



Análise qualitativa de soluções vegetativas em projetos de requalificação fluvial com o suporte SIG

Julia Roizemberg Bahiana^a, Maria Vitória Ribeiro Gomes^b, Virgínia Maria Nogueira de Vasconcellos^c, Aline Pires Veról^d

Programa de Pós Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^a E-mail: julia.bahiana@fau.ufrj.br

^b E-mail: maria.gomes@fau.ufrj.br

^c E-mail: virginia.vasconcellos@fau.ufrj.br

^d E-mail: alineverol@fau.ufrj.br

Submetido em 8 de março de 2023. Aceito em 30 de março de 2023.

<https://doi.org/10.47235/rmu.v11i1.298>

Resumo. A restauração da vegetação é considerada importante ação estrutural capaz de equilibrar as necessidades humanas e a dinâmica natural de corpos hídricos afetados pelo crescimento urbano desordenado. Tendo em vista que praticamente todos os rios já sofreram algum impacto ambiental, destaca-se não somente a importância de projetos de requalificação em rios urbanos degradados, como a necessidade de monitoramento temporal das soluções implementadas. Portanto, a pesquisa tem o objetivo de explorar o uso dos Sistemas de Informação Geográfica em um projeto de requalificação fluvial brasileiro (Projeto Pró-Tijuco, em São Paulo), de modo a investigar o sucesso da implantação do projeto paisagístico e demonstrar as possibilidades de uso da ferramenta. A metodologia de análise conta com o sensoriamento remoto sobre imagens satélite Planet, no software de geoprocessamento ArcGIS. A densidade vegetativa foi mapeada por método de classificação supervisionada e, em seguida, aplicou-se o índice NDVI. Os resultados permitiram constatar o espraiamento da vegetação associado à requalificação fluvial, bem como uma expressiva evolução da vegetação dentro do recorte temporal avaliado. Por fim, os mapeamentos exploram a importância da vegetação em projetos de requalificação fluvial, visto sua capacidade de impactar positivamente no monitoramento da qualidade do entorno urbano.

Palavras-chave. requalificação fluvial, densidade vegetativa, sensoriamento remoto, NDVI

Introdução

O processo de crescimento populacional das cidades, desacompanhado de planejamento integrado adequado, levou a significativas transformações no ambiente natural, representando desafios para os tomadores de decisão política. No que concerne aos rios urbanos, praticamente todos já sofreram algum impacto ambiental proveniente da antropização, repercutindo diretamente no ambiente construído e nas atividades econômicas que se desenvolvem em seu

entorno. Nesse sentido, a diminuição das áreas vegetadas, sobretudo na cabeceira dos rios, diminui sua vazão de base e pode também impactar na qualidade da água, que, por sua vez, também pode ser afetada por assentamentos irregulares às margens dos rios e pela falta de saneamento básico em algumas regiões. É nesse contexto que a requalificação fluvial, conceito-chave desta pesquisa, surge como uma alternativa para equilibrar as necessidades humanas e a dinâmica natural da água nas áreas urbanas, enfrentando o risco de inundações por meio de soluções mais

integradas e sustentáveis (Veról et al., 2020). As ações de requalificação fluvial podem ser divididas em dois grupos: as estruturais e as não estruturais. No primeiro grupo, destacam-se a remoção de elementos de risco, a restauração da vegetação, a melhora da qualidade da água, e a busca pela morfologia mais natural dos rios. Por sua vez, as ações não estruturais tratam do desenvolvimento da consciência e do valor dos corpos hídricos, da educação ambiental participativa, pré e posterior à divulgação de dados de monitoramento e informação, dentre outros (Veról et al., 2018).

Palmer et al., (2005) ressaltam o potencial de aprendizagem de um projeto ao discutir o que constitui um processo bem-sucedido de requalificação fluvial. Uma primeira etapa para a contribuição neste aprendizado é que as entidades reguladoras e de financiamento que promovem, permitem e financiam a requalificação de rios criem e mantenham bancos de dados para registrar onde e como ela é realizada. Destaca-se que projetos bem documentados, mesmo que aquém dos objetivos iniciais, podem contribuir mais do que projetos que cumpram as previsões. Além disso, Palmer et al., (2005) ainda ratificam o papel da vegetação como importante ação estrutural de requalificação fluvial, ressaltando seu potencial na melhoria de múltiplos aspectos relacionados à qualidade de vida urbana. Assim, destaca-se não somente a importância da execução de projetos de requalificação fluvial em rios urbanos degradados, como a necessidade de monitoramento temporal das soluções implementadas, incluindo a análise da qualidade das soluções vegetativas.

Dada esta contextualização, duas questões são introduzidas a fim de desenvolver este trabalho: a primeira se refere à qualidade ambiental proveniente dos serviços ecológicos na manutenção vegetativa, seja ciliar ou não; e a segunda diz respeito à importância da disponibilidade de dados na avaliação e no monitoramento pós-projeto de recuperação ambiental, em especial de rios. Segundo Ribeiro et al. (2019), produções científicas orientadas para os estudos ecológicos que “necessitam de dados ambientais precisos e atualizados, tais como a caracterização da vegetação nativa, (...)”, são viabilizadas pela disponibilidade de dados de

Sensoriamento Remoto. Sensores remotos, como satélites, têm aplicações para quase todas as indústrias, atividades e preocupações humanas, além de auxiliarem na tomada de decisão e serem utilizados, especialmente, para investigar impactos ambientais. O método de sensoriamento remoto vem sendo aplicado para o monitoramento de coberturas vegetais, queimadas e dinâmicas de alterações da paisagem, permitindo que se estabeleçam ações prioritárias para a conservação da biodiversidade e seu desenvolvimento sustentável (Ribeiro et al., 2019).

O atual interesse transdisciplinar pela requalificação de rios urbanos degradados está intimamente relacionado à compreensão dos aspectos ecológicos e é influenciado pela discussão sobre desenvolvimento sustentável. Com isso, os avanços na disponibilidade e no acesso aos dados relativos à cobertura do solo por sensoriamento remoto se tornam indispensáveis nas pesquisas relacionadas a estes processos ecológicos e padrões espaciais. Para tanto, a presente pesquisa tem o objetivo de explorar o uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) em um projeto de requalificação fluvial brasileiro, de modo a investigar o sucesso do projeto e demonstrar as possibilidades de uso da ferramenta. A pesquisa analisa o Projeto Pró-Tijuco, elaborado em 2003, que se utilizou de medidas estruturais e não-estruturais para recuperar a qualidade ambiental do Córrego do Tijuco Preto, localizado no Município de São Carlos, São Paulo.

Fundamentação teórica

A vegetação é um componente fundamental para a melhoria da qualidade de vida. Além de desempenhar diversos benefícios voltados à amenidade e à biodiversidade, o uso da vegetação urbana também se apresenta como estratégia de conforto ambiental. Labaki et al. (2011) apontam que as árvores são responsáveis por atenuar o aquecimento de áreas urbanas, uma vez que são capazes de impedir que grande parte da radiação solar incidente atinja o solo ou as construções, além de propiciar o resfriamento e a atenuação das ilhas de calor por meio do sombreamento e da evapotranspiração. Além das funções de redução da temperatura e umidade do ar, Mascaró e Mascaró (2002) também comentam o papel da vegetação na ventilação,

responsável pelo resfriamento e renovação do ar; seu impacto na acústica, visto que a vegetação pode ser responsável por reduzir a contaminação de ruídos; e ainda, no controle da poluição atmosférica.

Os benefícios da vegetação também se fazem presentes por meio da criação de novos espaços livres, potencializando relações e significativas melhorias em aspectos de saúde. Kozak et al. (2020) destacam que a criação de espaços livres vegetados melhora as condições de equilíbrio no acesso de áreas recreativas de qualidade para todas as classes sociais, tratando-se de uma estratégia de inclusão social; enquanto Lähde, Khadka e Tahvonon (2019) comentam sobre a melhoria de saúde mental e física, visto que espaços reservados para a realização de atividades físicas ao ar livre também aumentam as oportunidades de interação social.

Ao reconhecer o papel da vegetação como elemento capaz de proporcionar uma série de benefícios às regiões urbanizadas, é importante também considerar os impactos causados em consequência de sua remoção nas bacias hidrográficas. Pode-se afirmar que o processo de eliminação da cobertura vegetal e a consequente impermeabilização dos solos são capazes de reduzir as oportunidades de infiltração, resultando no aumento do pico de escoamento e na perda de ecossistemas fluviais (Veról et al., 2020). Perini e Sabbion (2017) destacam que, principalmente as práticas de engenharia convencional nas bacias, como mecanismos de controle de enchentes, comprometem o estabelecimento da vegetação ripária, implicando em uma redução significativa dos habitats locais.

A presença da vegetação ao longo das margens, além de contribuir para a condição de equilíbrio das águas, protegendo o solo contra a lixiviação e a erosão (Gorski, 2008), também é capaz de aliviar os sistemas de drenagem, uma vez que o aumento da permeabilidade dos solos oferece novas oportunidades de infiltração durante a ocorrência de chuvas (Herzog, 2010). Gorski (2008) comenta que o coeficiente de escoamento superficial em regiões com maiores áreas impermeabilizadas pode variar de 90 a 95%; enquanto que em áreas vegetadas com matas de árvores de folhagem permanente, o coeficiente pode variar entre 5

e 50%. Dessa maneira, destaca-se a possibilidade de integração entre os cursos d'água, os sistemas de drenagem e os sistemas de espaços livres, de modo a se tornarem aliados no armazenamento e na infiltração de volumes de cheias, além de promoverem a conectividade de áreas fragmentadas (Battemarco et al., 2018). Por conta dessa integração, estes espaços constituintes do sistema na paisagem local podem ser denominados, então, de multifuncionais.

Em decorrência da impermeabilização e do processo desordenado de ocupação urbana, tornam-se cada vez mais recorrentes os transtornos causados por chuvas intensas, ameaçando a saúde e a qualidade de vida da população, além da grave perda de biodiversidade. As medidas de requalificação de rios urbanos surgem como uma alternativa de equilibrar as necessidades humanas e a dinâmica natural dos corpos hídricos, enfrentando o risco de inundações por meio de soluções mais integradas e, conseqüentemente, sustentáveis (Silva et al., 2020).

Nesse contexto, Veról et al. (2018) realizam uma pesquisa direcionada aos diferentes termos de caracterização de projetos voltados para rios degradados, observando que a atenção à melhoria dos cursos d'água produziu uma série de neologismos que, quando comparados, podem possuir pontos em comum, tornando-se sinônimos; ou se confundir em seus significados. Dessa maneira, os autores apresentam diversos conceitos, como: restauração/renaturalização, definidos como as ações que objetivam o retorno ao estado original de rio, como o restabelecimento dos níveis naturais da qualidade da água e o restabelecimento da mata ciliar, por exemplo; a requalificação fluvial, definida como o conjunto de ações que permitem que os corpos hídricos e seu território voltem a um estado mais natural, considerando o valor ambiental e objetivos socioeconômicos; a reabilitação, que implica em ações que objetivem atingir um aspecto similar ao anterior à degradação; a revitalização, que busca valorizar os espaços livres, sem necessariamente englobar melhorias ambientais para os rios; além de outros conceitos como preservação, prevenção, adequação, criação, melhoria, mitigação e remediação.

Os conceitos aqui apresentados têm por fundamento o trabalho realizado por Veról et al. (2018). Com foco no conceito de requalificação fluvial como estratégia presente no caso de estudo a ser apresentado, tem-se como finalidade principal a avaliação temporal da paisagem e, principalmente, da qualidade vegetativa implantada, por meio de sensoriamento remoto. A técnica de obtenção de imagens da superfície terrestre por meio de sensores localizados em satélites vem sendo aplicada para o monitoramento de coberturas vegetais, queimadas e dinâmicas de alterações da paisagem, permitindo que se estabeleçam ações prioritárias para a conservação da biodiversidade e seu desenvolvimento sustentável (Ribeiro et al., 2019).

Imagens de sensoriamento remoto são comumente utilizadas em conjunto com a tecnologia SIG para responder perguntas sobre o ambiente em que vivemos. O avanço da tecnologia e a riqueza da imagem de várias resoluções mudaram a forma como as análises geográficas são feitas (NICFI, 2021). O processo de integração entre as imagens de fotografias aéreas e o sensoriamento remoto no SIG é direto; elas podem ser digitalizadas ou obtidas por meio de fornecedoras de imagens de satélite, públicas ou privadas. As imagens são, então, usadas como fonte de obtenção de características vetoriais georreferenciadas; e sua obtenção se dá a partir da reflexão da radiação solar de um objeto na superfície, tendo sua energia captada de acordo com o comprimento e a frequência de ondas. Assim, objetos claros refletem maior quantidade de energia quando comparados a objetos escuros.

No estudo da vegetação, Abreu e Coutinho (2014) explicam que as principais faixas adotadas são a região do vermelho (V) e do infravermelho próximo (IVP), em que o comportamento de V se caracteriza pela absorção de energia, gerando imagens mais escuras; enquanto que o IVP apresenta comportamento oposto, refletindo a energia, e logo, gerando imagens mais claras. O contraste entre ambas as imagens pode ser explorado de modo a indicar comportamentos distintos entre solo exposto (referente à absorção) e vegetação (referente à refletância), através do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI). A utilização de imagens NDVI permite realizar

análises espaciais multitemporais da vegetação, avaliando parâmetros estruturais, fenológicos ou biofísicos (Ferreira, Ferreira and Ferreira, 2008).

A geração de imagens de sensoriamento remoto leva em consideração o nível de detalhe, ou resolução espacial, que se deseja obter do objeto. A imagem obtida pelo satélite PlanetScope Mosaicos de Reflexo de Superfície, escolhido para o estudo de caso deste trabalho, oferece conteúdo gratuito de alta resolução multiespectral de 4,77 metros por pixel, registrando informação ótica de vegetação, solo, água e zonas costeiras com cadência de seis meses (NICFI, 2021). Trata-se de um conjunto de mosaicos com dados precisos sobre as regiões tropicais globais fornecida pelo Programa de imagens da iniciativa internacional de clima e florestas da Noruega (*Norway's international climate and forests initiative imagery program*, NICFI). As imagens satélite multiespectrais apoiam o monitoramento de mudanças climáticas e terrestres, sendo cada vez mais utilizadas no monitoramento do solo, na silvicultura, na gestão de emergências e na segurança (Lira et al., 2016; Li et al., 2020). Nesse trabalho, tendo em vista as múltiplas funções associadas às ferramentas de sensoriamento remoto, estas serão utilizadas no contexto da requalificação fluvial, de modo a exemplificar seu uso no campo da arquitetura e do planejamento urbano.

Estudo de caso: o Projeto Pró-Tijucu, São Carlos (SP)

O Projeto Pró-Tijucu, ou Projeto de Recuperação Ambiental das Várzeas do Alto Tijucu Preto, desenvolvido para subsidiar o Plano Diretor do Município de São Carlos (SP), foi elaborado pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS) da Universidade de São Paulo, contando com uma equipe multidisciplinar coordenada pelo Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas (NIBH) (Peres e Mendiondo, 2004). Apesar de dividida em 5 sub-bacias (eco-regiões) com área de 231 ha e extensão de 2.126 m, o Projeto abrange apenas a área a montante bacia hidrográfica (Peres e Mendiondo, 2004). Nesse sentido, a escolha foi justificada pelo crescente processo de degradação ambiental das nascentes, que enfrentavam desafios como a poluição, assoreamento, supressão de

vegetação nativa, ocupações irregulares, risco de inundações, entre outros (Peres e Mendiondo, 2004).

O projeto foi apresentado durante os anos de 2004 e 2005 pela Prefeitura Municipal de São Carlos e tinha como objetivo a recuperação do Córrego do Tijuco Preto, assim como da área de várzea e da bacia de drenagem ambientalmente degradada, por meio de medidas estruturais e não estruturais para o manejo integrado na escala da bacia

hidrográfica (Peres, Mendiondo and Porto, 2005). A Figura 1 apresenta, respectivamente, (a) a localização do Estado de São Paulo no mapa do Brasil; (b) a localização do Município de São Carlos no Estado de São Paulo; (c) a localização da Bacia Hidrográfica do Córrego do Alto Tijuco Preto em relação ao município de São Carlos; (d) e o mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Tijuco Preto com destaque para o córrego e para a delimitação de suas cinco sub-bacias.

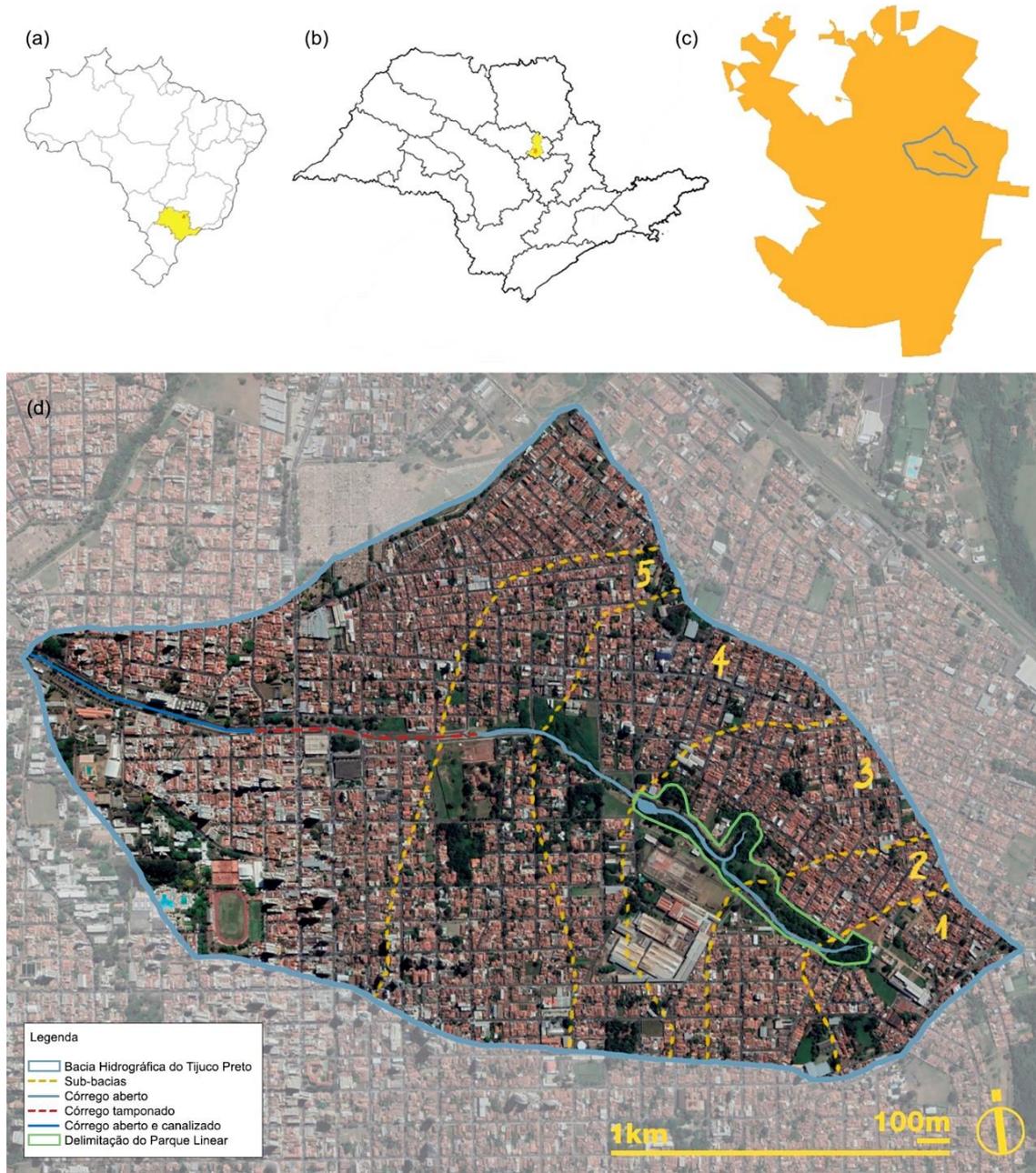


Figura 1. Mapas de localização (fonte: elaborada pelas autoras com base em imagens satélite fornecidas pela ferramenta Google Earth e dados de hidrografia por Peres, Mendiondo e Porto, 2005).

As propostas para a recuperação ambiental da bacia consideravam a minimização dos impactos da ocupação urbana, a criação de espaços de lazer, a reestruturação da vegetação ao longo do rio, bem como outros aspectos (Peres, Mendiando and Porto, 2005). Para tal, foram elaboradas diretrizes para seis diferentes subsistemas, sendo eles: ocupação urbana, vegetação, sistema aquático, drenagem pluvial, legislação e educação ambiental. Tendo em vista o objetivo do presente estudo, destaca-se que as diretrizes voltadas para vegetação apontavam para a valorização do potencial da revegetação, propondo o plantio de espécies nativas para restabelecer aspectos ecológicos; criação de maior proximidade com o aspecto natural da paisagem; e a oportunidade de interação durante atividades de lazer por meio de um Parque Linear. Evidencia-se o caráter multifuncional da proposta, que optou pelo uso de vegetação não somente para a amenidade de espaços públicos, como

também para recuperação ambiental, mitigação de alagamentos, controle do escoamento, melhora da qualidade das águas e restabelecimento de espécies.

Em termos de ocorrência de inundações, a região do Alto Tijuco Preto apresenta baixa probabilidade, uma vez que é responsável pelo armazenamento de águas pluviais que tendem a escoar para a bacia principal do município (Figueirôa-ferreira, Augusto and Fernandes, 2021). No entanto, suas regiões a jusante, mais urbanizadas e com menor presença de vegetação, se tornam mais suscetíveis a estas ocorrências, uma vez que são notados trechos tamponados e canalizados do córrego. Tratando-se da região a montante, onde o córrego apresenta aspecto natural, a Figura 2 ilustra o projeto de Parque Linear idealizado para a região, bem como as propostas multifuncionais que empregam o uso de vegetação ciliar e arbórea.



Figura 2. Projeto de Parque Linear, onde é observado o plano de vegetação para a margem do córrego e a integração com usos públicos. Fonte: Peres, Mendiando e Porto (2005).

De modo a compor cenários prospectivos para o Projeto, a equipe utilizou como base a classificação do uso do solo de imagens dos anos de 1960, 1970 e 1998. Estes cenários se estendem em um horizonte de 15 anos a partir do ano de implementação do Parque Linear, sendo exemplificados como “cenários de intervenção com Plano Diretor” e “cenários tendenciais sem Plano Diretor” (Peres, Mendiando and Porto, 2005). Foram considerados três cenários de intervenção com Plano Diretor: um de curto prazo, correspondendo ao ano de implementação do projeto (Cenário A - 2005); um de médio

prazo, indicando a fase de implantação do segundo e demais trechos do parque (Cenário B - 2010); e um de longo prazo, considerando a consolidação das propostas (Cenário C - 2015) (Peres, Mendiando and Porto, 2005). Sabe-se que a primeira fase do projeto foi cumprida, o que incluía a implementação do Parque Linear do Tijuco Preto, juntamente com o destamponamento do córrego e a aplicação de medidas para recuperação de vegetação ciliar.

Uma busca por meio do portal de notícias da Prefeitura de São Carlos demonstrou o empenho de execução do projeto durante os

anos de 2005 a 2009 (*Portal de notícias São Carlos*, s.d.), onde se destacaram a realização de ações estruturais para a requalificação do córrego, seu destamponamento e a criação do Parque Linear, não havendo, contudo, um registro de continuidade do projeto ao longo dos anos. No entanto, apesar de sua implementação parcial, estudos recentes relatam uma série de adversidades voltadas à falta de manutenção, escassez de vegetação em trechos específicos e poluição no entorno das margens, o que gera a reivindicação por parte dos moradores. Sob a ótica da educação ambiental, Santi et al. (Santi et al., 2016) desenvolveram atividades com participantes locais, de modo a identificar suas percepções a respeito do descarte inadequado de resíduos sólidos na bacia. Os participantes, com idades de 11 a 25 anos, identificaram características como “muito mato, não dá para ver o rio”, “vegetação alta e flores”, “muita poluição”, entre outros. De modo geral, foram notados poucos comentários positivos acerca dos rios.

Anos depois, Baptista, Scarpinella e Menezes (Baptista, Scarpinella and Menezes, 2021) realizaram uma análise da evolução do processo de urbanização e ocupação na microbacia, bem como dos avanços, retrocessos ambientais e os novos desafios para a proteção do córrego Tijuco Preto. Em termos de vegetação, os autores indicam que a mata recuperada no entorno das nascentes pode ser caracterizada como mata rala, com árvores de 15 a 20 metros, que contemplam espécies como mamona (*Ricinus communis*), bananeira (*Musa spp.*) e um sub-bosque em regeneração. Além disso, apontam que a água continua límpida, mas com a presença de lixo no entorno das margens.

Ademais, Borchers et al. (Figueirôa-ferreira, Augusto and Fernandes, 2021) buscaram analisar os contrastes entre o trecho que compreende o Parque Linear e os demais

trechos tamponados e canalizados do córrego Tijuco Preto. Dentre as regiões analisadas, a Área de Proteção Permanente (APP) da nascente, próxima ao Parque Linear, foi indicada como área de maior densidade de vegetação e, conseqüentemente, de maior contribuição ambiental ao sistema, ao passo que o parque possui menor densidade quando comparado ao primeiro trecho. Nesse sentido, de acordo com os autores, conforme o córrego avança para as zonas a jusante, menor a incidência de vegetação encontrada. O trecho tamponado, bem como o trecho canalizado ao longo da bacia hidrográfica, possuem vegetação que varia de baixa a inexistente, composta por gramíneas, canteiros ou árvores ao longo do percurso. Além disso, complementam que, embora a APP seja a região de maior contribuição em termos ambientais em toda a bacia, as proximidades do córrego são utilizadas como ponto de despejo irregular de resíduos.

De modo a complementar os estudos progressos realizados *in loco*, a presente pesquisa busca realizar uma análise da restauração da vegetação após a requalificação fluvial, a partir da utilização de ferramentas de sensoriamento remoto. A análise tem como base a revisão teórica previamente apresentada sobre o Parque Linear Tijuco Preto e sobre os três cenários de intervenção planejados. Serão considerados apenas o Cenário C (2015), referente à situação final de implantação de projeto, além de sua “Situação Atual” (2020), referente à data do mapeamento dos dados. A decisão de análise dos anos 2015 e 2020 decorre, pois, de uma própria limitação das ferramentas digitais, apresentada na seção “Materiais e Métodos”. Um quadro resumo com a descrição de cada um dos cenários, bem como da “Situação Atual”, é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1. Quadro resumo dos cenários prospectivos e da situação atual do estudo de caso. (fonte: elaborado pelas autoras)

Cenários	Descrição
Cenário A (2005)	Implantação do primeiro trecho do parque. Fase de implantação das mudas de espécies florestais nativas, aumentando a cobertura vegetal. Interrupção do despejo de esgoto. Proteção das áreas de nascentes e margens do rio, implantação de mudas nativas e parques urbanos. Garantia de área verde destinada ao parque e criação de instrumentos de implementação de áreas verdes na bacia.
Cenário B (2010)	Implantação do segundo e demais trechos do parque. Extrato florestal de aproximadamente 3 metros de altura, predomínio de espécies pioneiras. Fim do despejo de entulhos, aumentando a cobertura vegetal, diminuindo os processos erosivos e o assoreamento do córrego. Em algumas áreas, o córrego assume seu antigo leito e tem a proteção das mudas plantadas. Florescimento de árvores no entorno de vias e ciclovias. Regulamentação de instrumentos e planejamento para as áreas verdes da bacia de maneira integrada.
Cenário C (2015)	Consolidação do parque Tijuco Preto. Mata com dossel aproximado de 6 metros de altura, 2 extratos florestais. Morte de algumas espécies pioneiras e desenvolvimento de espécies secundárias. Novas espécies de fauna introduzidas no sistema. Córrego protegido por vegetação densa. Restabelecimento florestal das margens, com recuperação das funções ecológicas da mata ciliar. Implementação de áreas verdes integradas na bacia, com vistas à drenagem urbana e lazer. Gestão, manutenção e arborização de vias públicas.
Cenário atual (2020)	Pista de caminhada e parque infantil como equipamentos urbanos. Densidade de vegetação menor quando comparado com a área de nascente. Ao final do parque, notam-se pontos de depósito irregular de resíduos nas proximidades do córrego.

Obs. Elaborado com base em Borchers et al. (2021) e Peres et al. (2005).

Materiais e Métodos

A fim de monitorar a qualidade vegetativa das propostas para o caso de estudo selecionado, em primeiro lugar foram obtidas informações técnicas e históricas da área em estudo; em seguida, foi feito o levantamento de dados para a obtenção de imagens da superfície terrestre por meio de sensores localizados em satélites, em conjunto com o mapeamento georreferenciado no Sistema de Informação Geográfica (SIG). O sensoriamento remoto, nesta análise da qualidade vegetativa, é processado no software ArcMap, componente do ArcGis 10. As ferramentas (ArcTools) utilizadas no software são: a combinação de bandas (com a Composite Bands); a equação normalizada, a fim de chegar a um índice para avaliar a vegetação (NDVI, com a Raster

Calculator); e a classificação supervisionada do uso do solo real e atual (com a Image Classification).

O critério de seleção do estudo de caso levou em consideração a investigação de um projeto de requalificação fluvial já implementado em território nacional, que apresentasse, em seu escopo, o emprego de vegetação como ação estrutural. Como base para a seleção, utilizou-se o artigo de Veról et al. (2018), que apresenta uma tabela com vinte e um projetos e planos de requalificação fluvial, sendo nove localizados no Brasil. Foi realizada uma pré-seleção dos projetos construídos que utilizaram a restauração da vegetação ribeirinha ou a recomposição da vegetação como estratégia projetual, de modo que os aspectos temporais pudessem ser posteriormente avaliados por meio de

sensoriamento remoto. Deste modo, a pré-seleção de opções de projetos passíveis de escolha foi reduzida para quatro possibilidades: Projeto Beira-Rio, Piracicaba (SP); Programa DRENURBS, Belo Horizonte (MG); Projeto Pró-Tijuco, São Carlos (SP); e Parque Ecológico de Indaiatuba, São Paulo (SP). A partir de um levantamento de dados, notou-se que o Projeto Pró-Tijuco apresentava material suficiente, em termos de vegetação, para a realização de análises comparativas em momentos distintos.

Considerando o projeto selecionado, iniciou-se a análise a partir da delimitação de sua área de abrangência, para o cenário de 2015, conforme informado no Relatório Técnico Final (Peres, Mendiondo and Porto, 2005). Foi, então, desenhado o polígono (shapefile) no *software* Google Earth, que, em seguida, foi extraído como arquivo em formato kml e convertido para o ArcMap com o sistema de coordenadas brasileiro SIRGAS2000. A imagem satélite, utilizada para o mapeamento do estudo de caso, foi obtida gratuitamente na página do Programa NICFI, empresa privada que fornece imagens satélite do trópico sul gratuitamente por tempo limitado. Como parte do monitoramento pós-projeto, a imagem satélite foi analisada por meio de duas combinações de bandas. A resolução espectral dos mosaicos Planet registra informação em 4 bandas espectrais com resolução de pixel 4,77 metros: Vermelho, Verde, Azul e Quase infravermelho. A resolução temporal data de dezembro de 2015 a agosto de 2020 (NICFI, 2021), definição limitadora para o recorte de análise. Kaplan e Avdan (2017) destrincharam as bandas carregadas pela imagem dos satélites Sentinel-2 com intuito de desenvolver uma metodologia que suportasse a avaliação de corpos d'água. Esta metodologia foi usada para avaliação do estudo de caso, com suporte das bandas equivalentes carregadas nos mosaicos da PlanetScope, já apresentados aqui.

A metodologia de combinações de bandas é utilizada para melhor compreender os recursos nas imagens. Estas são produzidas reorganizando os canais espectrais disponíveis de variadas maneiras. Em imagens multiespectrais, algumas bandas representam espectros visíveis a olho humano e, por isso, a combinação delas, na posição correspondente, forma a imagem de “cor

verdadeira”. Seriam, então, as cores “falsas” combinações de bandas que não se consegue ver normalmente, mas que trazem informações complementares a partir de seus comprimentos de onda. A composição de bandas, no *software* ArcMap, pode ser realizada com a ferramenta Composite Bands. Segundo a composição de bandas apresentada por Kaplan e Avdan (2017), a ordem de bandas “quase vermelho”, “vermelho” e “verde” corresponde à imagem de Infravermelho de Cor Tradicional (CIR), que enfatiza a diferença entre vegetação saudável e não saudável por meio da observação da reflectância na cor vermelha.

A fim de produzir resultados com informações a princípio não visíveis a olho humano, o método de mapeamento por classificação supervisionada foi realizado por meio da ferramenta Image Classification (Classificação de Imagens) no ArcMap. Com isso, a classificação de densidade da vegetação, para os anos de 2015 e 2020, foi conduzida com a amostragem de trechos do mapa de combinação das bandas para cor verdadeira (bandas 1, 2 e 3, nesta ordem) com foco em diferentes tons de verde. Tendo em vista os diferentes níveis de adensamento indicados em projeto (conforme as necessidades de reflorestamento), o trabalho se baseou nesse indicativo como referência para comparação entre o projeto e a situação atual. Devido à pequena extensão do projeto, a resolução de 4,77 metros por pixel é uma resolução satisfatória de imagem para análise das informações, não visíveis a olho humano, da sub-bacia do córrego Tijuco Preto fixada em escala 1:10.000. Para um estudo mais detalhado - como por exemplo para a definição das espécies vegetais no recorte de estudo - do tecido urbano, em cor verdadeira e menor escala, seria necessário usar uma imagem com melhor resolução, mas que não necessariamente fosse multiespectral, ou seja, oferecesse dados sobre a densidade da vegetação por espectro infravermelho. Por isso, a escolha do mosaico PlanetScope como base de trabalho é adequada neste estudo.

Ademais, a fim de qualificar a densidade vegetativa mapeados nos dois cenários temporais, um índice de vitalidade foi calculado a partir de uma equação normalizada, que é realizada no ArcMap, com a ferramenta Raster Calculator. O índice

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) relaciona a refletância com a saúde da vegetação e utiliza o sensoriamento remoto para analisar as suas condições. Considerando o grau de refletância das diferentes faixas no espectro magnético da luz ao incidir em qualquer objeto, pode-se compreender as características divergentes da vegetação morta em comparação com a vegetação saudável. Esta apresenta uma maior diferença de refletância entre o infravermelho próximo e os demais espectros. Da mesma forma, o espectro verde (*green*) costuma refletir mais que o vermelho (*red*) e o azul (*blue*), até mesmo em condições de estresse da vegetação. Essa diferença de espectros é utilizada como base do cálculo de um índice para a diferença normalizada de vegetação (Rousse et al., 1973 apud Xavier et al., 2019; Pettorelli et al., 2005), a partir da seguinte equação normalizada:

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$$

Onde:

NIR = Infravermelho próximo

VIS = Luz visível vermelha

Análise dos resultados

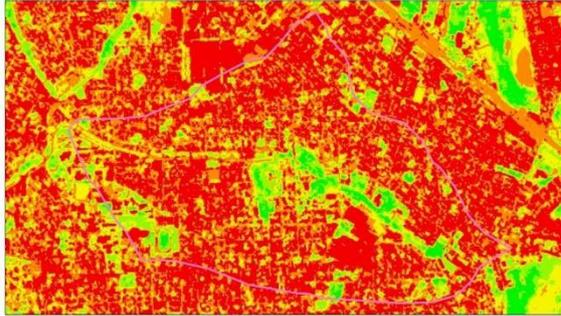
O mapeamento a partir da classificação supervisionada do uso de solo sobre densidade vegetativa, considerando o Cenário C (2015) e a Situação Atual (2020) do Parque Linear Tijuco Preto, permitiu constatar o espraiamento da vegetação associado à requalificação fluvial, uma vez que a situação atual apresentou maiores superfícies cobertas com vegetação densa e saudável. Em seguida, aplicou-se o índice NDVI (Pettorelli et al., 2005) para obter resultados acerca da saúde da vegetação. Os resultados obtidos demonstram uma expressiva evolução dentro do recorte temporal avaliado, posto que a vegetação

morta ou não saudável encontrada no Cenário C (2015), transformou-se sobretudo em vegetação moderadamente saudável na Situação Atual (2020), como mostra a Figura 3. Ainda, notou-se que a vegetação saudável prosperou nas margens do Córrego do Parque Linear Tijuco Preto, principal local de intervenção.

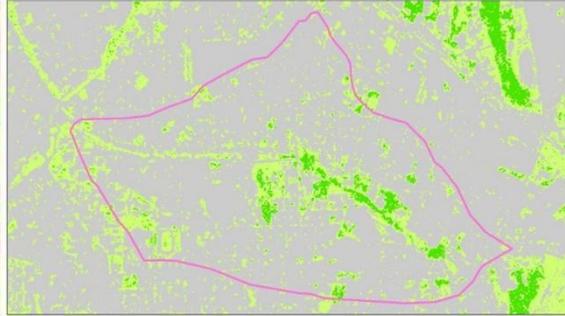
Esta comparação se faz necessária ao se considerar que as áreas mais a jusante do Parque Linear são compostas por soluções de drenagem convencionais, como as canalizações, que dificultam maiores oportunidades de desenvolvimento vegetal e de infiltração ao longo da bacia. Além disso, ainda que superfícies com vegetação saudável tenham aumentado em regiões além do recorte em que se encaixa o projeto de requalificação fluvial, nota-se que a vegetação que prosperou dentro destes 5 anos está também associada aos demais espaços livres públicos e privados da bacia, como praças, calçadas arborizadas, lotes desocupados e lotes que mantêm áreas minimamente permeáveis.

Tendo em vista os relatos e levantamentos realizados *in loco* pelos autores consultados (Figueirôa-ferreira, Augusto and Fernandes, 2021; Santi et al., 2016; Baptista, Scarpinella and Menezes, 2021), o resultado do mapeamento de uso de solo sobre densidade vegetativa corrobora as afirmações acerca da ampla predominância de vegetação que, por vezes, impede o contato visual do transeunte com o córrego. No contexto deste trabalho, a presença de vegetação associada ao projeto de requalificação é considerada um fator positivo e que oferece indícios do sucesso ecológico do projeto. No entanto, tratando-se de projetos situados em regiões urbanas, entende-se a necessidade de associar os interesses sociais e ambientais, por meio de manutenção adequada que reflita na segurança do morador e na preservação da faixa marginal.

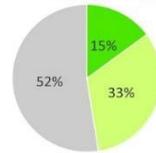
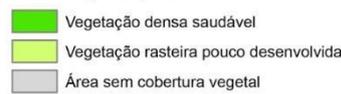
2015



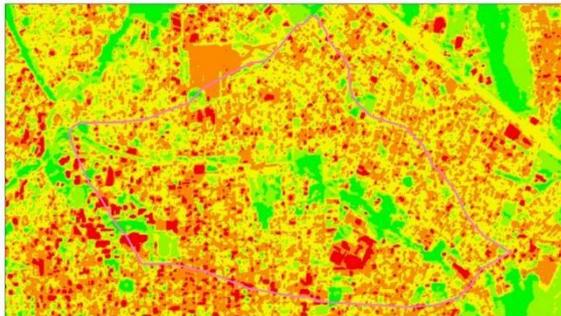
NDVI 2015



Classificação supervisionada 2015



2020



NDVI 2020



Classificação supervisionada 2020

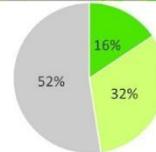
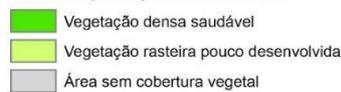


Figura 3. Índice NDVI e classificação supervisionada dos anos 2015 e 2020. Fonte: elaborada pelos autores.

As características resultantes dos mapeamentos em ArcGIS foram também comparadas com os relatórios de desenvolvimento do projeto do Pró-Tijuco (Peres and Mendiondo, 2004; Peres, Mendiondo and Porto, 2005), acessados e disponíveis duas décadas depois de sua implementação. Para fins de análise, foi considerado o polígono previsto como a área de consolidação do espaço do parque no Cenário C (2015), bem como sua Situação Atual (2020).

A primeira análise comparativa buscou averiguar os trechos de melhor

desenvolvimento, bem como as divergências em relação ao Cenário C (2015). A análise demonstrou que a Situação Atual (2020) se assemelha mais com o Cenário A (2005), do que com os Cenários B (2010) e C (2015). Nesse sentido, ainda que o Cenário C considerasse o espriamento da vegetação ao longo do córrego e das ruas adjacentes e, principalmente, o estímulo à formação de corredores ecológicos, notou-se que os pontos de divergência encontrados eram reflexo da falta de continuidade na implantação das propostas.

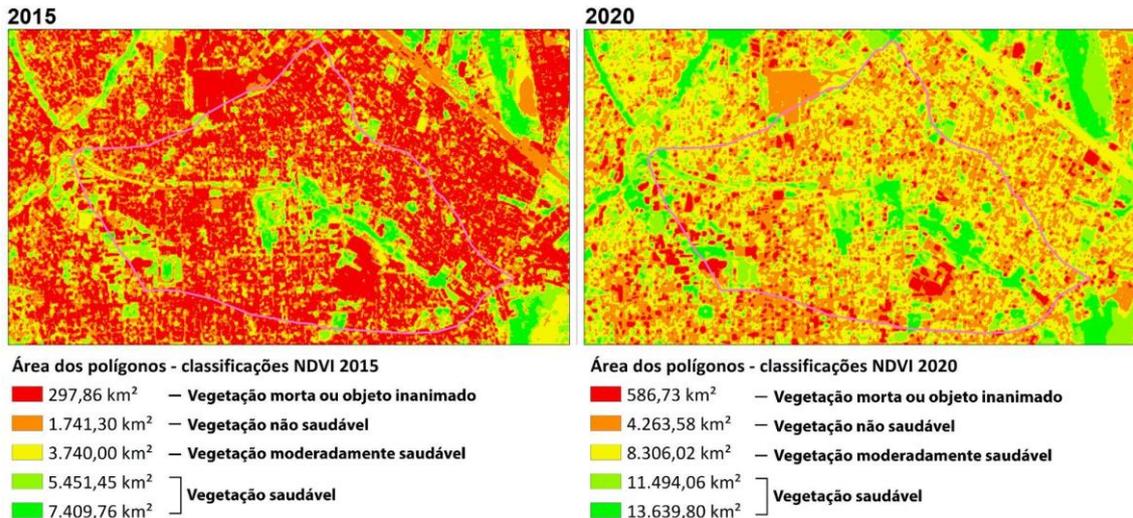


Figura 4. Área dos polígonos de classificação NDVI para os anos 2015 e 2020. Fonte: elaborada pelos autores.

Deste modo, os mapeamentos realizados buscam dar importância ao monitoramento e à manutenção da vegetação em projetos de requalificação fluvial, visto sua capacidade de impactar positivamente na qualidade ambiental do entorno urbano.

Considerações finais

A presente pesquisa teve como objetivo apresentar os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como ferramenta capaz de investigar o sucesso de um projeto de requalificação fluvial brasileiro. Para isto, tendo em vista que a vegetação é um componente essencial no equilíbrio das dinâmicas urbanas e ambientais, buscou-se a apresentação de uma metodologia relacionada ao sensoriamento remoto para mapear a evolução temporal e a qualidade da vegetação associada a projetos em rios urbanos. Por isso, a descrição detalhada do passo a passo para o processo de obtenção de dados e mapeamento em ambiente SIG é explorada neste trabalho. O projeto Pró-Tijuco, no município de São Carlos, no Estado de São Paulo, foi considerado como estudo de caso de requalificação fluvial nacional que considera a vegetação como eixo de intervenção. De modo geral, a escolha deste projeto se mostrou instigante devido à elaboração de cenários de curto, médio e longo prazo pela equipe de projeto responsável, o que tornou possível a comparação entre os anos que sucederam a implementação do projeto. No entanto, devido às limitações relacionadas à obtenção de imagens satélites, as análises se restringiram a

um recorte temporal atual, situado entre os anos de 2015 e 2020.

Entende-se a importância do uso de ferramentas de geoprocessamento na análise morfo-territorial e no monitoramento de cenários desenvolvidos com foco na melhoria ecossistêmica do ambiente hídrico urbano. Portanto, todos os obstáculos encontrados ao longo do processo, na aquisição de dados sobre o projeto, e, conseqüentemente, nos resultados são trazidos à luz neste trabalho.

O monitoramento pós-projeto e a disponibilização de seus registros, bem como, a aproximação do processo de projeto ao contexto de conscientização local, é essencial para o sucesso da requalificação fluvial. Mesmo que nem todas as metas para o sucesso ecológico sejam alcançadas, o sucesso de aprendizagem é fundamental para a continuação e o aprimoramento das técnicas a partir do restauro do ambiente hídrico. Desta forma, destaca-se a importância de iniciativas de requalificação fluvial como a realizada no Projeto Pró-Tijuco, considerando as oportunidades de aprendizado e o incentivo à realização de novos projetos.

A utilização dos Sistemas de Informação Geográfica como ferramenta digital demonstrou eficácia no mapeamento e na avaliação da qualidade vegetativa, como medida não-estrutural em projetos de requalificação fluvial, ao permitir o acompanhamento das transformações do espaço urbano e prevenir danos ecológicos de maneira remota com informações

multiespectrais. Ainda, tendo em vista os desafios associados às mudanças climáticas, como o aumento da ocorrência de inundações urbanas e o aumento dos efeitos das ilhas de calor, a utilização de ferramentas de monitoramento da vegetação se torna importante na obtenção de dados quantitativos e na formulação de respostas para cenários futuros. Espera-se que a metodologia apresentada, bem como as demais ferramentas digitais exploradas, ofereçam subsídios para a realização de novas pesquisas voltadas para a Arquitetura e o Urbanismo, com ênfase no geoprocessamento de imagens para análise da qualidade ambiental nas cidades.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela CAPES (código de financiamento 001) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ, códigos E-26/200.417/2021 e E-26/201.404/2021 (260779). Agradecemos também a Cátedra UNESCO “Drenagem Urbana em Regiões Costeiras”, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, à qual esta pesquisa está vinculada.

Referências

- Abreu, K. M. P. de and Coutinho, L. M. (2014) ‘Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem’, *Revista Vértices*, 16(1), pp. 173–198. doi: 10.5935/1809-2667.20140012.
- Baptista, M. V., Scarpinella, G. D. and Menezes, D. B. (2021) ‘Idas e vindas do processo de degradação e recuperação de um córrego urbano’, *Iii Simpósio Nacional De Gestão E Engenharia Urbana [Singeurb 2021]*, 3, pp. 87–95. doi: 10.46421/singeurb.v3i00.1115.
- Battemarco, B. et al. (2018) ‘Open Space Systems and Urban Drainage : an Example of Integration Between Sustainable Rainwater Management and Urban Planning’, *Paisagem e Ambiente*, (42), pp. 55–74.
- Ferreira, L. G., Ferreira, N. C. and Ferreira, M. E. (2008) ‘Remote sensing of vegetation: Evolution and state of the art | Sensoriamento remoto da vegetação: Evolução e estado-da-arte’, *Acta Scientiarum - Biological Sciences*, 30(4), pp. 379–390. doi: 10.4025/actasciobiolsci.v30i4.5868.
- Figueirôa-ferreira, V. G., Augusto, R. and Fernandes, S. (2021) ‘Fragmentos de infraestrutura verde : o caso do córrego Tijuco Preto Fragments of green infrastructure : the case of the Tijuco Preto stream Fragmentos de infraestrutura verde : el caso del arroyo Tijuco Preto’, pp. 230–242.
- Gorski, M. C. B. C. B. (2008) *Rios e cidades: ruptura e reconciliação*. 1.ed. Senac São Paulo.
- Herzog, C. (2010) ‘Infra-Estrutura Verde Para Cidades Mais Sustentáveis’, *Teoria E Prática Em Construções Sustentáveis No Brasil - Projeto Ccps*, pp. 1–30.
- Kaplan, G. and Avdan, U. (2017) ‘Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery’, *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), pp. 137–143. doi: 10.1080/22797254.2017.1297540.
- Kozak, D. et al. (2020) ‘Blue-green infrastructure (BGI) in dense urban watersheds. The case of the Medrano stream basin (MSB) in Buenos Aires’, *Sustainability (Switzerland)*, 12(6), pp. 1–30. doi: 10.3390/su12062163.
- Labaki, L. C. C. et al. (2011) ‘Vegetação e conforto térmico em espaços urbanos abertos.’, *FÓRUM*, 4(March 2014), p. 18.
- Lähde, E., Khadka, A. and Tahvonon, O. (2019) ‘Can We Really Have It All?—Designing Multifunctionality with Sustainable Urban Drainage System Elements’. doi: 10.3390/su11071854.
- Li, L. et al. (2020) ‘Estimating urban vegetation biomass from sentinel-2A image data’, *Forests*, 11(2), pp. 1–24. doi: 10.3390/f11020125.
- Lira, C. et al. (2016) *Sistemas de Informação Geográfica: Análise de Dados de Satélite*. Lisboa: DGRM.
- Mascaró, L. and Mascaró, J. L. (2002) *Vegetação Urbana*. 4ª edição. Rio Grande do Sul: Masquatro.
- NICFI (2021) ‘Guia do Usuário’. Norway’s International Climate and Forest Initiative, p. 14 p.
- Palmer, M. A. et al. (2005) ‘Standards for ecologically successful river restoration’, *Journal of Applied Ecology*, 42(2), pp. 208–217. doi: 10.1111/j.1365-2664.2005.01004.x.

Peres, R. B. B., Mendiondo, E. M. M. and Porto, R. de M. de M. (2005) *Projeto Finep Ct Hidro: Experimento Piloto De Gerenciamento Integrado De Bacias Urbanas Para O Plano Diretor De São Carlos, São Carlos, Sp*. São Paulo: Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas.

Peres, R. B. and Mendiondo, E. M. (2004) 'Desenvolvimento de cenários de recuperação como instrumento ao planejamento ambiental e urbano – bases conceituais e experiências práticas', in NEUR/CEAM (ed.) *Seminário A Questão Ambiental Urbana: Experiências e Perspectivas*. Brasília, DF: UnB, pp. 1–15.

Perini, K. and Sabbion, P. (2017) *Urban Sustainability and River Restoration, Urban Sustainability and River Restoration*. doi: 10.1002/9781119245025.

Pettorelli, N. et al. (2005) 'Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change', 20(9). doi: 10.1016/j.tree.2005.05.011.

Portal de notícias São Carlos (no date). Available at: <http://www.saocarlos.sp.gov.br/>.

Ribeiro, H. J. et al. (2019) 'Sensoriamento

Remoto Em Ecologia Da Paisagem: Estado Da Arte', *Geosciences = Geociências*, 38(1), pp. 257–267.

Santi, A. D. de et al. (2016) 'Resíduos Sólidos Urbano: Percepção ambiental na microbacia do córrego do Tijuco Preto no município de São Carlos (SP)', *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, 11(4), pp. 29–41. doi: 10.34024/revbea.2016.v11.2088.

Silva, A. Da et al. (2020) 'Proposta de projeto de uma edificação sustentável baseada no conceito de net zero water buildings', *Revista Gestão e Gerenciamento*, 13, pp. 1–10.

Veról, A. P. et al. (2018) 'Requalificação fluvial: conceitos e casos de estudo', in *Gestão de Recursos Hídricos e Sustentabilidade*. 1.ed. Ponta Grossa (PR): Atena Editora, pp. 17–33.

Veról, A. P. et al. (2020) 'River Restoration Integrated with Sustainable Urban Water Management for Resilient Cities', *Sustainability (Switzerland)*, pp. 1–36. doi: 10.3390/su12114677.

Tradução do título, resumo e palavras-chave

Qualitative analysis of vegetative solutions in river restoration projects with GIS support

Abstract. *Vegetation restoration is considered an important structural action capable of balancing human needs and the natural dynamics of water bodies affected by disorderly urban growth. Bearing in mind that virtually all rivers have already suffered some environmental impact, not only the importance of restoration projects in degraded urban rivers is highlighted, but also the need for temporal monitoring of implemented solutions. Therefore, this research aims to explore the use of Geographic Information Systems in a Brazilian river restoration project (Projeto Pró-Tijuco, in São Paulo), in order to investigate the success of the implementation of the landscape project and demonstrate the possibilities of tool use. The analysis methodology relies on remote sensing on Planet satellite images, in the ArcGIS geoprocessing software. Vegetative density was mapped using a supervised classification method and then the NDVI index was applied. The results showed the spread of vegetation associated with river rehabilitation, as well as a significant evolution of vegetation within the evaluated time frame. Finally, the mappings explore the importance of vegetation in river rehabilitation projects, given its ability to positively impact the monitoring of the quality of the urban environment.*

Keywords: *river restoration, vegetative density, remote sensing, NDVI*

Editores responsáveis pela submissão: Danielly Aliprandi,
Antonio Leandro Crespo de Godoy, Vera Tangari.

Licenciado sob uma licença Creative Commons.

