionadas aos processos erosivos, nem sempre ensaiadas em sondagens com realização de SPT, como os materiais hidromórficos da área, complementando os dados de parâmetros geotécnicos utilizados na geração da carta de suscetibilidade à erosão linear.

A junção de dados de campo com correlações empíricas foi importante para melhor caracterização dos materiais, como no caso do ângulo de atrito, massa específica do solo e resistência à penetração que são pouco avaliados em campo e não eram existentes para a área. Para se obter dados mais acurados e precisos considera-se que seja necessário fazer análises locais e correlações empíricas específicas para a área.

A eleição de parâmetros e ponderação de pesos na Análise Multicritérios para a avaliação da suscetibilidade à erosão linear baseou-se nas características das feições erosivas observadas na área de estudo, sendo que a variação vertical de texturas e propriedades geotécnicas das camadas foi identificada como a propriedade mais determinante no desenvolvimento destes processos no contexto local.

Junta-se a estes fatores naturais a concentração urbana nas regiões de cabeceiras com topografia favorável ao escoamento superficial e desague de drenagem pluvial nos locais erodidos. A maior expressão da junção destes fatores é a voçoroca da cabeceira do córrego Santa Fé.

A carta de suscetibilidade à erosão linear gerada apresentou uma tendência de concentração da classe “suscetibilidade alta” associada a materiais inconsolidados menos resistentes (coluvionares e hidromórficos) e aos impactos de usos de entorno; nessa classe foram evidenciadas moderadamente as áreas reconhecidas em campo com desenvolvimento de processos erosivos lineares. Consideramos que estas erosões seriam melhor evidenciadas em um mapeamento na escala de detalhe.

Apesar do grau de subjetividade existente em análises multicritérios, esta pesquisa teve como método a utilização de valores e parâmetros para cada um dos fatores condicionantes avaliados mais de acordo com a realidade local do que com as sugestões da literatura. Consideramos que os produtos cartográficos e as análises geradas pela técnica empregada possibilitam um melhor aproveitamento dos mesmos pela gestão pública no planejamento do território, uma vez que as variáveis consideradas e os pesos atribuídos são relativos aos materiais existentes na área estudada.

5 Agradecimentos

À Dra. Teresinha de Jesus Bonuccelli pelas importantes contribuições no processo de execução do trabalho e na revisão do artigo; às empresas e órgãos públicos que disponibilizaram dados para a pesquisa.

6 Referências

- Abreu, A.E.S. 2006, ‘Mapeamento Geotécnico para gestão municipal: Abordagem combinando três métodos distintos e sua aplicação em Analândia (SP)’, Dissertação de Mestrado, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Aguiar, R.L. 1989, ‘Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana de São Carlos – SP: contribuição ao planejamento’, Dissertação de Mestrado, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2016a, *Amostras de solo -Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*, ABNT NBR 6457, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2016b, *Análise granulométrica*, ABNT NBR 7181, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2015, *Sondagem a trado - Procedimento*, ABNT NBR 9603, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Bonuccelli, T. 2004, ‘Ensaio de Laboratório de Mecânica dos Solos –Identificação Visual e Tátil’, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- Bowles, J.E. 1977, *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill, New York.
- Câmara, K.R.R. & Pereira, A.C. 2005, ‘Análise de perfis de sondagem SPT e caracterização geotécnica de solos do Município de Natal’, *HOLOS*, vol. 1, pp. 38-53, <https://doi.org/10.15628/holos.2005.56>
- Cintra, J.C.A. & Aoki, N. 2010, *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Culshaw, M.G. & Price, S.J. 2011, ‘The 2010 Hans Cloos lecture: the contribution of urban geology to the development, regeneration and conservation of cities’, *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, vol. 70, no. 3, pp. 333-76, <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0377-4>
- Godoy, N.S. 1983, ‘Estimativa da capacidade de carga de estaca a partir de resultados de penetrômetro estático’, Palestra apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo.
- Guerra, A. J. T. & Botelho, R. G.M. 1996, ‘Características e propriedades dos solos relevantes para os estudos pedológicos e análise dos processos erosivos’, *Anuário do Instituto de Geociências*, UFRJ, vol. 19, pp. 93-114. <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/6168/4765>
- Guimarães, C.N. 2008, ‘Mapeamento geotécnico da bacia córrego da Barra, aplicação do penetrômetro de impacto em estudos

- de processos erosivos, São Pedro - SP - escala 1:10.000', Dissertação de Mestrado, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2013, *Manual técnico de uso da Terra*, 3rd edn, Coordenação dos Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro.
- Lorandi, R., Castro, D.M. & Feres, R. 1999, 'Carta pedológica das áreas urbana e suburbana de São Carlos (SP)', *Revista Brasileira de Cartografia*, Presidente Prudente (SP), vol. 51, no. 1, pp. 9-15.
- Oliveira, V.G. 2019, 'Estudo geológico e geotécnico de depósito antropogênico de resíduos na cidade de São Carlos', Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- Osorio, I. 2020, 'Investigação aplicada à gestão de risco geológico-geotécnico, para fins de planejamento urbano. Caso piloto: Erosão na cidade de São Carlos', Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- Padrón, C.A. 2019, 'Evaluación del riesgo de desastres por deslizamientos activados por lluvias. Caso estudio: barrios informales de Mamera - El Junquito', *Revista Terra-Nueva Etapa*, vol. 35, no. 57, pp. 30-77, viewed 15 Abril 2020, http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_terr/article/view/19538
- Pons, N.A.D. 2006, 'Levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos-SP, com o auxílio de geoprocessamento', Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- São Carlos. Lei nº 18.053 de 19 de dezembro de 2016. Estabelece o Plano Diretor do Município de São Carlos, e dá outras providências. São Carlos – SP. 2016. Viewed 10 oct 2022, https://www.saocarlosocial.com.br/diariooficial/001/DO_28122016_HNGB66.pdf
- Sirtoli, A.E., Silveira C.T. da, Mantovani, L.E., Sirtoli, A.R. & Oka-Fiori C. 2008, 'Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos', *Scientia Agraria*, Curitiba, vol. 9, no. 3, pp. 317-29, <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v9i3.11517>
- Stolf, R., Murakami, J.H., Brugnaro, C., Silva, L. G., Silva, L.C.F. & Margarido, L.A.C. 2014, 'Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA', *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 38, no. 3, pp. 774-82, <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300009>
- Stolf, R., Fernandes, J. & Furlani Neto, V.L. 1983, *Recomendação para uso do penetrômetro de impacto*, Kamaq Máquinas e Implementos Agrícolas, Araras.
- Zaine, J.E. 2000, 'Mapeamento Geológico-geotécnico por meio do método de detalhamento progressivo: Ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP). Área de concentração em Geociências e Meio Ambiente', Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.
- Zuquette, L.V. & Gandolfi, N. 2004, *Cartografia Geotécnica*, Oficina de Textos, São Paulo.

Contribuições dos Autores

Ileana Carolina Osorio Acosta: conceitualização; análise formal; metodologia; validação; escrita – rascunho original; escrita – revisão e edição; visualização. **Denise Balestrero Menezes:** análise formal; validação; escrita – rascunho original; escrita – revisão e edição; supervisão.

Conflito de interesse

Os autores declaram não haver potenciais conflitos de interesse.

Declaração de disponibilidade de dados

Todos os dados incluídos nesse estudo estão disponíveis publicamente na literatura.

Como citar:

Osorio-Acosta, I.C. & Menezes, D.B. 2022, 'Carta de Suscetibilidade à Erosão Linear Utilizando Parâmetros Geotécnicos de Subsolo na Análise Multicritérios – Teste de Aplicação na Microbacia do Córrego Mineirinho', *Anuário do Instituto de Geociências*, 45:39322. https://doi.org/10.11137/1982-3908_45_39322

Financiamento

Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Editora chefe

Dra. Claudine Dereczynski

Editor Associado

Dr. Márcio Fernandes Leão