

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ORIENTAÇÕES PARA ALOCAÇÃO DE SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA REMEDIAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

*Vinícius R. P. de Oliveira^{1,2}; Reginaldo Bertolo¹; Leonardo C. de Andrade¹; Fernando Schuh Rörig¹;
Priscila Ikematsu²; Tatiana Tavares³; Ricardo Hirata¹*

Resumo:

Os processos de impermeabilização, ampliação da agropecuária e a contaminação ambiental geram alterações na quantidade e qualidade dos recursos hídricos e na resiliência das áreas florestais. Esses impactos representam os novos desafios das cidades modernas na construção de cidades resilientes. As Soluções Baseadas na Natureza (SbN) são técnicas que mimetizam a natureza e promovem serviços ecossistêmicos e co-benefícios socioeconômicos. SbN mista com potencial para tratar solos e águas simultaneamente é a filtração em margem seguida da fitorremediação. No entanto, não existe na literatura metodologia baseada em critérios para seleção de um local para implementar SbN. O objetivo do estudo é definir e utilizar critérios para selecionar uma área verde para implementação de SbN, com foco na remediação de águas subterrâneas. Foram definidos cinco critérios de seleção: (i) biodiversidade de espécies vegetais; (ii) espécies nativas com potencial em fitorremediação; (iii) condições edáficas; (iv) hidrogeologia; e (v) hidroquímica. Para utilizar esses critérios foram empregados estudo da botânica, avaliação do solo, análise de água, geofísica e medição do nível do aquífero raso como metodologias de investigação. O Horto Florestal de Bauru foi utilizado como local para testar os critérios. A área selecionada possui elevada biodiversidade nativa e com potencial em fitorremediação. O solo é arenoso e apresenta moderada fertilidade e distribuição de raízes ao longo do solo. O aquífero freático é raso com ambiente hidroquímico ácido e oxidante. Os critérios são suficientes para a seleção de uma área para a implementação de SbN, com foco em remediação de águas subterrâneas.

Palavras-Chave – Qualidade da água; Aquífero; Seleção de área.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, as crises hídricas e a rápida urbanização são os novos desafios para gestão do território e do ambiente. As alterações quantitativas e qualitativas dos recursos hídricos, bem como a diminuição de áreas verdes, são frutos da impermeabilização, da ampliação de áreas para agropecuária e da contaminação ambiental (Majidi et al., 2019; Daba, You, 2022). O processo de urbanização gera pressão sobre o fornecimento de água de qualidade e a eficiência dos sistemas de esgotamento sanitário (Yin et al., 2015). Como resposta, o conceito de cidades inteligentes vislumbra apresentar ações e medidas frente aos problemas das cidades modernas com objetivo de promover sustentabilidade e serviços ecossistêmicos.

Dentre as ações desejáveis, as Soluções baseadas na Natureza (SbN) são técnicas que mimetizam a natureza. Debele et al., (2019) subdividem as SbN em quatro grupos (i) azul (baseada em água); (ii) verde (baseada na vegetação); (iii) mista (azul-verde); e (iv) híbrida (verde/azul-cinza). As SbNs são vistas como instrumentos do futuro para cidades resilientes diante aos riscos

1) Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP), Rua do Lago, 562 - Butantã, São Paulo - SP, 05508-080, 11 95993-2000, viniciusrogel@usp.br

2) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Butantã, São Paulo, 05508-901

3) Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Rua Mucuri, S/N, Setor Conde dos Arcos, Aparecida de Goiânia - GO, 74.968-755

hidrometeorológicos (HMHs) — inundações, secas, erosão, eutrofização e ilhas de calor — além de viabilizar serviços ecossistêmicos e co-benefícios socioeconômicos (Ovando, Roy 2019).

Um exemplo de SbN mista com potencial de mitigar e tratar solos e águas contaminadas é a Filtração em Margem (FM) seguida por fitorremediação. A FM realiza a filtração de contaminantes por meio do bombeamento de poços próximos a rios contaminados e durante a passagem da água pelo meio poroso, processos físicos, químicos e biológicos melhoram a qualidade de água (Covatti, Grischek 2021) enquanto a fitorremediação utiliza a colaboração entre planta e microrganismos para extrair ou degradar contaminantes presentes em solos e águas (EPA, 2000; Wani et al., 2017).

No entanto, critérios orientativos para a seleção de locais para instalar SbN, com foco na remoção de nutrientes de águas subterrâneas, são incipientes na literatura. Os principais esforços têm se concentrado em escolher uma SbN frente a um problema e como avaliar sua eficiência ao longo do tempo e espaço (Alves et al., 2018). Assim, os objetivos do estudo são: definir e utilizar critérios na seleção de uma área verde para implementação de Soluções baseadas na Natureza (SbN), com foco na remediação de águas subterrâneas.

METODOLOGIA

Área de estudo

Como região de interesse, o município de Bauru está localizado na porção centro-oeste do Estado de São Paulo (22°18'54"S; 49°03'39"O). O clima é subtropical (Cfa - classificação de Köppen-Geiger) as temperaturas máximas e mínimas médias são de 27,7 °C e 16,9 °C. A precipitação é superior a 1.000 mm por ano (Carboni et al., 2020; Cruciol-Barbosa et al., 2023).

Bauru sofreu diversos problemas relacionados a gestão inadequada do saneamento e na alteração no uso e ocupação do solo. O desenvolvimento territorial em Bauru ocasionou perdas extensas em áreas verdes nativas trocadas por áreas agrícolas e de silvicultura. Além disso, o sistema de esgotamento sanitário ineficiente e antigo da cidade tem contaminado as águas superficiais e subterrâneas (Varnier et al., 2009; Marques et al., 2019; Abreu, Magalhães, 2022).

O Horto Florestal de Bauru, criado em 1928, tinha por finalidade a produção de mudas para região. Atualmente, sua função é ecológica, cênica e recreacional para a população. O Horto Florestal de Bauru foi escolhido devido à extensa área verde remanescente (20 ha), sua inserção na zona urbana de Bauru e à presença do córrego Água Comprida em seu interior. Este córrego é tributário do Rio Bauru (principal corpo receptor de efluentes do município) e, ambos são impactados por esgoto doméstico sem tratamento.

O experimento consiste em um sistema integrado de Filtração em Margem e Fitorremediação (FM&FR) instalado em uma área florestal. O experimento consiste na filtração da água por bombeamento de um poço na margem do córrego, a água será destinada para irrigação da área florestal por gotejamento, seguido de monitoramento contínuo na zona não saturada e saturada por equipamentos de investigação.

Critérios para seleção da área experimental

Os critérios para alocação de SbNs foram baseados em condições estruturais da FM&FR e características do sistema planta-solo-água. Assim, foram definidos cinco critérios para orientar a seleção da área experimental: (i) biodiversidade de espécies vegetais; (ii) espécies nativas com potencial em fitorremediação; (iii) condições edáficas; (iv) hidrogeologia; e (v) hidroquímica.

(i) Biodiversidade de espécies vegetais: em estudos de fitorremediação são determinados, a espécie, o contaminante e uma metodologia para avaliação da resposta, normalmente, em ambiente laboratorial. No entanto, a resposta não é semelhante em condições naturais (Wei et al., 2021).

Portanto, este estudo visa determinar um ambiente natural com elevada biodiversidade em um estrato florestal completo (arbóreo, arbustivo e herbáceo), considerando ainda, a integração e interação entre espécies, microrganismos e fatores abióticos;

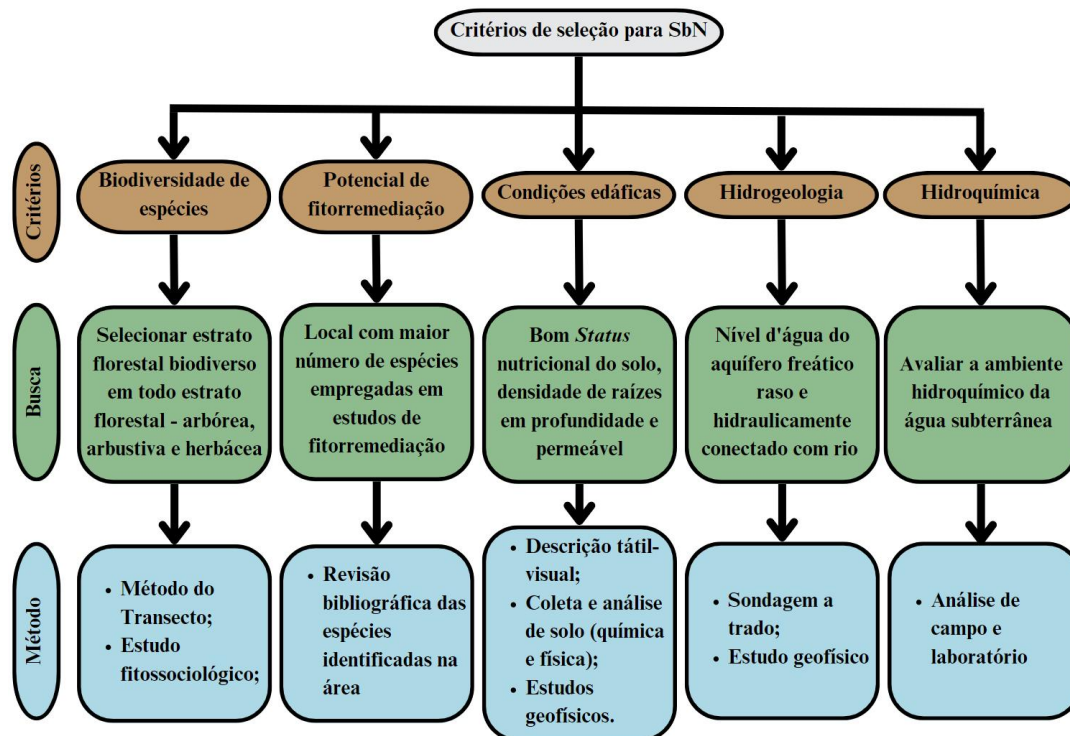
(ii) Espécies nativas com potencial em fitorremediação: esse critério procura encontrar espécies com potencial para extrair ou degradar contaminantes e tolerante ao ambiente contaminado (Bolan et al., 2011). Portanto, o estudo busca um local com maior número de espécies que possuam potencial de fitorremediação, baseado na literatura;

(iii) Condições edáficas: conhecer a estrutura, tipo e textura do solo orienta a alocação de poços de FM de forma eficiente (Rao et al., 2021). Além disso, avaliar e corrigir a fonte de nutrientes do solo pode aumentar o desempenho das espécies em relação ao contaminante testado (Bolan et al., 2011; Wang et al., 2017). Portanto, o estudo busca um local com status nutricional moderado do solo, densidade de raízes em profundidade e textura que favoreça a migração da água no compartimento do solo, com alta porosidade e condutividade hidráulica;

(iv) Hidrogeologia: em estudos de fitorremediação, por vezes, não é avaliada a hidrogeologia (nível d'água), sendo analisados somente processos de percolação e lixiviação de contaminantes (Bolan et al., 2011). Avaliar o nível d'água permite monitorar a comportamento do aquífero sob processos de absorção pelas plantas e na interface rio-aquífero durante o bombeamento de poços da FM, sendo necessária portanto a existência de aquífero freático raso e hidraulicamente conectado ao rio;

(v) Hidroquímica: a química das águas subterrâneas também não é mencionada em fitorremediação. Na FM, as características químicas da água subterrânea são importantes para alocação dos poços e, compreensão das transformações e alterações da qualidade da água entre a água do córrego e após a migração até a FM (Pan et al. 2018), assim como mensurar a geoquímica resultante da fitorremediação. Portanto, o estudo visa avaliar a hidroquímica da água subterrânea para interpretação dos processos de transformações geoquímicas, conforme a Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de critérios de seleção



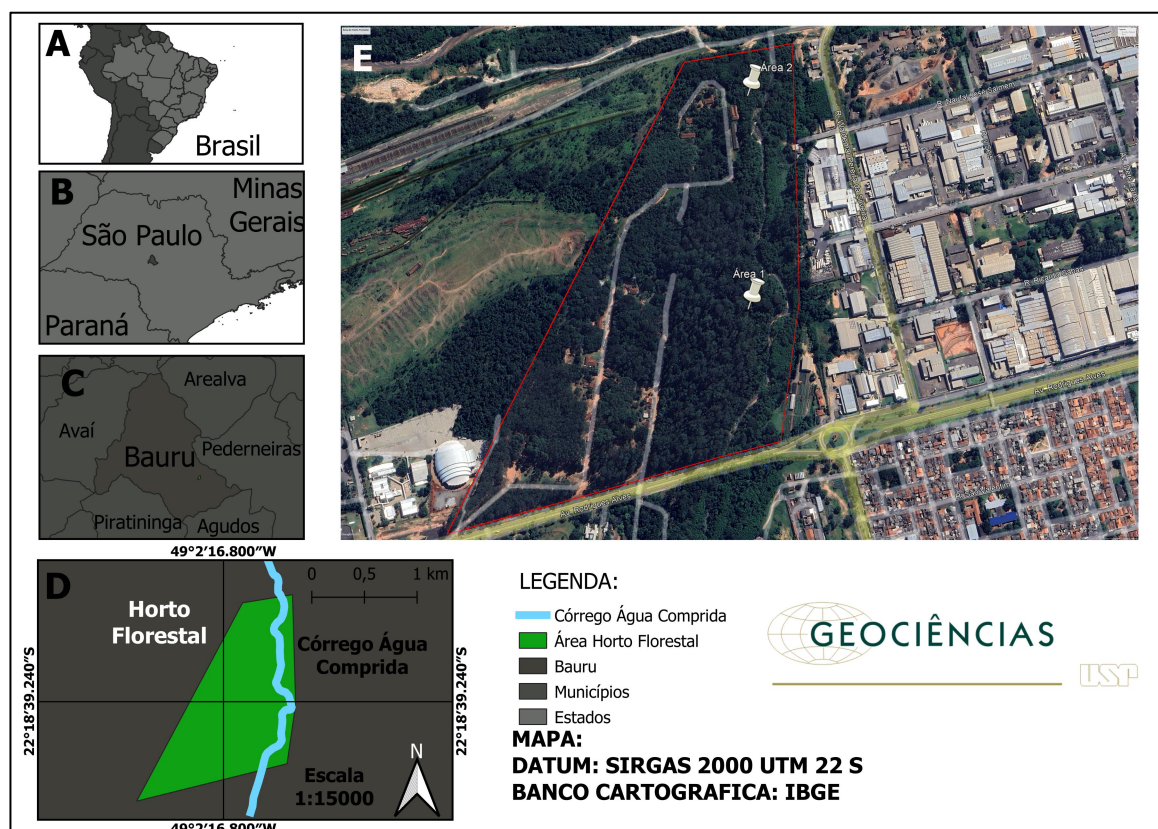
Aplicação dos critérios no Horto Florestal de Bauru

A aplicação dos critérios de seleção da área experimental foi feita em duas etapas. A primeira ocorreu em duas áreas distantes entre si, e a segunda para refinamento da área selecionada

na primeira etapa. A primeira etapa aconteceu em dois locais com 10.000 m²: na área 1, localizada ao sul do Horto, e na área 2, ao norte do Horto (Figura 2).

O método do transecto foi adotado para a identificação visual das espécies nativas e exóticas (critério i) e o potencial de fitorremediação das espécies identificadas foi avaliado em uma revisão bibliográfica (critério ii). A caracterização do solo, hidrogeologia e hidroquímica ocorreram simultaneamente, por sondagem a trado em dois pontos por local, no interior da floresta (S1 e S3) e no banco de areia do córrego (S2 e S4). Durante as sondagens, foram coletadas amostras de solo para descrição do perfil do solo (critério iii), medição do nível d'água (critério iv) e coleta da água para análise dos parâmetros de campo: pH, oxigênio dissolvido, temperatura, condutividade elétrica, potencial óxido redução (ORP) (critério v).

Figura 2 - Localização das áreas avaliadas no Horto Florestal de Bauru



A segunda etapa de refinamento da área primeiramente selecionada ocorreu em três parcelas de 100 m². Nestas foram realizados estudo fitossociológico, caracterização edáfica e estudos geofísicos (tomografia elétrica e sondagens elétricas verticais). O estudo fitossociológico foi elaborado contabilizando e identificando as espécies arbóreas, arbustiva e herbácea em função do diâmetro e altura (critério i). Os estudos geofísicos foram utilizados para avaliar as camadas litológicas (critério iii) e estimar o nível d'água (critério iv).

A tomografia elétrica foi realizada com o *ABEM Terrameter SAS-300b* e o *Syscal Pro 48 Switch* em três linhas próximas às parcelas. A linha 1 com 240 m de comprimento e as linhas 2 e 3 com 70 m (Figura 3). O arranjo foi dipolo-dipolo com eletrodos de aço, inseridos no solo com espaçamento de 5 m para linha 1 e 3 m para as linhas 2 e 3 respectivamente. Os dados foram processados no *Res2dinv* e *Surfer*. A Sondagem Elétrica Vertical (SEV) foi realizada com o *ABEM SAS 300b* no mesmo local das linhas da tomografia elétrica. A distância foi de 120 m com arranjo Schlumberger com distância inicial entre eletrodos de 0,5 m e 2,0 m na distância de 20 m com

distância de abertura de 1,5 aumentando até 60 m. Os dados foram processados no IPI2win - *Resistivity Sounding Interpretation*.

A avaliação da distribuição de raízes no solo foi realizado comparando a presença de raízes da superfície até a última camada. Por fim, a caracterização edáfica foi realizada na escavação de três trincheiras próximas às parcelas. A dimensão da trincheira foi de 2 m² e 2,10 m de profundidade, exceto a trincheira do banco de areia com 1,7 m de profundidade. Foram coletadas 140 amostras de solo para análises físicas, de fertilidade e de espécies de nitrogênio. As amostras foram coletadas em 7 pontos nas profundidades: 0,20 m, 0,40 m, 0,60 m, 0,8 m, 1,2 m, 1,6 m e 2,0 m, exceto a trincheira do banco de areia até 1,6 m e enviadas para o laboratório.

Para as análises de química e fertilidade foram coletadas 300 g por ponto para análise de pH, matéria orgânica, saturação de alumínio e nitrogênio total. As análises físicas do solo foram realizadas pelo método do anel volumétrico (5 cm x 5 cm) com auxílio do extrator de amostra indeformada em cada profundidade para análise de textura.

RESULTADOS

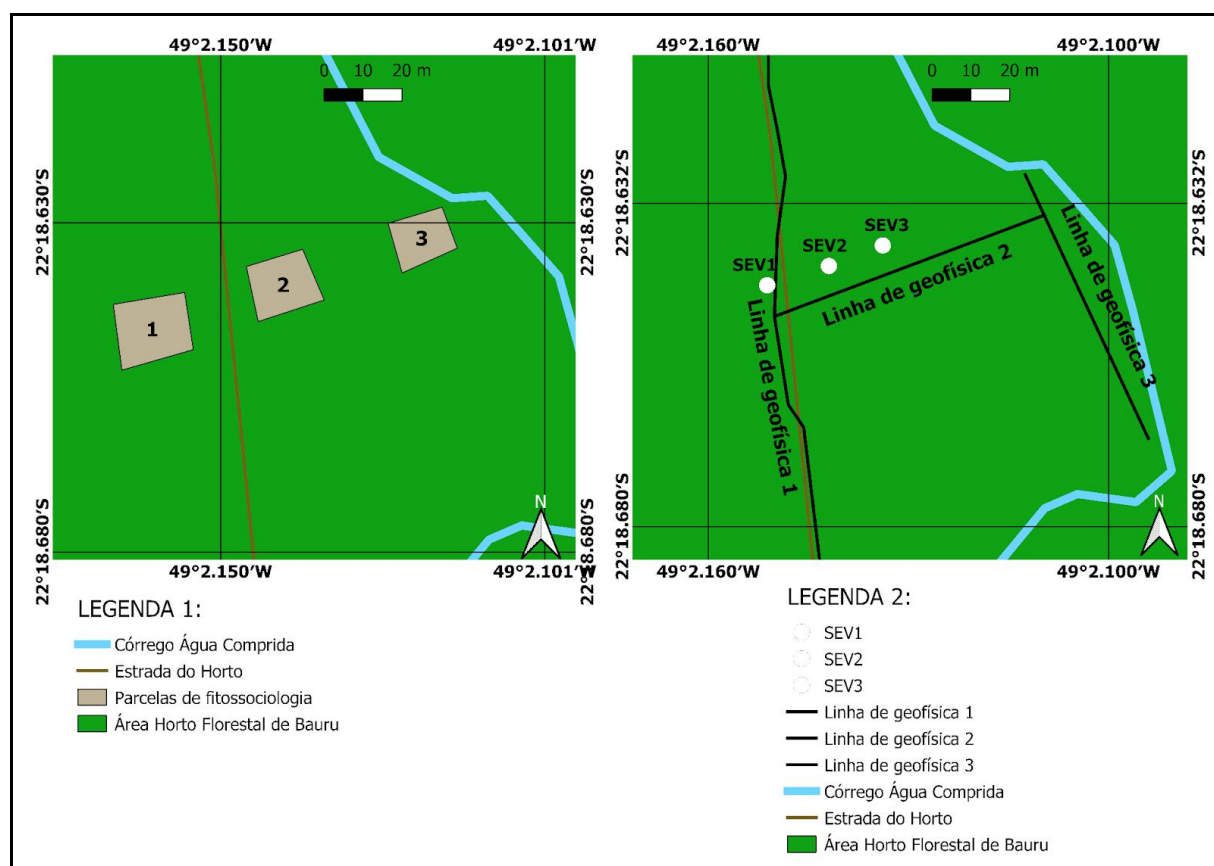
Na primeira etapa de avaliação dos critérios nas áreas, foram identificadas 21 espécies arbóreas nativas e seis exóticas na área 1; e 10 espécies nativas e três exóticas na área 2. Na área 1, dentre as espécies encontradas, 14 foram utilizadas em estudos de fitorremediação de solos e água, em comparação com a área 2, que apresentou apenas oito espécies. As características do solo são similares, com textura arenosa. Os níveis de água do aquífero freático foram semelhantes em ambos locais, com variação entre 0,5 e 0,8 m no banco de areia (S2 e S4) e 2,0 e 2,3 m no interior da floresta (S1 e S3). O ambiente hidroquímico no interior da floresta da área 1 (S1) é ácido, moderadamente oxigenado e oxidante (ORP positivo), enquanto na margem do rio (S2 e S4) e no interior da floresta da área 2 (S3), hidroquímica é distinta, com pH próximo do neutro, baixa oxigenação e ambiente redutor (ORP negativo), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo entre duas áreas em relação aos critérios selecionados

Critérios	Área 1		Área 2	
Critério i	21 espécies nativas e 6 espécies exóticas		10 espécies nativas e 3 espécies exóticas	
Critério ii	14 espécies empregadas em estudos de fitorremediação		8 espécies empregadas em estudos de fitorremediação	
Critério iii	Areia fina-média e argila arenosa em profundidade		Areia fina-média e argila arenosa em profundidade	
Critério iv	S1	S2	S3	S4
	Nível d'água: 2,0 m	Nível d'água: 0,8 m	Nível d'água: 2,3 m	Nível d'água: 0,5 m
Critério v	pH = 4,74 (ácido), OD = 1,18 mg/L, ORP > 0	pH = 6,78 (neutro), OD = 0,85 mg/L, ORP < 0	pH = 6,81 (neutro), OD = 0,6 mg/L, ORP < 0	pH = 6,38 (ácido), OD = 0,6 mg/L, ORP < 0

Com base nesses resultados, a área 1 foi selecionada para a segunda etapa de aplicação dos critérios, devido à maior biodiversidade e predomínio de espécies com potencial em fitorremediação, solo arenoso e com baixa profundidade, nível d'água raso e ambiente hidroquímico distinto entre os pontos de montante (floresta) e jusante (córrego Água Comprida), viabilizando processos de oxirredução e transformações geoquímicas. Após definir a área 1 como macroárea, foram delimitadas três parcelas para refinamento dos critérios e seleção de uma área menor (Figura 3).

Figura 3 - Localização das novas parcelas para reavaliação dos critérios



O estudo fitossociológico permitiu avaliar a botânica ao nível florestal (arbórea, arbustiva e herbácea) baseada em índices como diversidade, dominância, equitabilidade e similaridade. A parcela 2 apresenta maior diversidade de espécie entre as parcelas avaliadas, baseada nos índices de diversidade biológica: riqueza (9 espécies), abundância (14 indivíduos), Índice de Shannon (2,045 nats/ind.), Equitabilidade (0,93), baixa dominância de espécies (0,15) e estrato arbustivo rico (8 espécies) e abundante (11 indivíduos), apesar da ausência de espécies herbáceas (Tabela 2). A similaridade entre as parcelas 1 e 2 é baixa, representando diferença na composição florestal. A parcela 3 não foi comparada com as parcelas 1 e 2, devido à ausência de espécies arbóreas, uma vez que a parcela é dominada por espécies de gramíneas (*Panicum maximum*) e mamona (*Ricinus communis*). As espécies *Schefflera morototoni*, *Machaerium stipitatum*, *Nectandra megapotamica*, *Syzygium cumini* e *Schizolobium parahyba* identificadas nas parcelas 1 e 2 são comuns na região, baseada na lista de Espécies Nativas Regionais para Introdução na Arborização Urbana de Bauru (BAURU, 2019).

A textura do solo nas três parcelas é predominantemente arenosa (> 60%) com aumento no teor de areia em direção ao córrego. O solo apresenta características físicas de solos derivados de intemperismo do arenito (Pinheiro et al., 2009). Os solos são naturalmente ácidos (pH < 5), comportamento comum em solos subtropicais da região de São Paulo (Rath et al., 2019) e na região de Bauru (Carboni et al., 2020), no entanto, o pH do solo do banco de areia é neutro (pH 7,0) devido à influência do córrego. A matéria orgânica do solo nas três parcelas apresentam valores moderados na superfície e baixo em profundidade, em média a matéria orgânica é rica próximo ao córrego, devido aporte de matéria orgânica presente no efluente. O comportamento das raízes é semelhante, com predomínio na superfície e redução em profundidade, em consequência do teor de alumínio elevado no solo, superior a 50% nas parcelas 1 e 2, o que é compatível com observações

de outros estudos da caracterização edáfica no Jardim Botânico de Bauru (Pinheiro et al., 2009). Na parcela 3 a saturação por alumínio é baixa devido o pH neutro e ausência de alumínio no solo. A tomografia elétrica de resistividade estimou, para cada parcela, três camadas de resistividade distinta, com redução da eletroresistividade em profundidade indicando nível d'água.

O nível d'água estimado pela Sondagem Elétrica Vertical (SEV) na parcela 1 foi superior ao medido com a trena no furo da sondagem. A SEV realizada ao longo da estrada estima nível de 7,5 m, no entanto, cabe ressaltar que a estrada sofre efeito da compactação do solo devido à circulação de automóveis, reduzindo a taxa de recarga e o nível d'água. O nível d'água medido com a trena no furo da sondagem na parcela 1 foi realizado próximo à floresta, acima da estrada, sem efeito de compactação, e o nível foi de 3,5 m. Nas parcelas 2 e 3, os níveis d'água estimados pela SEVs foram próximos dos valores medidos com a trena (2,10 e 1,70 m, respectivamente). O ambiente hidroquímico da água subterrânea é semelhante para as parcelas 1 e 2, com caráter ácido, fruto da característica química da água da chuva e da contribuição na respiração de raízes, que transmitem gás carbônico para o ambiente. A hidroquímica da parcela 3 é oposta a 1 e 2. A água tem pH neutro, ausência de oxigênio e ambiente redutor, devido ao efeito direto do córrego, que eleva o pH com a mistura de águas superficiais (drenagem urbana e lançamento de esgoto) e à ausência de oxigênio, que afeta o potencial de oxirredução.

Tabela 2 - Comparativo entre três parcelas em relação aos critérios selecionados

Critérios	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3
Critério i	Arbórea: Riqueza (esp.): 5; Abundância (ind.): 18; Shannoh: 1,271 (nats/ind); Dominância 0,41 e Equitabilidade 0,71 Herbácea: Zero Arbustiva: Riqueza (esp.): 3; Abundância (ind.): 13	Arbórea: Riqueza (esp.): 9; Abundância (ind.): 14; Shannoh: 2,045 (nats/ind); Dominância 0,15 e Equitabilidade 0,93 Herbácea: Zero Arbustiva: Riqueza (esp.): 8; Abundância (ind.): 11	Arbórea: Zero Herbácea: Riqueza (esp.): 1; Abundância (ind.): não contabilizado Arbustiva: Riqueza (esp.): 1; Abundância (ind.): 4
Critério iii	Status nutricional: pH 4,87 (água); Matéria orgânica (mg.kg ⁻¹): 9,4; Nitrogênio total (mg.kg ⁻¹) 636; m(%): 78 Densidade de raízes: alta densidade até 0,4 m e moderada até 1,0 m Textura: 30% argila; 9% silte e 61% areia; Tomografia elétrica: três camadas de resistividade com maior resistividade na superfície (370 a 50 Ω.m) reduzindo até última (< 15 Ω.m)	Status nutricional: pH 4,76 (água); Matéria orgânica (mg.kg ⁻¹): 7,9; Nitrogênio total (mg.kg ⁻¹): 651; m(%): 55 Densidade de raízes: alta densidade até 0,50 m e moderada até 1,10 m Textura: 15% argila; 2% silte e 83% areia; Tomografia elétrica: três camadas de resistividade com maior resistividade na superfície (4300 a 200 Ω.m) reduzindo até última (< 100 Ω.m)	Status nutricional: pH 7,13 (água); Matéria orgânica (mg.kg ⁻¹): 13,5; Nitrogênio total (mg.kg ⁻¹) 450; m(%): 0 Densidade de raízes: alta densidade até 0,50 cm e baixa até 1,0 m Textura: 4% argila; 2% silte e 94% areia; Tomografia elétrica: três camadas de resistividade com maior resistividade na superfície (700 a 200 Ω.m) reduzindo até última (< 60 Ω.m)
Critério iv	Sondagem a trado: 4 m Sondagem elétrica vertical (SEV): 7 m	Sondagem a trado: 2,0 m Sondagem elétrica vertical (SEV): 3,8 m	Sondagem a trado: 1,70 m Sondagem elétrica vertical (SEV): 2,0 m
Critério v	Ambiente: Ácido, Oxigênio dissolvido (5,27 mg/L) e Potencial Oxirredução oxidante	Ambiente: Ácido, Oxigênio dissolvido (6,0 mg/L) e Potencial Oxirredução oxidante	Ambiente: Neutro, sem oxigênio (0,0 mg/L) e Potencial Oxirredução redutor

Com base nos critérios utilizados, a parcela 2 da área 1 foi selecionada para o experimento integrando FM & FR. A área é a mais biodiversa e abundante em estrato florestal considerando espécies arbóreas e arbustivas nativas da região com 9 espécies arbóreas e 8 espécies arbustivas. O solo é arenoso com mais de 80 % de areia, facilitando a migração e infiltração da água no perfil do solo. Além disso, o solo tem modera nutrição com média de $7,9 \text{ mg.kg}^{-1}$ de matéria orgânica e 651 mg.kg^{-1} de nitrogênio total, fruto do ciclo biogeoquímico, permitindo crescimento das espécies frente a contaminação por esgoto pré-tratado. A densidade de raízes diminui em profundidade, no entanto foram encontradas raízes finas a 2,0 m. A redução no desenvolvimento das raízes é fruto da toxicidade pela saturação de alumínio com valor superior a 50 %, assim, correções de bases podem ser realizadas com cal ou gesso para reduzir o teor de alumínio e melhorar o desenvolvimento de raízes. O nível do aquífero freático é raso com valor de 2,0 m, permitindo redistribuição hidráulica ocasionada por raízes, com potencial de elevar a umidade para zonas secas e superficiais. O aquífero raso facilita a migração da água entre o sistema rio-aquífero durante o bombeamento de poços da Filtração em Margem (FM). A hidroquímica é ácida e oxidante, permitindo processos oxidação da matéria orgânica e inorgânica, como nutrientes (espécies de nitrogênio e fósforo) durante a migração da água entre o rio e o poço de FM.

Os cinco critérios orientativos para seleção de área são específicos para SbN com foco em recuperar solos e águas subterrâneas rasas, como o sistema FM & FR. No entanto, é possível acoplar e utilizar os cinco critérios a outros fatores específicos de SbNs que respondem a outros objetivos, como a regulação térmica (ilhas de calor), redução de inundação, favorecimento da recarga de aquífero e minimização da erosão do solo e deslizamento de terra.

O critério de biodiversidade orienta a escolha do local rico em espécies para a fitorremediação. Ambos os métodos (transecto e fitossociologia) permitem conhecer a botânica local, saúde das plantas e estrutura florestal em níveis distintos. No entanto, a avaliação de espécies florestais depende de áreas verdes disponíveis e da gestão municipal. Assim, em determinados casos, na ausência de locais verdes, o critério pode ser complementado por plantio e/ou reflorestamento guiado por espécies de arborização urbana, ou do sub-bioma local.

O critério de espécies nativas com potencial de fitorremediação deverá ser avaliado posteriormente à identificação de espécies (critério i), com objetivo de buscar diretamente a espécie ou família identificada. Na situação de plantio/reflorestamento, deve-se utilizar espécies nativas do local ou sub-bioma com potencial de fitorremediar. Um fator limitante deste critério é a exigência de tempo e conhecimento prévio para avaliação de pesquisas científicas relacionadas à fitorremediação.

O critério de condições edáficas é uma importante ferramenta para avaliar ambas SbN (Filtração em Margem e Fitorremediação). As propriedades de nutrição do solo permitem orientar em correção ou adubação para melhorar a eficiência da fitorremediação, caso necessário, enquanto as propriedades físicas auxiliam na estimativa e modelagem da infiltração no solo e recarga de aquífero.

O critério de hidrogeologia não é recorrente em estudos de fitorremediação. No entanto, o efeito da elevação hidráulica da água subterrânea no suprimento de água para as espécies vegetais é um fenômeno comum ocasionado pela pressão osmótica das raízes. Logo, avaliar as camadas litológicas e nível d'água de aquíferos é uma importante ferramenta para alocação de poços de Filtração em Margem, visando a sua máxima eficiência; assim como para o planejamento eficiente de rede de monitoramento da água subterrânea.

O critério de hidroquímica é um parâmetro fundamental para monitorar processos de regeneração natural e transformações geoquímicas da água no aquífero. Considerar a hidroquímica como parâmetro de investigação da qualidade da água permite conhecer os nutrientes existentes, absorvidos e utilizados no crescimento das espécies vegetais. Além disso, a hidroquímica permite observar a melhoria da qualidade da água durante o bombeamento de água em poços de filtração em margem, assim como por meio da fitorremediação.

CONCLUSÕES

Os critérios definidos são suficientes para seleção de área para implementação de Soluções baseadas na Natureza (SbN) com foco na melhoria da qualidade de águas subterrâneas. Análises realizadas com base nos critérios levantados permitiram ampla avaliação da botânica, pedologia, geologia e caracterização das águas subterrâneas do local selecionado para instalação do sistema FM & FR. Destaca-se que a consolidação de tais critérios apresenta potencial para orientar futuras avaliações de SbN para melhoria da qualidade das águas subterrâneas, que possuem uma demanda relevante, frente às degradações crescentes dos aquíferos e às pressões sobre o território e o ambiente.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. C. D., & MAGALHÃES, K. C. (2022). “*Parque Natural da Mata: o projeto da paisagem para a cidade de Bauru-SP*”. Revista VérticeFIB, 2.
- ALVES, A., GERSONIUS, B., SANCHEZ, A., VOJINOVIC, Z., & KAPELAN, Z. (2018). “*Multi-criteria approach for selection of green and grey infrastructure to reduce flood risk and increase CO-benefits*”. Water Resources Management, 32(7), pp. 2505-2522.
- BAURU (2019). Espécies nativas regionais para introdução na arborização urbana. Prefeitura de Bauru [org.], Secretaria de Meio Ambiente de Bauru e Jardim Botânico de Bauru. Disponível em: <https://www2.bauru.sp.gov.br/semma/servicos/arborizacao_urbana/novas_especies.aspx>. Acesso em 8 de mai. de 2023.
- BOLAN, N. S., PARK, J. H., ROBINSON, B., NAIDU, R., & HUH, K. Y. (2011). “*Phytostabilization: a green approach to contaminant containment*”. Advances in agronomy, 112, pp. 145-204.
- CARBONI, M., AGUIRRE, A. G., & GANDOLFI, S. (2020). “+ *The phenology of species in a swamp forest in Bauru, SP*”. Brazilian Journal of Development, 6(10), pp. 81560-81576.
- CRUCIOL-BARBOSA, M., FONTES, M. S. G. D. C., & AZAMBUJA, M. D. A. (2023). “*Experimental Assessment of the Thermal Influence of a Continuous Living Wall in a Subtropical Climate in Brazil*”. Sustainability, 15(4), pp. 2985.
- COVATTI, G., & GRISCHEK, T. (2021). “*Sources and behavior of ammonium during riverbank filtration*”. Water Research, 191, pp. 116788.
- DABA, M. H., & YOU, S. (2022). “*Quantitatively assessing the future land-use/land-cover changes and their driving factors in the upper stream of the Awash River based on the CA-markov model and their implications for water resources management*”. Sustainability, 14(3), pp. 1538.
- DEBELE, S. E., KUMAR, P., SAHANI, J., MARTI-CARDONA, B., MICKOVSKI, S. B., LEO, L. S., ... & DI SABATINO, S. (2019). “*Nature-based solutions for hydro-meteorological hazards: Revised concepts, classification schemes and databases*”. Environmental Research, 179, pp. 108799.
- EPA – Environmental Protection Agency. (2000). “*Introduction to phytoremediation*”. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio.

MARQUES, C. H., TERADA, R., GALVÃO, P. H. F., & HIRATA, R. (2019). “*Evolução espacial e temporal da contaminação por nitrato no aquífero urbano de Urânia (SP)*”. *Águas subterrâneas* 33(3), pp. 258-269.

MAJIDI, A. N., VOJINOVIC, Z., ALVES, A., WEESAKUL, S., SANCHEZ, A., BOOGAARD, F., & KLUCK, J. (2019). “*Planning nature-based solutions for urban flood reduction and thermal comfort enhancement*”. *Sustainability*, 11(22), pp. 6361.

OVANDO, P., & BROUWER, R. (2019). “*A review of economic approaches modeling the complex interactions between forest management and watershed services*”. *Forest Policy and Economics*, 100, pp. 164-176.

PAN, W., HUANG, Q., & HUANG, G. (2018). “*Nitrogen and organics removal during riverbank filtration along a reclaimed water restored river in Beijing, China*”. *Water*, 10(4), pp. 491.

PIRES, F. R., et al. (2003). “*Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas*”. *Planta daninha*, 21, pp. 335-341.

RAO, Y. S., VIJAY, T., PRASAD, Y. S., & SINGH, S. (2020). “*Development of River Bank Filtration (RBF) well in saline coastal aquifer*”. *Journal of Water Process Engineering*, 37, PP. 101478.

VARNIER, C., GUERRA, S. P., & HIRATA, R. (2009). “*Metodologia de avaliação dos padrões de ocupação urbana e contaminação por nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, centro-oeste do estado de São Paulo*”. *Águas subterrâneas*:(São Paulo), pp. 1-8.

WANG, L., JI, B., HU, Y., LIU, R., & SUN, W. (2017). “*A review on in situ phytoremediation of mine tailings*”. *Chemosphere*, 184, pp. 594-600.

WANI, R. A., GANAI, B. A., SHAH, M. A., & UQAB, B. J. J. B. B. (2017). “*Heavy metal uptake potential of aquatic plants through phytoremediation technique-a review*”. *J Bioremediat Biodegrad*, 8(404), pp. 2.

WEI, Z., VAN LEE, Q., PENG, W., YANG, Y., YANG, H., GU, H., ... & SONNE, C. (2021). A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. *Journal of hazardous materials*, 403, 123658.

YIN, C., XIONG, Z., CHEN, H., WANG, J., COOPER, D., & DAVID, B. (2015). “*A literature survey on smart cities*”. *Sci. China Inf. Sci.*, 58(10), pp. 1-18.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo auxílio ao projeto SACRE - Soluções Integradas de Águas para Cidades Resilientes (Processo 2020/15434-0) e a bolsa de doutorado direto (Processo 2022/02220-7). Ao CNPq pelo auxílio (Processo 423950/2021-5) e ao Horto Florestal de Bauru pela parceria e disponibilização do espaço para o desenvolvimento da pesquisa científica.