

PROPOSTA DE PROCEDIMENTOS PARA O ZONEAMENTO QUANTO A ADEQUABILIDADE PARA SISTEMAS DE DRENAGEM SUSTENTÁVEIS (SDS) BASEADA EM CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS: APLICAÇÃO NA BACIA DO CÓRREGO DO GREGÓRIO, SÃO CARLOS (SP), BRASIL

PROPOSAL OF PROCEDURES FOR SUITABILITY ZONING FOR SUSTAINABLE DRAINAGE SYSTEMS (SuDSs) BASED ON GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS: APPLICATION IN THE GREGÓRIO STREAM BASIN, SÃO CARLOS (SP), BRAZIL

Lázaro Valentim ZUQUETTE¹, Moises FAILACHE¹, Nivea Adriana Dias PONS², Osni José PEJON¹

¹Universidade de São Paulo USP, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotécnica. Avenida Trabalhador São Carlense, 400 - Parque Arnold Schimidt, São Carlos – SP. Emails: lazarus1@sc.usp.br; moisesfailache@hotmail.com; pejon@sc.usp.br

²Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais. Avenida BPS, 1271-1361 - Centro, Itajubá – MG. Email: npons@unifei.edu.br

Introdução
Revisão Bibliográfica
Materiais e Métodos
Materiais
Desenvolvimento do procedimento
Aplicação do procedimento proposto
Resultados
Caracterização da área
Análises intermediárias
Zoneamento
Conclusão
Referências

RESUMO - Este trabalho apresenta os resultados obtidos com a aplicação de um conjunto de procedimentos para avaliação de áreas com base em dados obtidos por meio de mapeamento geotécnico para a adequabilidade de Sistemas de Drenagem Sustentáveis (SDSs). A aplicação foi desenvolvida na bacia do córrego do Gregório, na área urbana da cidade de São Carlos-SP, com uma extensão de 19km², visto a ocorrência de inundações com perdas econômicas e sociais significativas em decorrência das mudanças dos componentes ambientais impostas pelos processos de urbanização. A avaliação foi baseada na divisão inicial da área em vertentes e, em 39 atributos pertinentes ao relevo, águas, materiais inconsolidados, substrato rochoso, eventos perigosos potenciais, aspectos antropogênicos e zonas de proteção. Os atributos estão associados às condições de infiltração que controlam a funcionalidades e as condições construtivas dos sistemas, de drenabilidade subsuperficial, de estabilidade e do potencial de contaminação das águas subterrâneas, as quais controlam o grau de adequabilidade de cada parcela de terreno. Os dados permitiram a caracterização em termos de aspectos envolvidos, o que resultou na divisão da bacia em 5 zonas de adequabilidade aos SDSs. Cerca de 60% da bacia apresenta características dos componentes ambientais que propiciam diferentes graus de adequabilidade para tipos de sistemas baseados na infiltração (Zonas 1, 2 e 3), enquanto 25% apresentam condições mais restritivas e com potencial para a instalação de sistemas de coleta e acúmulos para controle do fluxo do escoamento superficial (Zona 4) e cerca de 15% com restrições que não indicam o uso destes recursos de drenagem. Os tipos de SDSs mais indicados para as diferentes zonas são: Drenos filtrantes e/ou Tubos perfurado, Poço de infiltração/ Sumidouro (*Soakaway*), Bacia de infiltração, Trincheira de infiltração, Manta de drenagem/infiltração, Geocélulas drenantes, Sistema de biorretenção, Depressão, Superfícies permeáveis e Pavimentos permeáveis.

Palavras-chave: Sistema de Drenagens Sustentáveis (SDS). Mapeamento geotécnico. São Carlos. Brasil.

ABSTRACT - This paper presents the results obtained with the application of a set of procedures for assessment of areas based on data obtained through engineering geological mapping for the suitability of Sustainable Drainage Systems (SuDSs). The application was developed in the Gregório stream basin, in the urban area of the city of São Carlos-SP, with an extension of 19km², due to the occurrence of floods with significant economic and social losses due to changes in environmental components imposed by urbanization processes. The evaluation was based on the initial division of the area in hillsides and on 39 attributes pertinent to relief, water, unconsolidated materials, bedrock, potential hazardous events, anthropogenic aspects and protection zones. The attributes are associated with infiltration conditions that control the functionality and construction conditions of the systems, subsurface drainability, stability and groundwater contamination potential, which control the degree of suitability of each land unit. The data allowed the characterization and division of the basin into 5 SuDS suitability zones. About 60% of the basin presents characteristics of the environmental components that propitiate different degrees of suitability for SuDS types based on infiltration (Zones 1, 2 and 3), while 25% present more restrictive conditions with potential for the installation of collection and accumulation systems to control the flow of surface runoff (Zone 4) and about 15% with restrictions that do not indicate the use of these drainage resources. The types of SuDSs most indicated for the different zones are: Filter Drains and/or Perforated Tubes, Infiltration Well/Sinkhole (*Soakaway*), Infiltration Basin, Infiltration Trench, Drainage/infiltration blanket, Drainage Geocells, Bioretention System, Depression, Permeable Surfaces and Permeable Pavements.

Keywords: Sustainable Drainage Systems (SuDS). Engineering geological mapping. São Carlos. Brazil.

INTRODUÇÃO

As áreas urbanizadas vêm aumentando nos países em desenvolvimento principalmente devido ao crescimento populacional, migração da população de áreas urbanizadas menores para as maiores, deslocamentos regionais em função de condições sociais e econômicas e, mesmo dentro de uma área urbanizada o deslocamento vem ocorrendo de áreas mais centrais para a periferia.

Assim, estes incrementos das áreas urbanizadas vêm ocupando áreas com características ambientais bem distintas, desde áreas de recargas de aquíferos até aquelas sujeitas a eventos perigosos de diferentes fontes naturais, quasi-naturais, naturais-tecnológicas e antropogênicas.

O processo do aumento da extensão das áreas urbanizadas gera um conjunto de mudanças com diferentes intensidades na vegetação, relevo, águas, materiais geológicos, áreas úmidas, entre outras. Tais mudanças geraram alterações da dinâmica do meio ambiente, afetando entre outros aspectos as proporções da distribuição das águas resultantes das chuvas. Essas mudanças afetam a relação entre o escoamento superficial e a infiltração das águas das chuvas modificando o desenvolvimento dos processos deflagrados gerando o aumento das inundações, alagamentos e erosões lineares e marginais. Essa relação é modificada pela alteração das condições da camada superficial dos materiais geológicos e das características de micro e meso relevo. Primeiramente promove o efeito de selamento (*sealing*) da superfície (compactação, dispersividade, endurecimento) diminuindo a taxa de infiltração e, conseqüentemente aumentando o escoamento superficial. Por outro lado, causam a destruição das feições de relevo diminuindo a capacidade de armazenamento superficial e a rugosidade (Rotta & Zuquette, 2021), gerando o aumento do volume escoado e da velocidade das águas nas vertentes. Conseqüentemente geram o aumento da vazão de pico nos canais de drenagem e a diminuição do tempo de permanência das águas nas vertentes e do tempo de concentração das bacias.

Com o objetivo de alterar a proporção entre o escoamento superficial e a infiltração, diversos procedimentos têm sido propostos com ênfase aos Sistemas de Drenagem Sustentáveis (SDSs) que tem seu desenvolvimento a partir dos anos 1990 com diversos trabalhos em diferentes países, principalmente, na Inglaterra (Butler & Parkinson, 1997; CIRIA 2000a, 2000b, 2006); Dearden & Price 2011, 2012; Dearden et al.,

2013; Zhou, 2014). A adoção desses sistemas e suas instalações dependem de um grupo de características dos componentes do meio ambiente que interferem e, mesmo, inviabilizam a adoção dessas alternativas que visam minimizar os problemas gerados pelo aumento do escoamento superficial e, assim controlem os problemas decorrentes das mudanças geradas pela urbanização. As características do meio ambiente que podem afetar a seleção, implantação e o projeto desses sistemas são pertinentes ao relevo, materiais geológicos (inconsolidados e rochosos), águas subterrâneas e superficiais, ocorrência de eventos perigosos e depósitos de natureza antropogênica, pois esses controlam as condições de infiltração, drenagem subsuperficial e, possíveis, problemas decorrentes do volume de água infiltrado. Dentre os problemas gerados pela alteração da taxa entre a infiltração e o escoamento superficial pela urbanização destacam-se as inundações que tem afetado centros urbanos das mais diferentes magnitudes em praticamente todos os estados do Brasil. Um dos centros urbanos que vem sendo impactados intensamente nos últimos 20 anos é o da cidade de São Carlos (SP), principalmente junto aos canais do córrego do Gregório e do Rio do Monjolinho, afetando a região central e mais densamente ocupada, assim como linhas viárias que interligam diferentes porções da área urbanizada.

O objetivo central desse estudo foi o desenvolvimento básico de um procedimento para a avaliação das condições de uma área com vista à adequabilidade dos SDSs, visando o aumento da infiltração e a diminuição dos eventos decorrentes do escoamento superficial. Com vistas a atingir o objetivo proposto foi desenvolvida uma proposta básica, a qual foi aplicada na bacia do córrego do Gregório para orientar a adoção e implantação de sistemas de infiltração para o controle das inundações. O estudo visa a elaboração de um mapa de zoneamento quanto à adequabilidade dos SDSs em escala 1:10.000, de caráter geral e com objetivo de retratar a viabilidade.

REVISAO BIBLIOGRÁFICA

Os SDSs vêm sendo empregados em meio urbano, obras viárias e em áreas com características de usos especiais como os parques industriais. O desenvolvimento dos SDSs ocorre desde os anos da década de 1990 com um grupo de técnicas e medidas que podem ser adotadas em função das

características dos usos das áreas e, principalmente dos componentes do meio ambiente, conforme constata-se nas publicações de Butler & Parkinson (1997); CIRIA (2000a, 2000b, 2006); Charlesworth et al. (2003); Ellis et al. (2004); Dearden & Price (2011, 2012); Dearden et al. (2013); Zhou (2014);

Bockhorn et al. (2017); Sharma (2017) e Andersen (2020). Uma listagem das principais técnicas, estruturas e/ou sistemas associadas a uma descrição básica encontra-se na tabela 1, tanto para os

baseados na coleta e infiltração das águas nos materiais geológicos, assim como para o caso de coleta, armazenamento e re-uso ou controle do fluxo do escoamento superficial.

Tabela 1 - Principais Sistemas de Drenagem Sustentáveis (SDSs) e as suas características básicas. Baseada em CIRIA (2000a, 2000b, 2006) e Dearden & Price (2012).

	Sistema	Descrição básica
Sistemas e estruturas de coleta e armazenamento	Sistema de coleta das águas de chuva (<i>Rainwater harvesting system</i>)	Sistemas que permitem a coleta das águas de chuva e que são armazenadas para diferentes usos e que podem ser usados para controlar o escoamento superficial.
	Telhado ou Cobertura verde (<i>Green roof</i>)	Sistema multicamada (vegetação, dreno, impermeabilizante, suporte) que recobre os telhados de edificações com o objetivo de interceptar as chuvas e drená-las para um depósito ou para o sistema de drenagem com o objetivo de diminuir o escoamento superficial e a vazão de pico.
	Sistema de tratamentos (<i>Proprietary treatment systems</i>)	São estruturas construídas em subsuperfície ou superfície para o tratamento das águas em termos de contaminantes.
	Tanques de armazenamento e atenuação (<i>Attenuation storage tank</i>)	São grandes vazios escavados em subsuperfície para o acúmulo de água temporário no sentido de controlar o escoamento superficial e, pode permitir a infiltração, liberação controlada ou uso. Podem ser construídos por módulos como os geocélulas, tubos de grande diâmetro ou concreto.
Sistemas e estruturas de infiltração	Faixas vegetadas para favorecer a infiltração e retenção das águas (<i>Filter strips</i>)	O escoamento superficial gerado em áreas de baixa taxa de infiltração é direcionado para áreas com gramíneas e/ou densamente vegetado para promover sedimentação, filtragem e infiltração.
	Drenos filtrantes e Tubos perfurados (<i>Filter drain or Perforated pipes</i>)	As águas são armazenadas em trincheiras rasas preenchidas por agregados/seixos no sentido de propiciar atenuação do escoamento superficial, permitir a infiltração e filtração.
	Poço de infiltração/ Sumidouro (<i>Soakaway</i>)	É uma escavação circular ou quadrada revestida por borracha, paredes de tijolos, tubos de concreto ou polietileno perfurado e circundado por materiais granulares, normalmente interligados com áreas de drenagem, com o objetivo de atenuar as vazões de pico e com a infiltração das águas.
	Canal vegetado (<i>Swales</i>)	Construção de um canal vegetado alinhado ou não usado para controlar o escoamento superficial, podendo ser com água permanente no fundo ou somente com água no período das chuvas para permitir a infiltração.
	Bacia de infiltração (<i>Infiltration basin</i>)	São depressões em superfície destinadas a armazenar as águas do escoamento superficial para infiltração no terreno, com condições de ter outra função estética ou de qualidade ambiental.
	Bacia de retenção ampliada (<i>Extended detention basin</i>)	São depressões construídas para armazenar as águas da chuva e permitir o fluxo controlado e, a infiltração e filtragem para subsuperfície no sentido de evitar vazões de pico elevada.
	Trincheira de infiltração (<i>Infiltration trench</i>)	Escavações rasas preenchidas com cascalhos, agregados para criar um armazenamento temporário das águas de chuva e permitir a infiltração e/ou filtragem.
	Manta de drenagem/infiltração (<i>Infiltration blanket</i>)	São grandes sistemas constituídos de camada de agregado grosso com alta permeabilidade que recebe água drenada da superfície e que permite a infiltração para profundidade ou redireciona para outra forma de armazenamento, reuso ou para superfície com vazão controlada.
	Sistema de bioretenção (<i>Bioretention system</i>)	Depressão vegetada construída com camadas de areias e agregados para armazenar temporariamente as águas da chuva e permitir o seu escoamento controlado e a sua infiltração e filtração.
	Áreas úmidas construídas (<i>Constructed wetland</i>)	São depressões rasas com dimensões variadas e com vegetação aquática que armazenam e atenuam o escoamento superficial, assim como permitem um tratamento com a retenção de sedimentos e contaminantes.
	Depressão (<i>Ponds</i>)	São depressões escavadas com menores extensões que as áreas úmidas que possibilitam o armazenamento e sedimentação de partículas e contaminantes e, podem ter vegetação aquática submersa ou não.
	Superfícies permeáveis (<i>Pervious surfaces</i>)	São superfícies porosas que permitem a infiltração das águas sobrepostas a uma camada porosa para armazenamento, antes de ocorrer a infiltração, reuso ou liberação controlada para a superfície.
	Pavimentos permeáveis (<i>Pervious pavement</i>)	Pavimentos estruturais que permitem a infiltração de águas e o armazenamento na sub-base permitindo a infiltração no terreno.
	Filtro de areias/pedriscos (<i>Sand filter</i>)	Estruturas construídas (na forma de uma depressão ou como um tanque) com uma ou mais câmaras para armazenar as águas do escoamento superficial permitindo sua filtração primária pela camada de areia. Podem ser construídos com uma base permeável para permitir a infiltração ou impermeável em função das condições geológicas do terreno, mas com um sistema de liberação com vazão controlada.
	Geocélulas drenantes (<i>Geocellular system</i>)	Sistema constituído por módulos de geocélulas plásticas com alto índice de vazios para armazenar água de chuva temporariamente e, permitir a infiltração.
Plantação de árvores/Vegetação (<i>Tree plantation</i>)	Árvores ou vegetações de diferentes portes podem ser plantadas em determinadas áreas associadas ou não aos sistemas de drenagem no sentido de diminuir o fluxo superficial e permitir a infiltração no terreno, assim como a filtração e a fitorremediação.	

Quando da escolha e implantação de um sistema ou combinação de sistemas tem-se como objetivos fundamentais os seguintes aspectos:

1 – diminuir o volume do escoamento superficial no sentido de minimizar possíveis processos de inundação, alagamentos, assoreamentos, erosões

lineares e marginais, assim como o galgamento (*overtopping*) de estruturas de barramento de fluxo nos canais de drenagem.

2 – evitar que as águas infiltradas deflagrem algum evento de natureza geológica, geotécnica, hidrológica que venha gerar perdas aos elementos que compõem o meio antrópico e/ou altere as condições naturais afetando a biodiversidade.

3 – evitar que as águas infiltradas estejam com contaminantes e, conseqüentemente, gerem contaminação dos materiais geológicos e das águas subsuperficiais.

Considerando os SDSs baseados na infiltração de águas citados na tabela 1 e os aspectos considerados anteriormente e nos estudos de Woods Ballard et al. (2015) e Horton et al. (2015), a avaliação do potencial de implantação em uma área é desenvolvida por 3 etapas de estudos e investigações em escalas e detalhamento distintos, os quais visam obter dados que possibilitam:

- Avaliar a adequabilidade de uma área extensa frente às condições mínimas necessárias para a instalação de um ou mais sistemas,

- Avaliar e escolher um sistema ou combinação de sistemas que são adequados a determinados aspectos do meio ambiente

- Obter dados que permitem desenvolver e dimensionar o projeto do sistema e, escolher materiais e condições específicas relativas aos procedimentos de construção.

De maneira geral pode-se considerar que os seguintes aspectos são fundamentais durante os procedimentos para seleção, projeto e implantação de SDSs:

- Materiais geológicos e a capacidade de infiltração,
- Profundidade da zona saturada,
- Condições de fluxo subsuperficial,
- Capacidade de armazenamento de água no meio geológico,
- Ocorrência de depósitos antropogênicos (aterros e similares),
- Possibilidade de ocorrência de subsidências ou afundamentos,
- Possibilidades de escorregamentos, rastejos ou outros movimentos de massa gravitacionais,
- Possibilidades de ocorrer processo de erosão interna (*piping*),
- Possibilidade de contaminação devido à mobilização de produtos químicos e/ou biológicos existentes na área,
- Possibilidade de contaminação devido à infiltração de águas contaminadas,
- Possibilidade de ocorrência de afloramento da

zona saturada (*Saturation excess overland flow*) devido à infiltração,

- Possibilidade de entrada de água da zona saturada contaminada ou da infiltração no sistema de águas, de esgoto ou de águas servidas.

Em termos gerais as investigações e análises da viabilidade técnica e construtiva para a implantação de SDSs devem ser desenvolvidas em 3 etapas distintas, a saber:

1 – Geral, visando avaliar a adequabilidade para uma região, tendo como objetivo a elaboração de um mapa de unidades com diferentes graus de adequabilidade funcional e construtiva, em escalas maiores ou igual a 1:25.000 em função da extensão.

2 - Local, visando análise de unidades delimitadas na etapa geral quanto às opções de sistemas e condições para implantação e, pertinentes a uma unidade com determinado nível de adequabilidade, em escalas maiores ou igual a 1:5.000, e considerando 2 aspectos:

2a – caracterização de aspectos do meio ambiente e dos usos que afetam os critérios e opções de projeto, ou seja: relevo local, materiais geológicos, fluxos e pontos de descargas das águas superficiais, capacidade de infiltração, locais de descargas de águas superficiais potenciais, usos e ocupações na unidade de adequabilidade, ocorrência potencial de possíveis eventos perigosos, infraestrutura superficial e subterrânea, biodiversidade, paisagem do local e construída.

2b – caracterização que visem mais diretamente à implantação de empreendimento, tais como: relevo, usos e paisagem propostos, controle de eventos perigosos potenciais, como inundação, infraestrutura local, sistema construtivo, e adoção e manejo das águas superficiais.

3 - Específica, com o uso de procedimentos de investigações específicas em um local visando à obtenção de dados relacionados ao projeto e implantação de um tipo de sistema.

Nessa etapa é fundamental observar e obter dados que auxiliem nas respostas aos seguintes pontos:

- Existem construções, obras, usos ou linhas de infraestrutura superficial ou subterrânea que possam ser afetadas em consequência da infiltração de água?

- Existem condições para o fluxo da água infiltrada nas bases de pavimentos próximos ao local?

- Os materiais geológicos e/ou águas subterrâneas estão contaminadas? Se sim, em que profundidade ocorre uma barreira natural ou construída?

- Existe possibilidade de inundação ou alagamento?

- Qual é a capacidade de infiltração na base do sistema?
- Qual é a profundidade da zona saturada abaixo da base do sistema?
- Qual é o uso ou condição para a água sub-terrânea sob a base do sistema?
- Existe a possibilidade de algum evento que possa gerar instabilidade da área?

Para auxiliar nas respostas aos itens anteriores, alguns recursos de investigação geológico-geotécnica são recomendados, tais como:

- Elaboração ou aproveitamento de mapa topográfico detalhado (escala 1:1.000) visando delimitar a área de fornecimento das águas do escoamento superficial,
- Sobrevoos com drones ou veículos similares para

a devida localização de aspectos de usos e infraestrutura que podem afetar ou serem também afetadas.

- Sondagem geolétrica vertical e caminhamento elétrico para a caracterização da distribuição espacial dos materiais geológicos,
- Sondagem de simples reconhecimento para amostragem dos materiais geológicos e ensaios de permeabilidade iniciais em furos,
- Execução de cava para ensaio de infiltração com profundidade similar à da base do sistema escolhido e projetado,
- Execução de sondagem com penetrômetro dinâmico leve para avaliar grau de compactação, principalmente da camada superficial, até atingir o topo da rocha alterada ou da sã.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O desenvolvimento do estudo utilizou os seguintes materiais básicos:

- 1 - Mapa topográfico em escala 1:10.000 do IGC-SP;
- 2 - Fotos aéreas em escalas 1:8.000, 1:25.000 e 1:60.000;
- 3 - Imagens de Satélite IKONOS;
- 4 - Trados mecânicos-manuais;
- 5 - Infiltrômetros de Duplo anel;
- 6 - Amostradores de PVC;
- 7 - Equipamentos de laboratório para caracterização dos materiais geológicos.

Desenvolvimento do procedimento

A implantação de SDSs tem como principal finalidade conter o fluxo do escoamento superficial e os problemas ambientais decorrentes, como a inundação.

No sentido de entender as relações entre os SDSs e o processo de inundação que é o caso do estudo, na figura 1 apresenta-se um diagrama do tipo Bowtie com as etapas e barreiras, incluindo os SDSs.

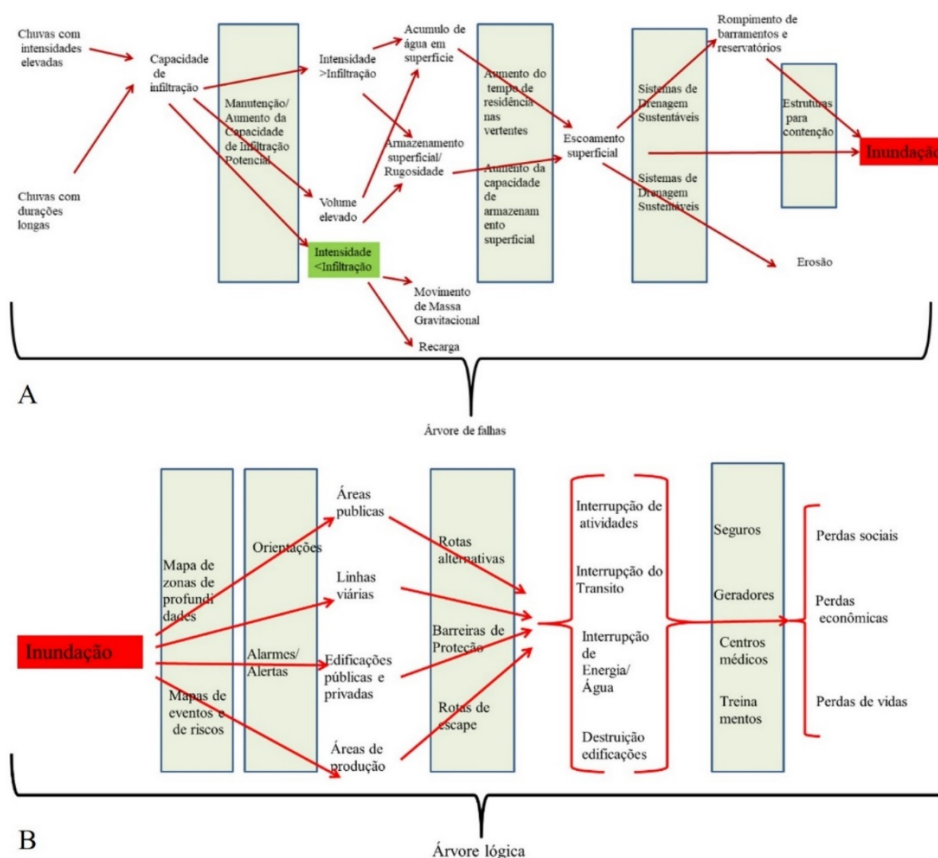


Figura 1 - Diagrama do tipo Bowtie (A – árvore de falha, B – árvore lógica) para o caso de inundação e o posicionamento da barreira de SDSs.

A adoção e o emprego de SDS estão sempre relacionados à divisão do terreno em vertentes. Estas se caracterizam como uma divisão natural com limites bem estabelecidos e que condicionam

o escoamento superficial e podem ser delineadas a partir de mapas topográficos, fotos aéreas e imagens de satélites, conforme o modelo conceitual da figura 2.

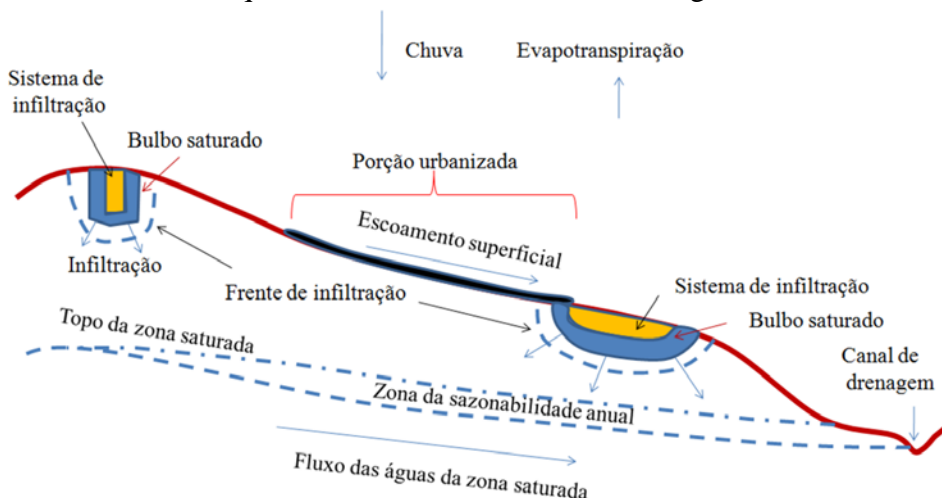


Figura 2 - Modelo conceitual considerado para uma vertente na seleção dos atributos e as relações do sistema com os processos que estão associados à infiltração das águas.

Tal modelo permite observar as relações e os processos envolvidos (infiltração, armazenamento, redistribuição, recarga da zona saturada e descarga) na trajetória do fluxo das águas a partir dos sistemas.

Em cada vertente existe a possibilidade de instalação de um ou mais sistemas de drenagem baseados na infiltração, o que pode gerar a infiltração e armazenamento de um volume significativo de água, o qual interfere na dinâmica ambiental levando a deflagração de problemas ambientais de diferentes naturezas, como exemplo a expansibilidade de materiais geológicos e contami-

nação das águas subsuperficiais.

A adequabilidade dos SDSs tem como suporte quatro aspectos que devem ser considerados de maneira combinada, que são: as condições de infiltração que controlam os sistemas em termos da funcionalidade e da construção, as condições de drenagem subsuperficial, de estabilidade e da contaminação potencial das águas subterrâneas.

Na figura 3 observa-se a relação entre os aspectos citados e os atributos que controlam o comportamento de cada parcela de terreno e que afetam a adoção e implantação.

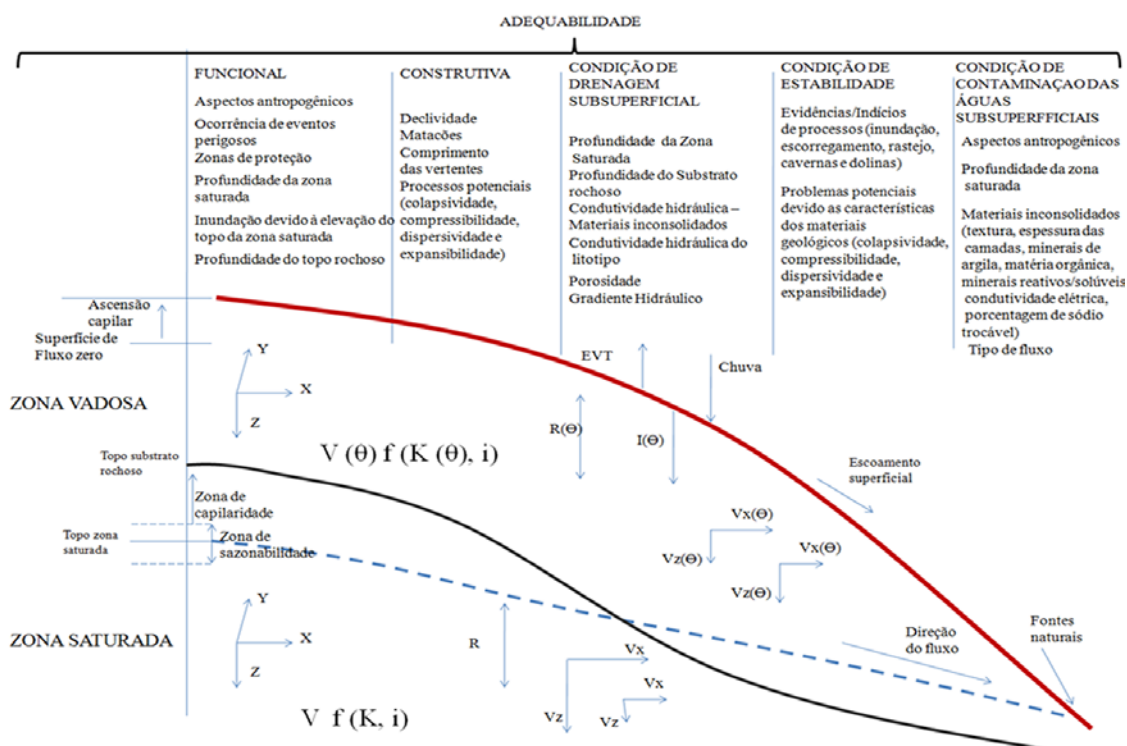


Figura 3 - Relação entre os aspectos que afetam a adequabilidade dos sistemas de drenagem sustentáveis.

Associando o modelo conceitual, os processos envolvidos, os objetivos dos sistemas, as relações de usos do solo e os atributos propostos por Zuquette (1987, 1993) selecionou-se um grupo de atributos que afeta os diferentes aspectos da análise da adequabilidade dos sistemas de drenagem sustentáveis, conforme consta da tabela 2. A seleção dos atributos deu-

se pela análise dos mecanismos e princípios envolvidos por meio de árvores lógicas e de falhas.

Considerou-se o grupo de atributos para cada um dos 5 aspectos (Figura 3), assim como as classes de cada atributo que condicionam a viabilidade de uma área à instalação de um ou mais tipo de SDS.

Tabela 2 - Atributos relacionados à adequabilidade de sistemas de drenagem sustentáveis. (Adaptado de Zuquette 1987, 1993).

Componente	Atributo	Parâmetros	Categorias				
			Grandezas	Favorável	Moderada	Severa	Restritiva
Relevo	Declividade	Classes	%	1-10	10 - 20	20 - 30	>30
	Frequência de canais		Canais/km ²	<1	1 - 3	3 - 5	>5
	Comprimento da vertente	Medido entre o divisor de águas e o talvegue	m	>500	300 - 500	200 - 300	<200
Materiais inconsolidados	Perfil do regolito	Descrição baseada na variabilidade		Homogêneo e contínuo			Heterogêneo e descontínuo
	Espessura das camadas	Camada superficial contínua	m	>5	3 - 5	2 - 3	<2
	Textura	Ensaio de granulometria	%	Arenosas com menos de 30% finos	Arenosas com 30 a 50% finos	Silte e Argilas somando entre 50 e 70%	Silte e Argilas somando >70%
	Permeabilidade	Condutividade hidráulica	cm/s	>10 ⁻³	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
	Porosidade		%	>50	45 - 50	40 - 45	<40
	Mineralogia	Mineral de Argila (categorias visando estimativa de expansibilidade)	Mineral	Ausente	Caulinita, Gibbissita, Illitas	Esmectitas e Interestratificados < 3%	Esmectitas, Vermiculitas, Interestratificados
		Minerais Reativos/Solúveis	Mineral	Não	Não	Sulfetos, Carbonatos <0,5%	Sulfetos, Carbonatos
	Matacões/Blocos	-Dimensões -Frequência Profundidades		Não	Raros e pequenos	Grandes, mas esparsos	Muitos de tamanhos variados em superfícies
	pH			5-7,5	7,5 - 8,5		>8,5
	Condutividade elétrica		dS/m	<1	1 - 4	4 - 6	>6
	Porcentagem de Sódio Trocável		%	<5	5 - 10	10- 15	>15
	Matéria orgânica		%	>3	2 - 3	1 - 2	<1
Substrato Rochoso	Litotipo			Alta porosidade			Baixa porosidade
	Profundidade		m	>10	5 - 10	3 - 5	<3
	Mineralogia	Mineral de Argila		Caulinita, gibbissita,	Illitas	Esmectitas < 3%	Esmectitas, Vermiculitas
		Mineral Reativo/Solúvel		Não	Não	Porcentagens <1%	Sulfetos, Carbonatos
	Permeabilidade	Condutividade Hidráulica	cm/s	>10 ⁻³	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
	Fraturas	Abertura	cm	0,02 - 0,05	>0,05	0,01 - 0,02	<0,01
Frequência		Fraturas/m	>3	2 - 3	1 - 2	1	
Água subterrânea		Jv	>15	10 a 15	3 a 10	<3	
	Profundidade/Sazonalidade	Topo	m	>10	5 - 10	3 - 5	<3
	Direção de fluxo	Gradiente hidráulico		>0,01	0,005 - 0,01	0,001 - 0,005	<0,001
	pH			5,5 - 7,5	7,5 - 8,5		>8,5
Condutividade Elétrica		dS/m	<0,5	0,5 - 3	3 - 5	>5	

Tabela 2 – Parte 2.

Inundação devido à elevação do topo da zona saturada	Groundwater flooding (Saturation Excess Overland Flow)	Evidências/Indícios/ Difrator hídrico raso	Não	Não	Potencial	Ocorre
Aspectos Antropogênicos	Terrenos construídos (aterros, etc...) (Made-Ground)	Materiais depositados artificialmente sobre a superfície	Não		Presença	Presença
	Escavações para retirada de materiais geológicos (Worked)	Terrenos escavados artificialmente	Não	Pedreiras abandonadas	Presença	Presença
	Depósitos de materiais escavados e dragados (Infilled)	Áreas escavadas e depois aterradas	Não	Aterros com solos e rochas	Presença	Presença
	Áreas Degradada (Disturbed)	Áreas que em função de escavações nas porções superficiais sofreram processos como as subsidências	Não		Presença	Presença
	Áreas modificadas para diferentes finalidades (Landscaped)	Áreas que sofreram remodelamentos seguidos e que não é possível separar as classes anteriores	Não	Campos de golfe, Praças esportivas, Aeroportos	Presença	Presença
Fontes de eventos perigosos	Inundação	Evidências	Não	Não	Ocorre	Ocorre
	Rastejo (Creep)	Evidências	Não	Não	Ocorre	Ocorre
	Escorregamentos	Evidências	Não	Não	Ocorre	Ocorre
	Colapsividade	Porosidade Textura	Não	Ocorre <2m	Ocorre de 2 a 5m	Ocorre
	Compressibilidade	Camadas orgânicas Camadas argilosas porosas	Não	Ocorre <2m	Ocorre de 2 a 5m	Ocorre
	Expansibilidade	Minerais de argila Porcentagem de esmectitas	Não	<2m	Ocorre de 2 a 5m	Ocorre
	Dispersividade	Porcentagem de sódio Condutividade elétrica Textura	Não	<2m	Ocorre de 2 a 5m	Ocorre
	Materiais geológicos solúveis	Minerais solúveis Carbonatos	Não	Não	Ocorre <1%	Ocorre
	Cavernas/Dolinas	Evidências	Não	Não	Ocorre	Ocorre
Condições especiais	Zonas de proteção	Poços	Não	Não	Ocorre	Ocorre
		Fontes naturais	Não	Não	Ocorre	Ocorre
		Lagos, lagoas e reservatórios	Não	Não	Ocorre	Ocorre

Aplicação do procedimento proposto

Na figura 4 encontra-se o fluxograma com as principais atividades desenvolvidas nesse estudo de maneira sequencial e com os respectivos objetivos principais. As atividades foram agrupadas em etapas considerando a obtenção dos dados, tratamento e análises dos dados pertinentes aos diferentes componentes do meio ambiente.

A partir da proposta metodológica a aplicação deu-se em quatro etapas (Figura 4), sendo que na primeira etapa selecionou-se o mapa topográfico em escala 1:10.000, as fotografias aéreas e imagens de satélite que foram utilizadas para restituir os canais de drenagem e a divisão da bacia em vertentes, assim como as características de relevo e condições antropogênicas.

A segunda etapa é relativa ao mapeamento

geotécnico da bacia visando à obtenção dos atributos constantes da tabela 2, que é a base para as análises de adequabilidade de acordo com os procedimentos de campo para caracterização in situ e amostragens (deformadas e indeformadas) e ensaios laboratoriais (Mineralogia com ênfase aos minerais de argila, solúveis e reativos, Granulometria, Massa específica aparente seca, Massa específica dos sólidos, Índice de vazios, Porosidade, Curva de infiltração e capacidade de infiltração potencial obtidas a partir dos ensaios in situ, Condutividade hidráulica saturada, pH, Condutividade elétrica, estimativa da capacidade de campo, condutividade hidráulica não saturada e capilaridade efetiva) como propostos por Zuquette (1993) e Zuquette et al. (2004).

Como resultado do mapeamento geotécnico foi elaborado um conjunto de mapas retratando

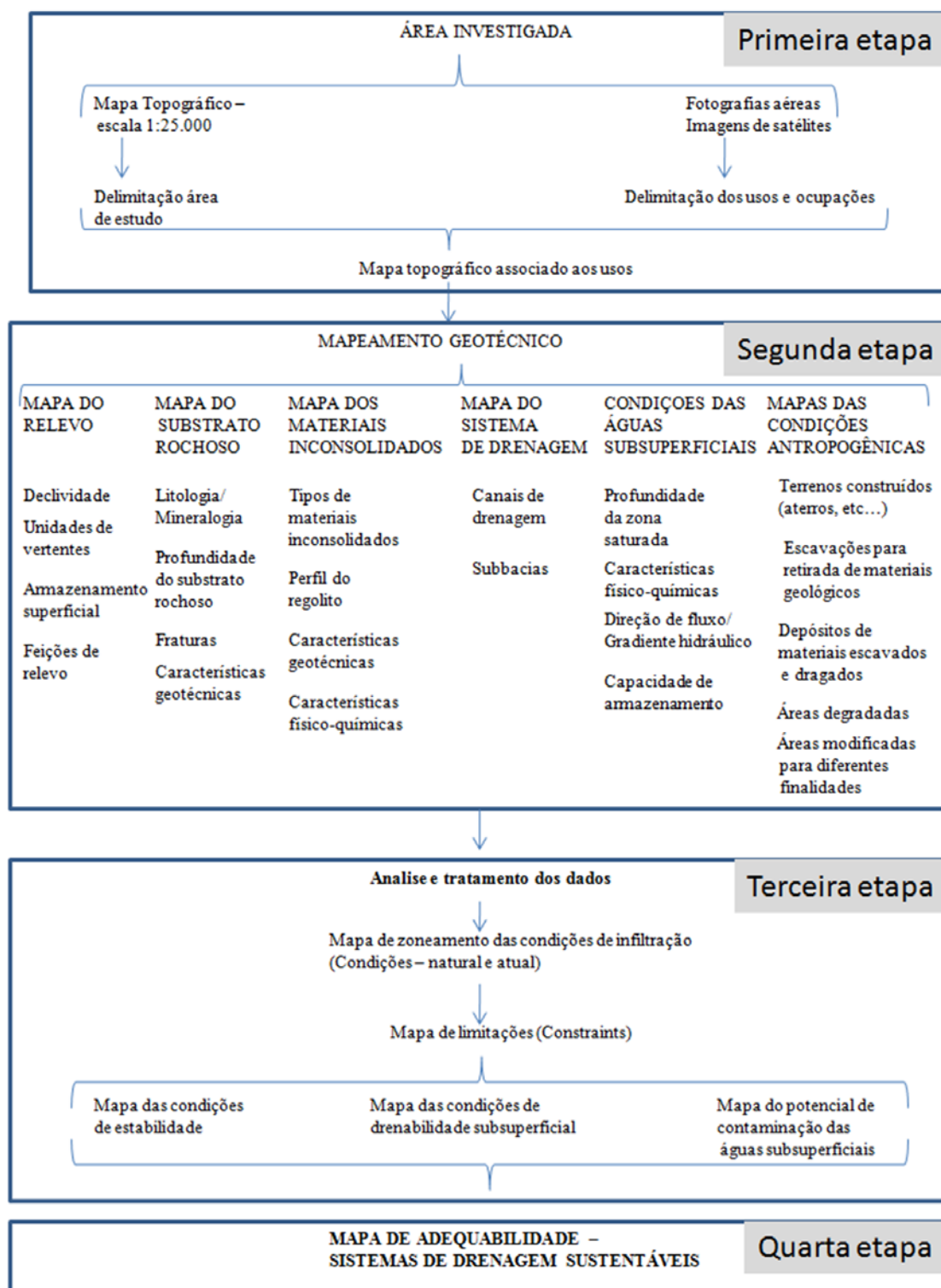


Figura 4 - Fluxograma das principais etapas desenvolvidas no estudo.

grupos de atributos. A terceira etapa refere-se ao tratamento e análise dos dados e a elaboração de documentos cartográficos intermediários relativos às condições de infiltração, limitações (*constraints*), das condições de estabilidade, de drenabilidade subsuperficial e do potencial de contaminação das águas subsuperficiais. A quarta etapa é relativa à análise do conjunto de dados e documentos cartográficos elaborados com a finalidade de delinear o zoneamento da área quanto à adequabilidade dos SDSs considerando

os diferentes tipos e condições favoráveis.

As análises consideram a associação dos 5 aspectos que condicionam a adequabilidade de acordo com a sequência apresentada no fluxograma da figura 5 (cor azul representa os aspectos fundamentais que devem ser considerados; a verde as condições adequadas em termos dos aspectos fundamentais; a laranja as condições com limitações e a vermelha, no caso das limitações que não são possíveis de medidas de correção).



Figura 5 - Fluxograma usado para elaboração do zoneamento da adequabilidade para sistemas de drenagem sustentáveis (SDSs).

RESULTADOS

Caracterização da área

A bacia do Córrego do Gregório, localizada na área urbana da cidade de São Carlos (SP), Brasil, na Zona UTM 23S entre as longitudes 199 e 208kmW e as latitudes 7558 e 7563kmN (Figura 6), tem sido objeto de estudos em termos geológicos e geotécnicos por diferentes autores e em diferentes escalas (Zuquette, 1981; Nishiyama, 1989; Aguiar, 1989; Pons, 2006 e Failache, 2018) e a partir desses estudos foram selecionados dados prévios e, outros foram obtidos por investigações atuais e elaborado um conjunto de documentos cartográficos.

Na figura 7 observa-se o conjunto de canais de drenagem prévios à urbanização associados à delimitação das vertentes. Observa-se nessa figura que a rede de canais de drenagem anterior a urbanização condicionava a distribuição das

águas para diversos pontos o que gerava um tempo de concentração maior do que o atual para a bacia em questão, assim como a descarga no canal principal dava-se por 15 exutórios de canais afluentes distribuídos na bacia de maneira que o fluxo de águas no canal principal tinha um comportamento escalonado no tempo e de posicionamento ao longo do canal principal e, portanto não propiciava vazões elevadas e tempos de picos curtos. Observa-se que na bacia existem 3 grupos de vertentes que condicionam diferentes comportamentos do escoamento superficial, a saber: o grupo denominado de A na figura 7 nos quais as águas escoam diretamente para o canal do Córrego do Gregório, o B que condicionava o fluxo para os afluentes e o C que são concentradores das águas nas porções mais a montante dos canais.

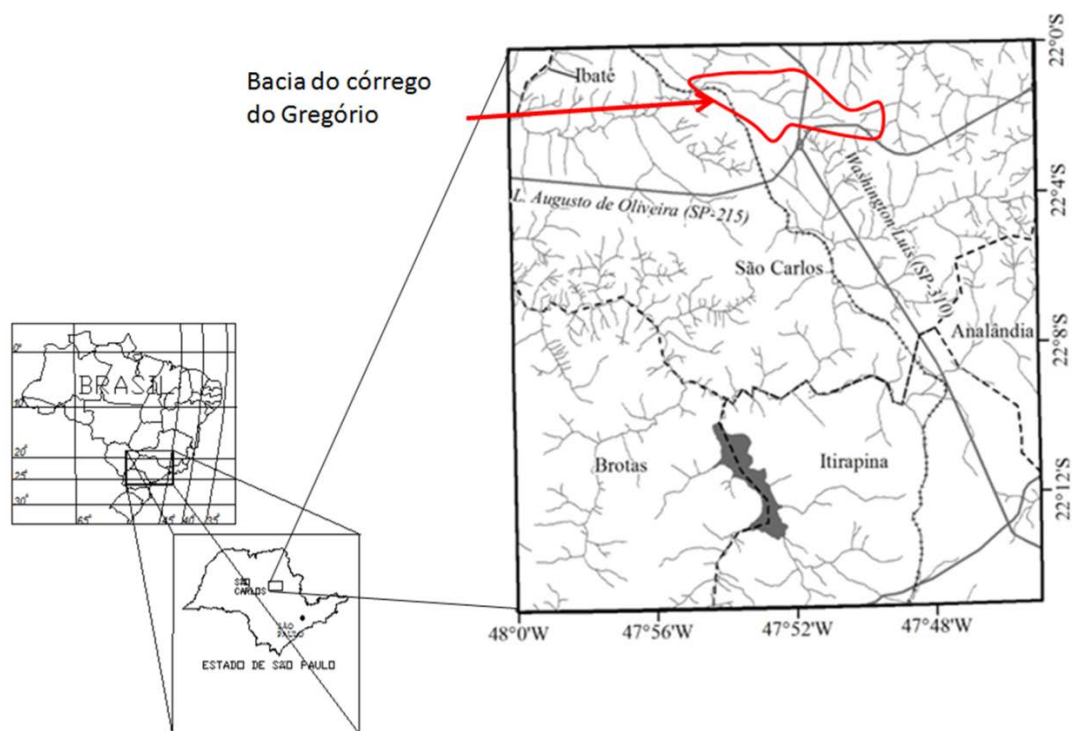


Figura 6 - Localização da bacia do córrego do Gregório, São Carlos, estado de São Paulo, Brasil.

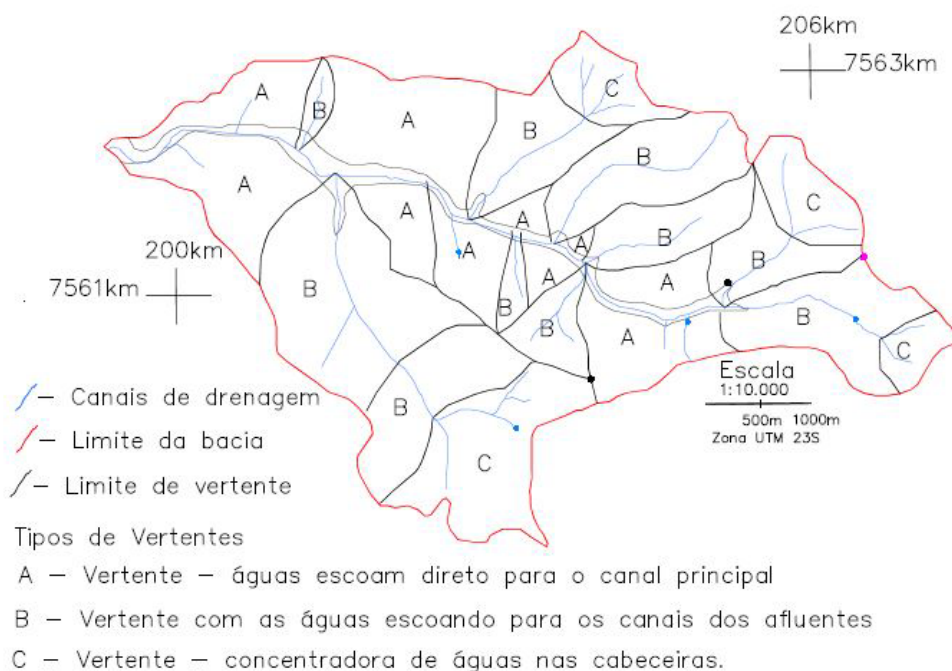


Figura 7 - Mapa das vertentes bacia do córrego do Gregório.

Na figura 8 encontra-se o mapa de materiais geológicos (inconsolidados e rochosos) e na figura 9 o mapa de profundidades do topo rochoso. Os mapas foram elaborados a partir de dados dos estudos citados e trabalhos de campo específicos desenvolvidos para caracterização *in situ* e amostragens. Na bacia em estudo encontram-se 11 unidades caracterizadas por perfis constituídos por diferentes variações de regolitos e litotipos e diferentes profundidades. Na tabela 3 encontram-se as principais formações geológicas com os principais litotipos e características básicas. Os materiais

inconsolidados constituintes das diferentes unidades são: os retrabalhados aluvionares, areno-argilosos e arenosos e os residuais dos litotipos das formações Botucatu, Serra Geral e Itaqueri (Tabela 4), e as principais características geológico-geotécnicas encontram-se na tabela 5. Estes materiais estão associados de diferentes maneiras gerando regolitos com espessuras que variam desde 1 até mais de 15m, com predomínio dos valores menores que 10m. Ressalta-se que as camadas superficiais condicionam a viabilidade e a eficiência, assim como a escolha do tipo de sistema.

Na figura 10 encontra-se o mapa da profundidade da zona saturada considerando as classes constantes da tabela 2. Observa-se que

partes significativas da bacia têm estimativas de profundidades da zona saturada menores que 5m.

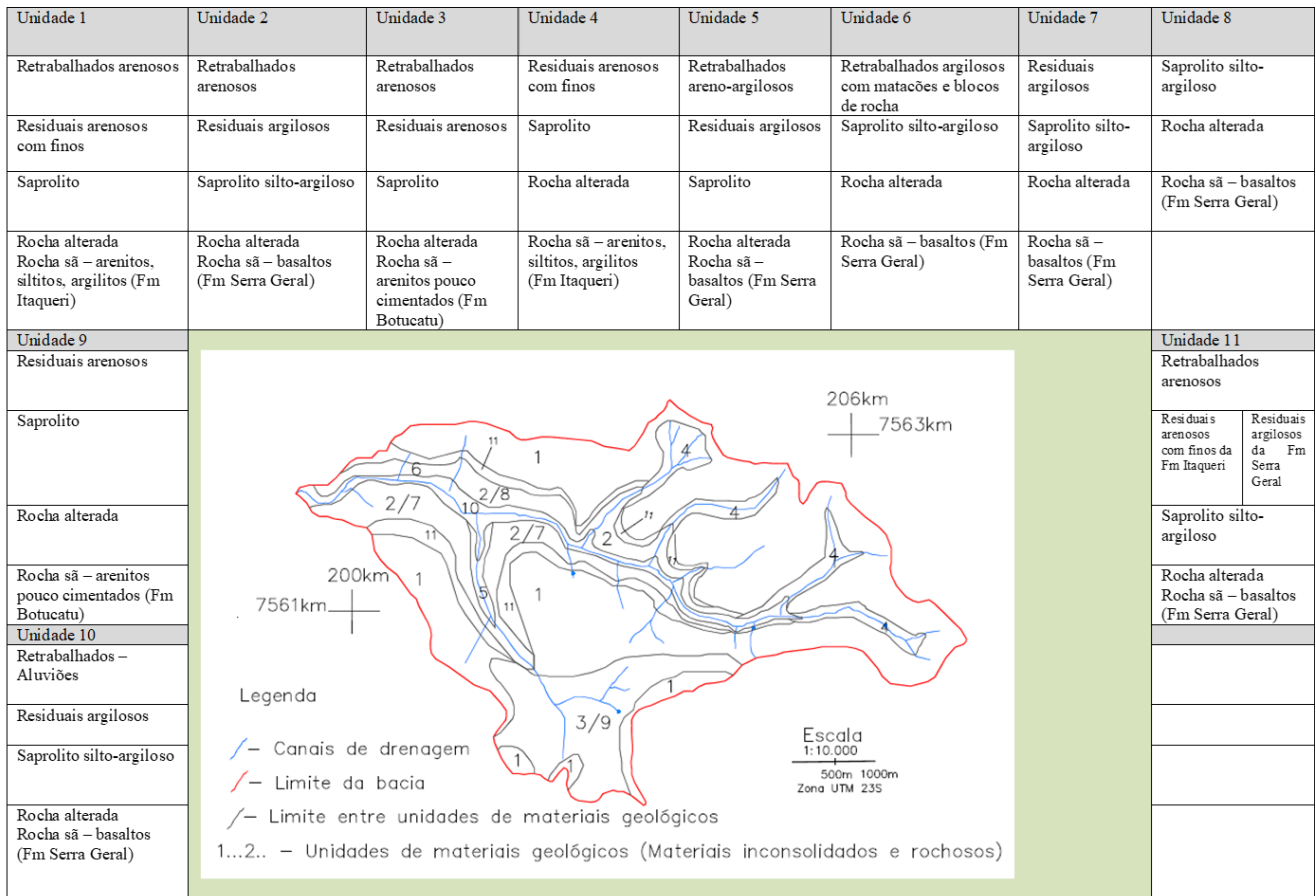


Figura 8 - Mapa de materiais geológicos da bacia do córrego do Gregório.

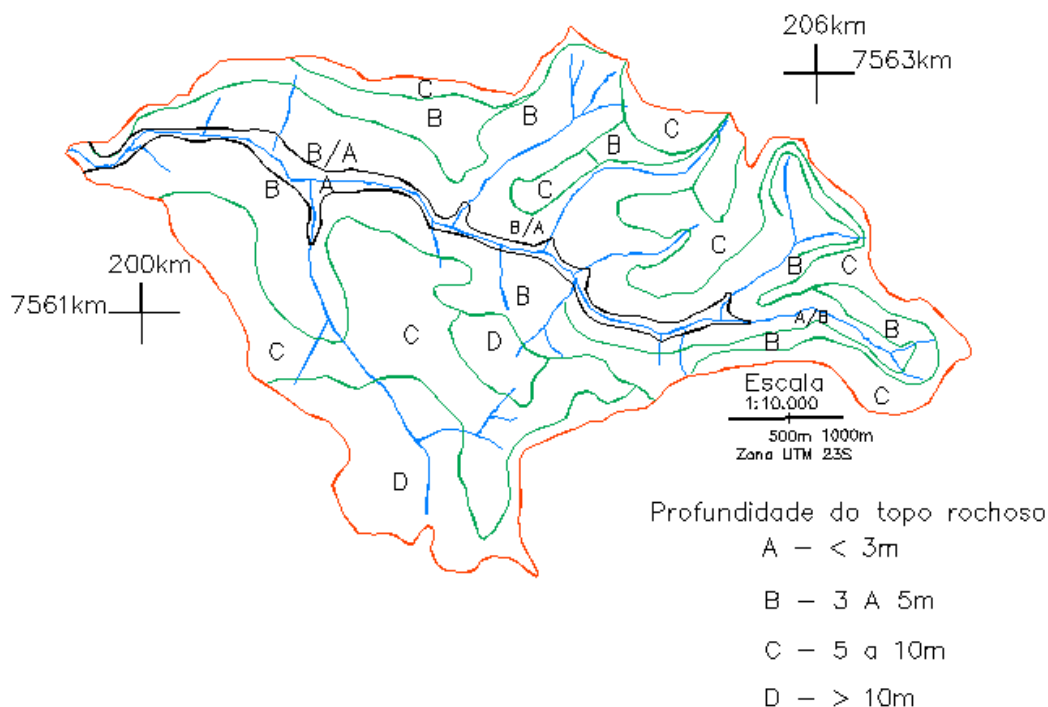


Figura 9 - Mapa da profundidade do topo rochoso da bacia do córrego do Gregório.

Tabela 3 - Principais formações geológicas e tipos rochosos na bacia.

Era	Período	Formação	Ambiente deposicional	Litologias	Características	Tipo de fluxo
Cenozoico	Paleoceno / Eoceno	Itaqueri	Leques aluviais, fluviais e lacustres	Arenitos com grau médio de cimentação, Siltitos/ Argilitos, Conglomerados	Estas litologias encontram-se intercaladas com camadas de diferentes espessuras	Os arenitos são bons armazenadores, porém as pequenas espessuras não permitem a boa produção e o fluxo predominantemente poroso
				Cretáceo	Serra Geral	Magmatismo fissural
Mesozoico				Basaltos intercalados com Arenitos	Camadas que apresentam espessuras pequenas da ordem de metros, continuidade variada, mas que ocorrem na bacia com afloramento dos arenitos e dos basaltos em diversos locais no vale principal.	
	Cretáceo/ Jurássico	Botucatu	Desértico (eólico)	Arenitos silicificados	Estão localizados geralmente em escarpas, muito fraturados e com espessuras menores que 100 metros	O fluxo dá-se por fraturas verticais a subverticais
				Arenitos com baixo grau de cimentação (Friáveis)	Ocorrem em grandes extensões e com espessuras que podem ultrapassar 100 metros	Fluxo do tipo poroso/alta transmissividade

Tabela 4 - Materiais inconsolidados e descrições básicas.

Material inconsolidado	Descrição geral
Retrabalhados - Aluvião	Recobrem materiais inconsolidados residuais com espessuras variadas, com camadas descontinuas, com variação de textura e espessuras que podem variar de 1 até 10m. Existem camadas com porcentagens significativas de matéria orgânica e com índice de compressibilidade alto. Ocorrem associados ao principal canal da bacia.
Retrabalhado areno-argiloso	Estes materiais recobrem os materiais inconsolidados residuais das formações Itaqueri e Serra Geral e, mesmo retrabalhados arenosos em locais específicos. Ocorre em uma parcela pequena da bacia, porém em área atualmente urbanizada.
Retrabalhado arenoso	O pacote de sedimentos recobre materiais inconsolidados residuais das formações Itaqueri e Serra Geral. As espessuras podem variar de centímetros até 2 dezenas de metros.
Residuais da Formação Itaqueri	Os materiais inconsolidados residuais (solo, saprolito, rocha alterada) da Fm Itaqueri apresenta variantes em função da litologia (arenitos, siltitos, argilitos, conglomerados) resultando em pacotes com diferentes características, desde textura arenosa até argilosa. As litologias podem apresentar algumas camadas com cimento carbonático. As espessuras são predominantemente menores que 5m.
Residuais da Formação Serra Geral	O perfil estratigráfico é constituído por materiais geológicos com características bem diferentes (solo, saprolito, rocha alterada), com espessuras menores que 10m, predominantemente menores que 5m, sendo que os saprolitos podem conter quantidades variadas de minerais como as esmectitas ou interestratificados.
Residuais da Formação Botucatu	Os materiais inconsolidados residuais (solo, saprolito, rocha alterada) desenvolvidos a partir dos arenitos pouco cimentados apresentam alto grau de homogeneidade e continuidade, são porosos e podem ser constituídos por mais de 90% de partículas de dimensões das areias.

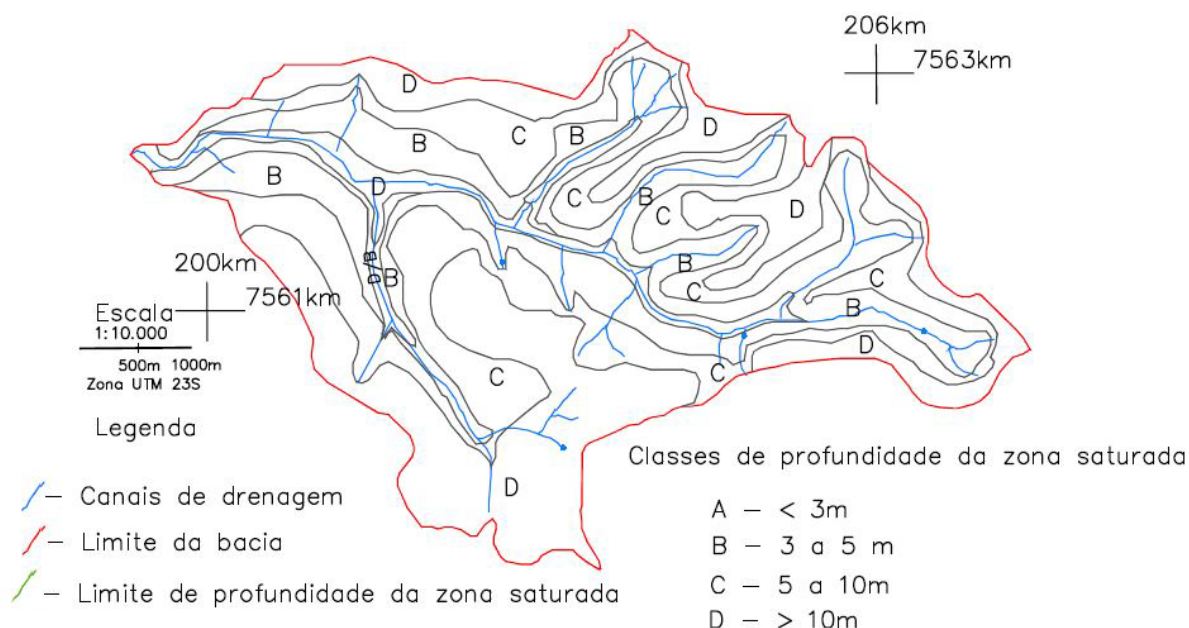


Figura 10 - Mapa da profundidade da zona saturada da bacia do córrego do Gregório.

Tabela 5. Características geológicas e geotécnicas dos materiais inconsolidados.

Material inconsolidado	Regolito Materiais	Textura	Mineralogia predominante	Espessura predominante (m)	Granulometria (%)			Peso específico aparente seco natural (KN/m ³)	Peso específico dos sólidos (KN/m ³)	Índice de vazios	Condutividade hidráulica (m/s)		Capacidade de Troca catiônica efetiva (CTC - cmole/kg)	Capacidade de campo	Capacidade de infiltração potencial (mm/h)
					Areia	Silte	Argila				Condição natural	Condição compactada			
Resíduos da Formação Itaqueri	Solo	Arenosos com finos	QZ, KL, GB	entre 3 e 5 m, localmente até 10	50 a 63	10 a 25	13 a 25	12 a 13,9	27,1	0,93 a 1,25	10 ⁻⁷ a 10 ⁻⁷	<10 ⁻⁷	2 a 5	22 a 28	24 a 31,5
	Saprolito	Areno-siltoso argiloso			50 a 55	15 a 25	15 a 25	13 a 14,5	27,1 a 29	0,86 a 1,2	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁸	<10 ⁻⁸	2 a 5		18 a 23
Perfil desenvolvido sobre siltitos e argilitos	Solo	Finos (siltos-argilosos)	QZ, KL, ES	<3m	22 a 30	20 a 50	>40	13 a 14,4	27,5 a 28,6	0,90 a 1,2	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁹	<10 ⁻⁹	5 a 10	24 a 30	6 a 15
	Saprolito	Finos rasos			22 a 30	20 a 50	>40	13 a 14,4	27,5 a 28,6	0,90 a 1,2	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁹	<10 ⁻⁹	5 a 10		6 a 15
Resíduos da Formação Serra Geral	Solo	Argiloso	QZ, KL, GB, ES, LM, MT, HM, GO	3 a 10	10 a 20	20 a 30	> 60	10,7 a 14,1	27,7 a 29,2	0,96 a 1,7	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁷	<10 ⁻⁸	5 a 10	29 a 36	90 a 100
	Saprolito	Siltos-argiloso	QZ, KL, ES, MT, HM, GO	<3	10 a 35	20 a 45	25 a 60	14 a 16	28 a 30	0,75 a 1,1	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁹	<10 ⁻⁸	5 a 10	30	22 a 30
Resíduos da Formação Botucatu	Solo	Argiloso raso	QZ, KL, ES, HM, GO	<3	10 a 35	20 a 45	25 a 60	14 a 16	28 a 30	0,75 a 1,1	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁹	<10 ⁻⁸	29 a 35	22 a 30	22 a 30
	Saprolito		QZ, KL, GB	>10m	>90	<10	<10	12,2 a 14,2	26,3 a 27,2	0,85 a 1,2	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁶	<10 ⁻⁷	<2	10 a 13	90 a 120
Retrabalhado colúvio arenoso argiloso	Solo		QZ, KL, GB		>85	<10	<15	14 a 15	26,3 a 27,2	0,75 a 0,94	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁷	<10 ⁻⁸	<2	10 a 13	50 a 80
	Saprolito		QZ, KL, GB												
Retrabalhado arenoso	Solo		QZ, KL, GB, IL, MT	3 a 10m	20-55	<15	25-50	13 a 16	26,2 a 27,5	0,63 a 1,12	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁶	<10 ⁻⁷	2 a 5	10 a 23	9 a 36
	Saprolito		QZ, KL, GB, IL, MT	Podem variar de 3 a 15	<90	<10	<10	12 a 14,1	26,3 a 27,2	0,86 a 1,26	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁷	>10 ⁻⁷	<2	21 a 29	36 a 65
Retrabalhados - Aluvião	Solo	Predomínio de finos	QZ, KL, IL, ES, MO	Decímetros a metros (camadas individuais)	depende da camada amostrada			13 a 18	26 a 29	0,7 a 1,5	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁹	<10 ⁻⁹	>5		12 a 15
	Saprolito	Predomínio de grosseiros	QZ, KL, MO, Cascachos multi-mineralícos								10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁶	<10 ⁻⁶	<5		25 a 30

QZ= quartzo; MO = Matéria orgânica; KL = Caulinita; ES = esmectitas; IL = ilita; MT = Magnetita; GB = Gibbsita; IM = Ilmenita; HM = Hematita; LM = Limonita; GO = Goethita

Análises intermediárias

Com base nos dados constantes nos documentos das figuras 7, 8, 9 e a10 e nas tabelas 3, 4 e 5 análises foram elaboradas de acordo com o conjunto de atributos e relações apresentados nos diagramas das figuras 3 e 4.

As principais limitações consideradas são as

áreas com profundidades do topo rochoso e da zona saturada rasas (<3m), sujeitas a inundações com lâmina de água de até 3m, com declividades altas (>30%), necessidade de zonas de proteção para fontes naturais e potenciais problemas construtivos como a ocorrência de matacões e camadas compressíveis (Figura 11).

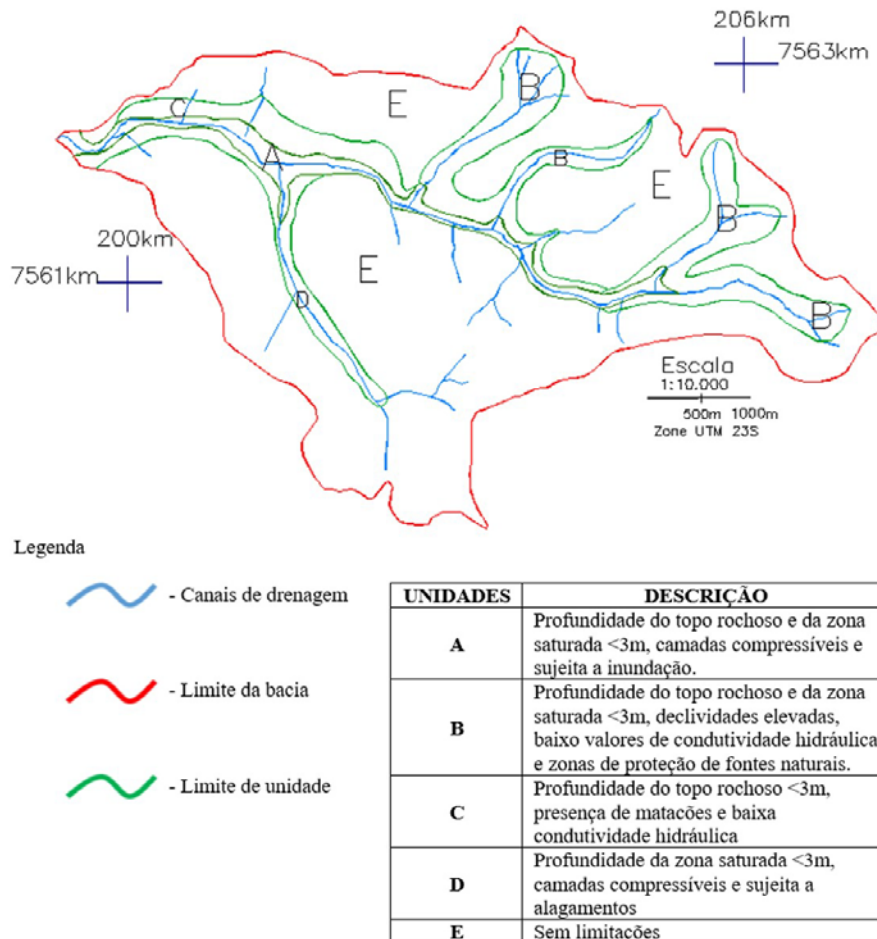


Figura 11 - Mapa de limitações funcionais e construtivas (constraints).

Quanto às condições de drenagem subsuperficial a bacia apresenta zonas com características bem distintas, sendo as constituídas pelos materiais residuais dos arenitos da Formação Botucatu com características muito favoráveis a infiltração e a capacidade de armazenamento dos materiais geológicos.

As áreas com os materiais retrabalhados arenosos apresentam capacidade de infiltração boa, porém recobrem materiais residuais das formações Serra Geral e Itaqueri com menores valores de condutividade hidráulica.

Serra Geral e Itaqueri apresentam condições de drenagem subsuperficiais mais restritivas que as anteriores devido aos valores mais baixos de condutividade hidráulica.

Quanto aos eventos perigosos potenciais, foram delimitadas as áreas sujeitas à inundação no mapa de limitações (Figura 11) e as caracte-

terísticas de porosidade e genéticas dos materiais inconsolidados retrabalhados arenosos, areno-argilosos, os residuais das formações Botucatu e da Serra Geral que apresentam potencial para colapsividade enquanto nos aluviões há camadas compressíveis.

Os materiais inconsolidados residuais das formações Serra Geral e da Itaqueri, principalmente, as camadas saprolíticas podem conter minerais de argila com caráter expansivo.

Zoneamento

Considerando os resultados básicos (Figuras 7 a 10, Tabelas 3, 4 e 5) e as análises intermediárias (Figura 11) foi desenvolvido um zoneamento da bacia quanto à adequabilidade de sistemas de drenagem sustentáveis (SDS) subdividindo em 5 zonas que contemplam diferentes características consideradas favoráveis, moderadas, severas e restritivas de acordo com os atributos e classes

citados na tabela 2, assim como as condições que são favoráveis a cada sistema, conforme Woods Ballard et al. (2015), Horton et al. (2015) e CIRIA (2000a,b).

Na figura 12 encontra-se o mapa de zoneamento

das unidades quanto a adequabilidade e na tabela 6 as características fundamentais de cada zona, assim como algumas orientações básicas referentes às instalações e os problemas construtivos, funcionais e ambientais.

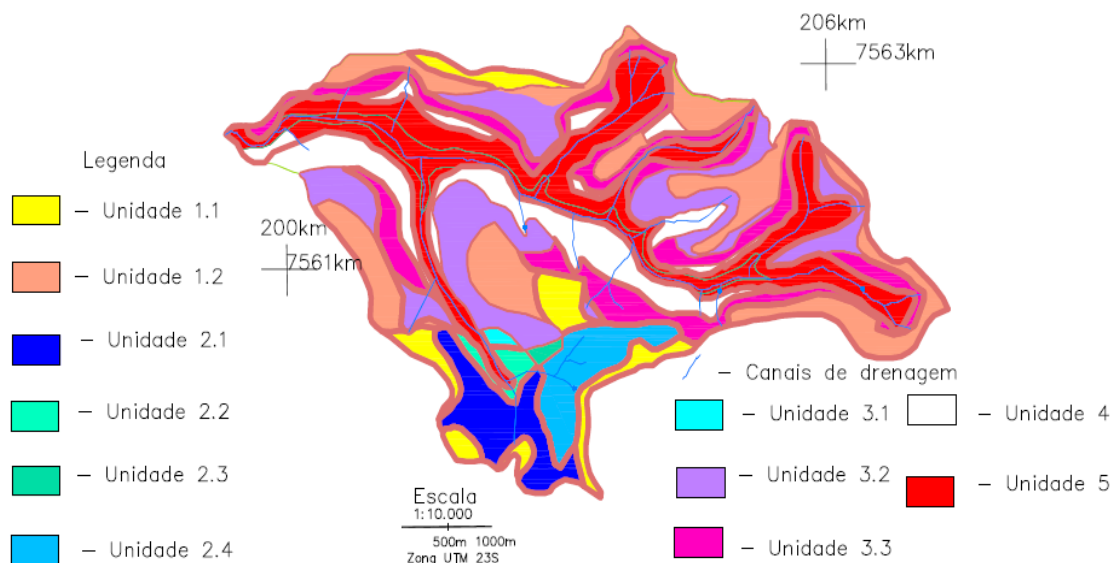


Figura 12 - Mapa de zoneamento da adequabilidade de SDSs.

Com base nas características de cada zona foi elaborada uma análise sobre o potencial dos diferentes tipos de sistema para cada zona de adequabilidade (Figura 12), conforme tabela 7.

Observa-se que alguns tipos de SDSs apresentam potencial para mais de uma zona de adequabilidade, mas a escolha e o projeto do tipo de SDS para o local específico dependerão da distribuição espacial dos usos, ocupações e linhas e equipamentos de infraestruturas.

Em função da profundidade da zona saturada e do topo rochoso, das características de permeabilidade, da porosidade e da capacidade de armazenamento dos materiais geológicos as zonas 1 e 2 apresentam potencial para um

conjunto significativo de tipos, enquanto a zona 3 apresenta um potencial mais restrito.

Ressalta-se que as condições mais favoráveis de infiltração são apresentadas pela zona 2, porém é a que também apresenta maior potencial para contaminação das águas subsuperficiais, sendo aconselhável o uso de sistemas que permitem o uso de barreiras reativas permeáveis horizontais conforme orientações contidas em Rocha & Zuquette (2020a, b).

As zonas 1 e 3 apresentam interfaces hídricas que podem interferir na eficiência de potenciais sistemas baseados em infiltração, maiores na 3 do que na zona 1.

CONCLUSÕES

Os atributos obtidos por meio dos procedimentos de mapeamento geotécnico permitiram o zoneamento da bacia quanto à adequabilidade para instalação de sistemas de drenagem sustentáveis e os tipos mais adequados.

É fundamental considerar o detalhamento da escala visto que pequenas variações dos dados podem inviabilizar alguns sistemas e as condições construtivas. Considerando as demandas pela manutenção da qualidade dos componentes ambientais é fundamental o detalhamento durante o mapeamento e a adequada caracterização geotécnica dos materiais geológicos e de suas propriedades.

Apesar de extensa a listagem de atributos

propostos, a ocorrência dos mesmos com determinadas magnitudes afeta a adequabilidade e, podem gerar problemas ambientais.

O elenco de atributos e classes mostrou-se eficientes no processo de zoneamento e para elaboração de análises intermediárias, bem como na elaboração dos mapas fundamentais, intermediários e de adequabilidade.

Como resultado obteve-se uma divisão com 5 zonas, sendo 3 (Zonas 1, 2 e 3) com predomínio de condições favoráveis (60% da bacia) que reúnem boas perspectivas para os tipos de sistemas baseados na infiltração, a zona 4 com mais limitações onde podem ser instalados alguns

Tabela 6 - Quadro síntese das zonas de adequabilidade dos SDSs.

Zona	Unidade geológica	Características básicas				Aspectos de adequabilidade				
		K (m/s)	SZ	PZS (m)	PTR (m)	Condição de funcionabilidade	Condição construtiva	Condição de drenagem subsuperficial	Condição potencial de contaminação das águas subsuperficiais	Condição de estabilidade
1	Unidade 1 Unidade 2	10 ⁻³ a 10 ⁻⁴	1.1	>10	>10	Favorável/ Moderada	Camada superficial quando compactada ou ausente devido às atividades antropogênicas afeta a condição de instalação.	Favorável desde que a camada superficial não esteja compactada.	Em algumas condições podem contaminar o topo da zona saturada próximos as fontes, o que poderá afetar a qualidade das águas que fluem das fontes.	Colapsividade
			1.2	>10	5 a 10	Favorável/ Moderada	Camada superficial compactada ou ausente devido às atividades antropogênicas. A profundidade do topo rochoso pode limitar a profundidade e eficiência do sistema.	Com condições moderadas visto que a camada superficial está sobre camada de material com menores valores de K.	Condição mais severa que a da Subzona 1.1	Colapsividade No caso da sobreposição da Fm Itaqueri podem ocorrer siltos e argilitos com minerais expansivos.
2	Unidade 3 Unidade 9	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁶	2.1	>10	>10	Favorável	Camada superficial compactada ou ausente devido às atividades antropogênicas. Problema de instabilidade devido à baixa coesão apresentada pelo material geológico.	Favorável, desde que a camada superficial não esteja compactada ou ausente devido às atividades antropogênicas. As águas do escoamento superficial podem apresentar altas taxas de sedimentos.	As condições são severas pois é uma área de recarga do principal aquífero e o material geológico apresenta capacidade de sorção e retardamento baixa. Aconselhável o uso de BRP horizontais (Rocha & Zuquette, 2020a, b).	Colapsividade Índice de erodibilidade elevado o que pode gerar instabilidade em taludes escavados, assim como de sedimentos.
			2.2	>10	5 a 10	Favorável	Condição semelhante à subzona 2.1.	Similar a subzona 2.1.	Condição semelhante à subzona 2.1.	Semelhante a subzona 2.1.
			2.3	5 a 10	5 a 10	Moderada	Condição semelhante à subzona 2.1.	Similar a subzona 2.1.	Condições são mais severas que a subzona 2.1.	Semelhante a subzona 2.1.
			2.4	5 a 10	>10	Moderada	Condição semelhante à subzona 2.1.	Similar a subzona 2.1.	Condições são mais severas que a subzona 2.1.	Semelhante a subzona 2.1.
3	Unidade 1 Unidade 2 Unidade 11	10 ⁻³ a 10 ⁻⁶	3.1	5 a 10	>10	Moderada	A ocorrência de camadas compactadas ou ausentes impõe restrições devido às profundidades da zona saturada.	Condição moderada desde que a camada não esteja compactada ou ausente.	A condição de potencial de contaminação do topo da zona saturada próximos às fontes é maior que na zona 1.	Colapsividade No caso da sobreposição da Fm Itaqueri pode ocorrer siltos e argilitos com minerais expansivos.
			3.2	5 a 10	5 a 10	Moderada	A profundidade e a eficiência do sistema podem ser condicionadas em função do topo rochoso com K muito baixo	Moderada a severa devido à profundidade menor do topo rochoso. Pode ocorrer acúmulo de água infiltrada gerando uma zona saturada suspensa e fluxo paralelo à superfície do topo rochoso.	Semelhante a Subunidade 3.1.	Devido à menor profundidade do topo rochoso pode ocorrer siltos e argilitos com minerais expansivos.
			3.3	10 a 5	3 a 5	Moderada/ Severa	Similar a 3.2	Severa devido à profundidade menor do topo rochoso. Pode ocorrer acúmulo de água infiltrada gerando uma zona saturada suspensa e fluxo paralelo à superfície do topo rochoso.	Similar a Unidade 3.1	Similar a Unidade 3.2
4	Unidade 4 Unidade 7 Unidade 8	10 ⁻³ a 10 ⁻⁹ (com predomínio de <10 ⁻⁹)		3 a 5	3 a 5	Severa	Na unidade 8 podem ser encontrados matações. Nas camadas saprolíticas existe possibilidade de minerais expansivos.	Severa a restritiva devido aos valores de K e a profundidade da zona saturada.	Os materiais geológicos apresentam capacidade de sorção e de retardamento elevada o que gera uma proteção adequada.	Podem ocorrer materiais com minerais expansivos, devido à baixa permeabilidade pode ocorrer acúmulo de água surgindo fluxos em superfície e instabilidade dos sistemas.
5	Unidade 4 Unidade 5 Unidade 6 Unidade 10 Unidade 7 Unidade 8	10 ⁻³ a 10 ⁻⁹ (com predomínio de <10 ⁻⁹)		<3	<3	Restritiva	Restritiva	Restritiva devido a K baixos, topo da zona saturada raso.	Profundidade da zona saturada muito rasa	Compressibilidade em camadas saprolíticas.

K = Condutividade Hidráulica da camada superficial; SZ = Subzona; PZS = Profundidade da zona saturada; PTR = Profundidade do topo rochoso;

Tabela 7 - Tipos de SDSs mais adequados a cada zona.

TIPOS DE SDSs	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5
Faixas vegetadas para favorecer a infiltração e retenção das águas (<i>Filter strips</i>)				X	
Drenos filtrantes e Tubos perfurados (<i>Filter drain or Perforated pipes</i>)	X	X	X		
Poço de infiltração/ Sumidouro (<i>Soakaway</i>)	X	X	X		
Canal vegetado (<i>Swales</i>)				X	
Bacia de infiltração (<i>Infiltration basin</i>)	X	X			
Bacia de detenção ampliada (<i>Extended detention basin</i>)				X	
Trincheira de infiltração (<i>Infiltration trench</i>)	X	X			
Manta de drenagem/infiltração (<i>Infiltration blanket</i>)	X	X			
Sistema de bio-retenção (<i>Bioretention system</i>)	X	X			
Áreas úmidas construídas (<i>Constructed wetland</i>)		X			
Depressão (<i>Ponds</i>)	X	X			
Superfícies permeáveis (<i>Pervious surfaces</i>)	X	X			
Pavimentos permeáveis (<i>Pervious pavement</i>)	X	X	X		
Filtro de areias/pedriscos (<i>Sand filter</i>)			X	X	
Geocélulas drenantes (<i>Geocellular system</i>)	X	X			
Plantação de árvores/Vegetação (<i>Tree plantation</i>)			X	X	
Tanques de armazenamento e atenuação (<i>Attenuation storage tank</i>)	X	X	X	X	

tipos de sistemas que são para coleta, acumulo e controle do escoamento superficial e a zona 5 com limitações as quais não se recomendam a instalação de sistemas, devido às limitações funcionais, construtivas e ambientais.

As zonas 1, 2 e 3 apresentam potencial para um grupo maior de tipos, tais como: Drenos filtrantes e/ou Tubos perfurados (*Filter drain or Perforated pipes*), Poço de infiltração/ Sumidouro (*Soakaway*), Bacia de infiltração (*Infiltration basin*), Trincheira de infiltração

(*Infiltration trench*), Manta de drenagem/infiltração (*Infiltration blanket*), Geocélulas drenantes (*Geocellular system*), Sistema de bioretenção (*Bioretention system*), Depressão (*Ponds*), Superfícies permeáveis (*Pervious surfaces*) e Pavimentos permeáveis (*Pervious pavement*). Os resultados obtidos permitem concluir que o existe grande potencial para a adoção dos SDSs e, como decorrência o controle do escoamento superficial e conseqüentemente das inundações.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R.L. **Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana de São Carlos, SP**. São Carlos, 1989. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ANDERSEN, T.R. Detailed Geophysical Mapping and Hydrogeological Characterization of the Subsurface for Optimal Placement of Infiltration-Based Sustainable Urban Drainage Systems. **Geosciences**, v. 10, n. 11, p. 446, 2020.
- BOCKHORN, B.; KLINT, K.E.S.; LOCATELLI, L.; PARK, Y.J.; BINNING, P.J.; SUDICKY, E.; JENSEN, M.B. Factors Affecting the Hydraulic Performance of Infiltration Based SUDS in Clay. **Urban Water J.**, v. 14, p. 125–133, 2017.
- BUTLER, D. & PARKINSON, J. Towards sustainable urban drainage. **Water Sci Technol**, v. 35, v. 9), p. 53–63, 1997.
- CHARLESWORTH, S.M.; HARKER, E.; RICKARD, S.A. Review of sustainable drainage systems (SuDS): A soft option for hard drainage questions? **Geography**, v. 88, n. 2, p. 99–107, 2003.
- CIRIA. **Sustainable urban drainage systems - design manual for England and Wales**. 2000a. [on-line] At: www.ciriabooks.com Date of access: 15/6, 2020.
- CIRIA. **Sustainable urban drainage systems - design manual for Scotland and Northern Ireland**. 2000b [on-line] At: www.ciriabooks.com Date of access: 15/6, 2020.
- CIRIA. **SUDS Techniques**. 2006. [on-line] At: http://www.ciria.org/suds/suds_techniques.htm Date of acesso: 10/12, 2020.
- DEARDEN R. & PRICE S A national suitability dataset for infiltration-based sustainable drainage systems. In: Savic´ D, Kapelan Z, Butler D (eds) **Eleventh international conference on computing and control for the water industry**. Centre for Water Systems, University of Exeter, Exeter, p 253–258, 2011.
- DEARDEN, R. & PRICE, S. A proposed decision-making framework for a national infiltration SuDS map. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 23, p. 478–485, 2012.
- DEARDEN, R.A.; MARCHANT, A.; ROYSE, K. Development of a suitability map for infiltration sustainable drainage systems (SuDS). **Environ Earth Sci**, v. 70, p. 2587–2602, 2013.
- ELLIS, J.B.; DEUTSCH, J.C.; MOUCHEL, J.M.; SCHOLLES, L.; REVITT, M.D. Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff. **Sci Total Environ**, v. 334–335, p 251–260, 2004.
- FAILACHE, M. **Proposta de procedimentos para a estimativa de infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial baseada em dados geológicos, geotécnicos, de uso e ocupação e eventos de chuva**. São Carlos, 2018. PHD Thesis, Geotechnics Department, University of São Paulo.
- HORTON, B.; DIGMAN, C.J.; ASHLEY, R.M.; GILL, E. **BeST (Benefits of SuDS Tool) Technical Guidance**, CIRIA W045c RP993, 2015.
- NISHIYAMA, L. **Mapeamento geotécnico preliminar da quadricula de São Carlos – SP**. Dissertação (Mestrado), São Carlos, 1989. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PONS, N.A.D. **Levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos – SP, com auxílio de geoprocessamento**. São Carlos, 2006. Tese (Doutorado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROCHA, L.C.C. & ZUQUETTE, L.V. Estudo de meio reativo para barreiras reativas permeáveis (brp): ensaios laboratoriais. **Geociências**, v. 39, n. 4, p.1025 - 1040, 2020b.
- ROCHA, L.C.C. & ZUQUETTE, L.V. Evaluation of Zeolite as a Potential Reactive Medium in a Permeable Reactive Barrier (PRB): Batch and Column studies. **Geosciences**, v. 10, n. 2, p. 59, 2020a.
- ROTTA, C.M.S & ZUQUETTE, L.V. Assessment of environmental degradation due to anthropogenic processes based on critical zones: a study in a basin in southern Brazil. **Environ Earth Sci**, v. 80, p. 215, 2021.
- SHARMA, S. Geological Behaviours in Urban Areas for Surface Runoff and Recharge. **Open Journal of Soil Science**, 7, 181–201, 2017. <https://doi.org/10.4236/ojss.2017.78014>
- WOODS BALLARD, W.; WILSON, S.; UDALE-CLARKE, H.; ILLMAN, S.; SCOTT, T.; ASHLEY, R.; KELLAGHER, R. **The SUDS Manual**. CIRIA C697, London, 2015.
- ZHOU, Q. A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. **Water**, v. 6, p. 976–992, 2014.
- ZUQUETTE, L. V. **Mapeamento geotécnico preliminar na região de São Carlos**. São Carlos, 1981. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ZUQUETTE, L.V. **A importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: Fundamentos e guia para elaboração**. São Carlos, São Paulo. 1993. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1993.
- ZUQUETTE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras**. São Paulo. 673 p. 1987. Tese (Doutorado em Geotecnia). São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ZUQUETTE, L.V.; PEJON, O.J.; COLLARES, J.Q.S. Engineering geological mapping developed in the Fortaleza Metropolitan Region, State of Ceará, Brazil. **Eng. Geol.** v. 71, p. 227 – 253, 2004.

Submetido em 16 de maio de 2021

Aceito para publicação em 15 de outubro de 2021