

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

Definição de áreas prioritárias para conservação de mananciais superficiais de
abastecimento: o caso do município de São Carlos (SP)

Aluno: Luís Fernando Pereira de Brito
Orientador: Marcelo Montaña

SÃO CARLOS
2022

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

Definição de áreas prioritárias para conservação de mananciais superficiais de
abastecimento: o caso do município de São Carlos (SP)

Aluno: Luís Fernando Pereira de Brito

Orientador: Marcelo Montañó

Monografia apresentada ao curso de graduação
em Engenharia Ambiental da Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo.

SÃO CARLOS

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

P862d Pereira de Brito, Luís Fernando
 Definição de áreas prioritárias para
 conservação de mananciais superficiais de
 abastecimento: O caso do Município de São Carlos (SP) /
 Luís Fernando Pereira de Brito; orientador Marcelo
 Montañó. São Carlos, 2022.

 Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
 São Paulo, 2022.

 1. Sustentabilidade Hídrica. 2. Planejamento
 Ambiental. 3. Sistema de Informações Geográficas. I.
 Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

Folha de Avaliação

BRITO, L. F. P.. Definição de áreas prioritárias para conservação de mananciais superficiais de abastecimento: O caso do município de São Carlos (SP). Orientador: Marcelo Montaña. 2022. 75 p. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2022.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Luís Fernando Pereira de Brito**

Data da Defesa: 11/10/2022

Comissão Julgadora:

Resultado:

Marcelo Montaña (Orientador(a))

APROVADO

José Eduardo Matheus Evora

APROVADO

José Wilker de Freitas Sales

APROVADO



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

Dedicatória

Dedico esta obra à meus avós, meus pais e minha família pelo apoio incondicional e
suporte à minha formação.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Marcelo Montaña pelo apoio à minha formação e pela confiança em meu trabalho.

À todos meus orientadores, que me confiaram as oportunidades que tive durante minha graduação e pelos ensinamentos muito valiosos que levo comigo para toda a vida.

Aos professores do curso de Engenharia Ambiental da EESC-USP, pelo empenho e disposição em me ensinar grande parte daquilo que hoje sei.

Ao CNPQ pela bolsa concedida.

Aos meus pais e minha família por tudo que me ajudaram nesta fase.

À todos meus colegas de casa pelo momentos de descontração e pelo sentimento de família criado.

À meus amigos pelos momentos que pudemos viver juntos, especialmente os bons.

Ao GSOM pelas músicas e apoio nos momentos que mais precisei.

Resumo

BRITO, L. F. P. Definição de áreas prioritárias para conservação de mananciais superficiais de abastecimento: O caso do município de São Carlos (SP). Orientador: Marcelo Montaña. 2022. 75 p. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2022.

Este projeto surgiu da necessidade de encontrar condutas de utilização de espaços que incorpore os componentes ambientais e garanta de fato o desenvolvimento sustentável, principalmente no que tange ao abastecimento hídrico. Buscou-se elaborar revisão de literatura que possibilite a elaboração de um *framework* que guie boas práticas na tomada de decisão de ocupação de espaços e permita a sustentabilidade do sistema de abastecimento hídrico, além de literatura que retrata a realidade do município de São Carlos - SP, tanto pela legislação quanto pelos parâmetros físicos. O presente documento tem como objetivo relatar o desenvolvimento do projeto, os resultados obtidos e as conclusões a respeito da interpretação dos resultados. Serão detalhadas a metodologia utilizada para elaborar a revisão bibliográfica, a elaboração do *framework* proposto e os produtos gerados para o município de São Carlos a partir da aplicação em um estudo de caso. O presente projeto de pesquisa é voltado para o desenvolvimento de condutas para a sustentabilidade do sistema de abastecimento hídrico no município de São Carlos (SP), considerando diferentes cenários de desenvolvimento, as possibilidades e alternativas de aumento, melhoria e conservação do potencial hídrico no município.

Palavras-chave: Sustentabilidade Hídrica. Planejamento Ambiental. Sistema de Informações Geográficas.

Abstract

BRITO, L. F. P.. Definition of priority areas for surface supply water source conservation: The case of São Carlos (SP) municipality. Orientador: Marcelo Montañó. 2022. 75 p. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2022.

This project arose from the need to find ways of using spaces that incorporate environmental components and actually guarantee sustainable development, especially with regard to water supply. We sought to elaborate a literature review that allows the elaboration of a framework that guides good practices in the decision-making of space occupation and allows the sustainability of the water supply system, in addition to literature that portrays the reality of the municipality of São Carlos - SP , both by legislation and by physical parameters. This document aims to report the development of the project, the results obtained and the conclusions regarding the interpretation of the results. The methodology used to prepare the bibliographic review, the elaboration of the proposed framework and the products generated for the municipality of São Carlos from the application in a case study will be detailed. This research project is aimed at the development of pipelines for the sustainability of the water supply system in the municipality of São Carlos (SP), considering different development scenarios, the possibilities and alternatives for increasing, improving and conserving the water potential in the municipality.

Keywords: Water Sustainability. Environmental Planning. Geographic Information System.

Sumário

1. Introdução	11
2. Objetivos	12
3. Material e métodos	13
4. Resultados e discussão	15
4.1. Revisão da Literatura	15
4.2. Coleção de artigos e informações pertinentes ao desenvolvimento do trabalho	29
4.2.1. Artigos, Documentos e Leis	29
4.2.2. Aquisição de dados	30
4.3. Caracterização do município de São Carlos quanto aos temas selecionados	30
4.3.1. Pedologia em São Carlos	30
4.3.2. Uso e ocupação MapBiomas	32
4.3.3. NDVI	33
4.3.4. Dados Municipais	34
4.3.4.1. PLANO DIRETOR DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS	34
4.3.4.2. Lei nº 13.944, de 12 de dezembro de 2006	39
4.3.4.3. Interpretação dos Dados Municipais	41
4.3.5. Construção do framework	42
4.3.6. Hierarquização dos critérios	43
4.4. Processamento de informações em ambiente GIS e normalização dos fatores	47
4.4.1. Pedologia	47
4.4.2. Fluxo Acumulado	48
4.4.3. Uso e Ocupação	51
4.4.4. NDVI	52
4.4.5. Plano Diretor	53
4.4.6. Lei dos Mananciais	54
4.4.7. Normalização dos arquivos	55
4.4.8. Geração do arquivo matricial de áreas com maior influência sob a sustentabilidade de mananciais de água para abastecimento público	57
5. Conclusão	70
Referências	72

1. Introdução

No cenário mundial, a crescente demanda por recursos hídricos e sua iminente escassez torna necessário que os gestores busquem sempre a máxima eficiência na exploração desses recursos associando medidas de disciplinamento do uso do território às medidas específicas de gestão hídrica de oferta e demanda. Os impactos da urbanização sobre mananciais públicos de abastecimento têm implicado no aumento dos custos - ambientais, sociais e econômicos - associados aos sistemas de abastecimento, exigindo dos gestores soluções bem planejadas para que problemas como a escassez não se tornem irreversíveis e impeça os usos múltiplos dos recursos hídricos. Nesse sentido, a identificação dos processos de degradação dos mananciais e sua correlação com o uso e ocupação do solo do território constituem informações relevantes para o planejamento de ações de gestão hídrica.

2. Objetivos

Desenvolver métricas para a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento hídrico no município de São Carlos (SP), levando-se em consideração o contexto de impactos ambientais associados ao uso e ocupação do solo e cenários de desenvolvimento.

Identificar alternativas para a compatibilização do desenvolvimento urbano e a sustentabilidade dos mananciais de abastecimento no município. Serão consideradas as possíveis interferências (negativas e positivas) sobre a disponibilidade hídrica para mananciais superficiais e subterrâneos.

3. Material e métodos

O trabalho iniciou-se pela revisão de literatura sobre o conceito entendido por “alternativas sustentáveis” de acordo com Smith, Fessey e White (2011). Seguindo o que foi proposto no projeto enviado, a revisão bibliográfica segue os procedimentos indicados por Kitchenham (2004).

Foram coletados artigos e trabalhos acadêmicos das bases de dados: *ScienceDirect*, *Google Scholar* e *ResearchGate*. Foram utilizadas as palavras-chave: *São Carlos*, *Mananciais*, *Vulnerabilidade*; *São Carlos*, *Degradação Ambiental*, *Recursos hídricos*; *Framework*, *Resilience*, *governance*; *Climatologia*, *precipitação*, *São Carlos*; *Groundwater*; *recharge*; *aquífer*; *water*; *supply*; *surface*; *GIS*; *Decision making*; *AHP*.

Foram utilizadas combinações das palavras-chaves por meio de operadores *booleanos* AND, OR, NOT e AND NOT para seleção dos arquivos com maiores relações com o tema estudado. Foram coletados 25 artigos para cada combinação de palavras-chave utilizadas e os artigos foram pré-selecionados com base em seu resumo e se apresentavam relação com o estudo ou não. Foram considerados todos os resultados que apresentavam relação com o estudo, independente do resultado obtido pelos autores, para uma análise concisa e imparcial.

Após a separação e leitura dos artigos coletados foi estabelecido o desenvolvimento do trabalho e os critérios de inclusão no modelo, com base na influência destes na modelação final. A aquisição dos dados utilizados no trabalho foi feita nas bases de dados municipais, estaduais e federais, bem como em trabalhos já publicados em artigos de periódicos e em instituições e órgãos que realizam monitoramento de variáveis de ocupação. Também foram utilizados dados coletados de satélites divulgados pelo INPE e instituições de gerenciamento de dados de satélite.

Uma vez selecionados os critérios de influência na sustentabilidade dos mananciais, foi feita a atribuição de pesos a estes critérios por meio da metodologia proposta por Saaty (1997) pela comparação entre os critérios por pares, com a montagem da matriz e o cálculo do vetor de prioridade.

Deu-se seguimento com o processamento das informações em ambientes GIS para atribuição de pesos a cada classe de cada categoria identificada. Após, foi feita a normalização dos valores com base nos valores máximos e mínimos encontrados para os arquivos matriciais cujos valores apresentavam escalas diferentes daquelas com intervalo entre [0,1]. Com os diferentes arquivos de critérios uniformizados em uma escala única foi possível realizar a multiplicação por sua influência final obtida a partir da realização do

processo de análise hierárquico. O processo foi realizado por meio da calculadora de raster do QGIS por meio da soma de cada critério multiplicado por seu respectivo valor associado.

A equação utilizada para tal procedimento foi:

$$\sum_{i=1}^5 [(vetor\ prioridade_i) * (critério_i)]$$

Com o produto final foram feitos ajustes na simbologia da camada raster por meio da análise do histograma gerado da imagem e a classificação foi feita de maneira contínua considerando os valores gerados no histograma de cada camada.

A imagem final classificada foi então submetida à análise com base na comparação com as imagens não processadas e outros arquivos vetoriais de bases de dados consolidadas já aquisitadas no processo de montagem da base de dados municipal.

4. Resultados e discussão

4.1. Revisão da Literatura

O desenvolvimento de condutas que garantam a sustentabilidade esbarra num primeiro problema que é a definição da palavra ‘sustentabilidade’. Embora seja palavra de uso cotidiano, sua definição é mais aberta a visões políticas e interpretações filosóficas (MORELLI, 2011). O relatório “Nosso Futuro Comum”, publicado em 1987 apresenta a definição mais popular de desenvolvimento sustentável: “[...] aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades” (BARBIERI, 2020). No entanto, tal definição mostra-se insuficiente para profissionais da área ambiental e correlatas e, para maior precisão Morelli (2011) estendeu a definição para:

“[...] e, mais especificamente, como condição de balanço, resiliência e interconectividade que permite à humanidade satisfazer suas necessidades sem exceder a capacidade de seu ecossistema continuar a regenerar os serviços necessários às primeiras, nem diminuir a diversidade biológica.”

Partindo desta definição e trazendo à realidade de São Carlos, a resiliência é parte importante de ser aplicada para os estudos de sustentabilidade de maneira geral. Deste modo, encontrar alternativas que permitam o desenvolvimento sustentável (da definição acima) torna-se um desafio a ser encarado de maneira ampla, tendo em vista que as alternativas para os projetos encontram problemas na prática de planejamento urbano por parte dos tomadores de decisão (SMITH; FESSEY; WHITE, 2011). Ainda, Smith, Fessey e White (2011) apontam os problemas enfrentados na etapa de elaboração das alternativas locais nas Avaliações Ambientais Estratégicas (AAE) e, principalmente, nas opções de alternativas viáveis.

O ciclo hidrológico descreve o movimento contínuo da água, seja na superfície ou na subsuperfície da Terra (U.S. GEOLOGICAL SURVEY; U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 2016). As águas de superfície ocorrem como correntes de água, rios, lagos, *wetlands*, baías e oceanos e as que fluem na subsuperfície ocorrem como lençóis freáticos, principalmente (U.S. GEOLOGICAL SURVEY; U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 2016). Além das transferências de recursos hídricos entre continentes e oceanos (precipitação, evaporação, transpiração, etc) existem interações entre as águas superficiais e subterrâneas, que ocorrem de acordo com condicionantes locais da área de estudo (U.S. GEOLOGICAL SURVEY; U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 2016). Da mesma maneira que a evaporação e a transpiração são afetadas por variáveis locais, as relações entre as águas

superficiais e subterrâneas também o são, podendo ser muito diferentes mesmo em escalas pequenas.

Existem basicamente três processos de interação entre percursos d'água e lençóis freáticos: O lençol freático fornece água para a rede de drenagem; A rede de drenagem fornece água para o lençol freático; ou acontece uma troca entre os dois, ora fornecendo água e ora recebendo (U.S. GEOLOGICAL SURVEY; U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 2016). Alterações causadas nesta dinâmica, tanto antrópicas como naturais, podem resultar na mudança da dinâmica local de tais processos de interação. A extração de águas subterrâneas, por exemplo, resulta no rebaixamento dos níveis de lençóis freáticos, que por sua vez podem interromper o fornecimento de água para redes de drenagem superficial e reduzindo sua vazão, ou até mesmo interrompendo o fluxo de água (U.S. GEOLOGICAL SURVEY; U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 2016).

Em uma escala de tempo sazonal-anual novas precipitações apenas contribuem com volume considerável no primeiro evento após a estação de seca e, em córregos na estação chuvosa, a contribuição de águas subterrâneas é predominante e provém de eventos anteriores de precipitação (WALLACE et al., 2021). Em bacias hidrográficas impermeabilizadas a água que chega aos fluxos de drenagem provém quase exclusivamente do evento de precipitação via escoamento superficial e o fluxo durante o evento de precipitação é composto por águas superficiais existentes antes da precipitação, carregadas durante o evento, e águas subterrâneas descarregadas à montante do ponto de observação (WALLACE et al., 2021).

Em 2005 no Estado de São Paulo 71.6% dos municípios são abastecidos totalmente (47.7%) ou parcialmente (23.9%) por águas subterrâneas (ANA, 2005). O Brasil é alvo de mudanças climáticas que podem afetar o ciclo hidrológico a níveis regionais com redução da precipitação média na região Norte e Nordeste e aumento da precipitação ao Sul do país com aumento da heterogeneidade dos eventos e até 2050 aproximadamente 45% do território brasileiro sofrerá redução de recargas de aquíferos com impactos locais (HIRATA; CONICELLI, 2012).

Em períodos de seca há aumento no consumo de água subterrânea e abertura de poços de captação, muitas vezes ilegais, que atrapalham as estratégias de gerenciamento de recursos hídricos, como em São Paulo (>70% dos poços não são regularizados), acarretando em estresse hídrico para aquíferos e lençóis freáticos (HIRATA; CONICELLI, 2012). Caso a crise hídrica se agrave e se torne muito severa, começarão a eclodir conflitos entre a preservação do ambiente e o abastecimento público de água cuja solução são medidas de gestão de recursos hídricos tomadas muito antecipadamente (DI MATTEO et al., 2017).

O uso de águas subterrâneas, embora considerado essencial para a manutenção do abastecimento em períodos de estiagem e variações na precipitação, vêm sendo usados acima de sua capacidade de reposição, revertendo assim em redução em seus níveis a longo prazo (VAN SCHMIDT; WILSON; LANGRIDGE, 2022). A gestão das águas subterrâneas está diretamente relacionada ao uso e cobertura do solo, bem como a resiliência a longo prazo de comunidades locais, sendo que alterações na paisagem podem causar perda da qualidade da água, alterações nas dinâmicas de corpos hídricos e mudanças em ecossistemas que dependem da dinâmica da água subterrânea (VAN SCHMIDT; WILSON; LANGRIDGE, 2022). Assim, a expansão de zonas agrícolas ou agropecuárias e também da malha urbana irão intensificar processos de rebaixamento dos níveis das águas subterrâneas, caso haja má-gestão da extração deste recurso natural (VAN SCHMIDT; WILSON; LANGRIDGE, 2022).

Embora o uso de águas subterrâneas possa ter sido utilizado para benefício da humanidade por vários milhares de anos, os princípios de utilização e gerenciamento de tais águas são muito recentes e, em muitos casos, ainda estão em desenvolvimento, especialmente em áreas urbanas de rápido crescimento (HOWARD, 2015). Problemas relacionados à utilização de águas subterrâneas demoraram para emergir em parte por conta do lento escoamento subsuperficial e, como consequência, os estudos acerca do tema também são recentes e mais focados em mitigar os impactos (HOWARD, 2015). Howard (2015) argumenta que não faltam tecnologias para que alcancemos a sustentabilidade na gestão de águas, mas sim que as tecnologias existentes sejam aplicadas em um *framework* de trabalho que consiga abranger e aplicar tais tecnologias de maneira eficaz.

Sistemas de abastecimento de água são mais resilientes às condições existentes e previsões quando os pontos de captação de água são diversificados, ao invés de concentrados (HUND et al., 2018). Caso não exista manejo adequado dos recursos hídricos a recarga de águas subterrâneas durante o período de chuvas pode ser insuficiente para recarregar água o suficiente nos lençóis freáticos para a época de estiagem (HUND et al., 2018).

O framework baseado no modelo LUCAS, associado a classificação do solo e atribuições à fatores de consumo estimados e também a mudanças no uso indicou que o abastecimento atual de água na região da Costa Central da Califórnia não é o suficiente para o alcance da sustentabilidade (VAN SCHMIDT; WILSON; LANGRIDGE, 2022). No entanto aumentar a oferta e suprimento de água na região não garante o suprimento de água a longo prazo já que atividades de agricultura utilizadas no local podem ter baixa eficiência e levar à transferência de água para outras bacias hidrográficas (VAN SCHMIDT; WILSON; LANGRIDGE, 2022). Medidas eficazes de gestão de uso de solo, principalmente as que

objetivam a conservação de remanescentes naturais de vegetação e ecossistemas podem prevenir o estresse hídrico (VAN SCHMIDT; WILSON; LANGRIDGE, 2022).

Assim, além de traçar os elementos socioambientais, econômicos, diretrizes municipais e geomorfológicos, é necessário correlacionar estes com projeções hidrológicas para a área de estudo. Como os municípios brasileiros são inseridos em bacias hidrográficas, e estas estão sujeitas à alterações devido às condições climáticas e de impermeabilização de solo e outros, a modelação do balanço hídrico é uma ferramenta que auxilia na identificação de áreas críticas em cenários atuais e futuros (DE CARVALHO; IENSEN; DOS SANTOS, 2021). O mesmo autor analisa a resiliência do balanço hídrico em diversos cenários da bacia hidrográfica do Belém, em Curitiba - PR. Para a modelação do balanço hídrico foi utilizado o *software AquaCycle* e foi encontrado que, para eventos extremos, houve aumento considerável no escoamento superficial conforme o aumento da impermeabilidade dos solos e aumento da chuva. No entanto, em solos permeáveis houve aumento na infiltração e para solos impermeáveis não houve variação.

Sistemas resilientes de abastecimento de água não devem apresentar respostas precipitadas a eventos extremos durante sua duração de projeto e, se o objetivo final de um sistema tem por objetivo sua sustentabilidade, este deve basicamente igualar o balanceamento hídrico entre o fornecimento de água e a demanda de água (ZHAO et al., 2018). As dificuldades de modelagem de sistemas, no entanto, iniciam quando são levados em consideração os cenários de mudanças climáticas, cujas alterações no ciclo hidrogeológico podem apresentar variações a depender da região de estudo, com incertezas vinculadas à cada modelação realizada (HIRATA; CONICELLI, 2012; ZHAO et al., 2018). Além disso, também devem ser considerados os cenários de alterações no uso do solo e expansão de áreas urbanas.

Incetezas ligadas à disponibilidade de água em modelos não-estacionários são ligeiramente maiores do que aquelas ligadas à demanda (ZHAO et al., 2018).

Sendo assim, a depender do sistema, intervir nos fatores ligados à disponibilidade de água mostra-se mais eficaz para a manutenção do sistema de abastecimento do que intervir em medidas que intervenham na demanda. No entanto, é importante não descartar ações relacionadas à demanda, embora estas devam ser mais utilizadas em momentos cujos impactos de eventos críticos. O mesmo é reforçado pelo trabalho de Howard (2015), que abrange medidas de gestão quanto ao uso de irrigação e distribuição de recursos hídricos nos municípios.

A construção de um *framework* eficaz para a identificação de potencialidades e fragilidades necessita de aparatos que possibilitam delimitar áreas claras de atuação. Um bom

modelo deve, além de abordar o sistema como um todo, englobar características físicas, socioeconômicas e mudanças de longo prazo (MOGHADAS et al., 2022). Tal afirmação vai de encontro ao definido por Smith, Fessey e White (2011) e integra os diferentes setores da cidade dentro de um planejamento territorial. Moghadas *et al.* (2022) argumentam que o planejamento convencional tornou-se insuficiente frente às mudanças climáticas que vem acontecendo e que o planejamento de resiliência urbana a níveis locais deve ser alterado considerando diversos cenários.

O autor argumenta ainda que o principal problema nos países subdesenvolvidos é que a grande maioria dos poços em áreas urbanas são ou irregulares ou ilegais, sendo tal afirmação confirmada por Hirata e Conicelli (2012) e Howard (2015).

A aplicação de estratégias de mitigação de impactos de eventos extremos aumenta a confiabilidade dos sistemas de abastecimentos, sendo que há ganhos de 3,2% para o aumento de medidas de conservação, 4% para adição de novas fontes de captação superficial, 9,5% para a redistribuição da água coletada entre reservatórios e 15,9% para a combinação de todas as estratégias anteriores (ZHAO et al., 2018).

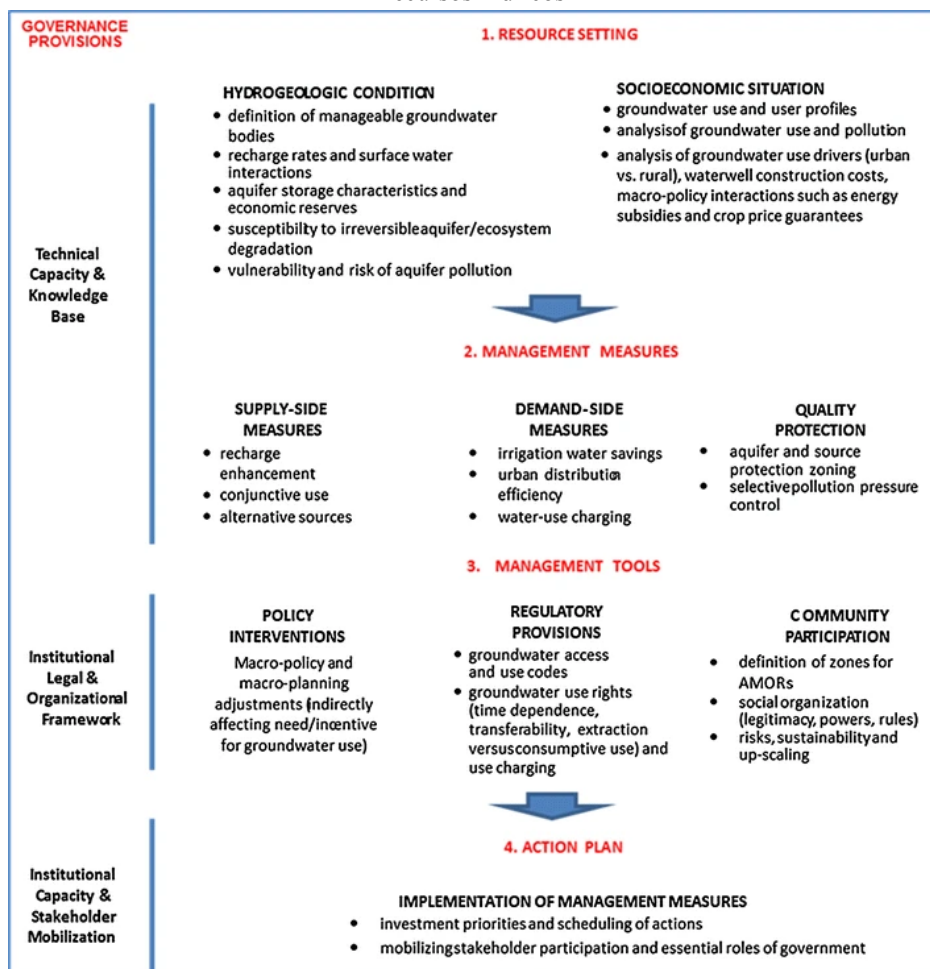
Os maiores agentes causadores de estresse hídrico nos EUA são o setor termoeletrico e irrigação de culturas e, diante as projeções de Duan *et al.* (2019) as mudanças no uso doméstico decorrente do aumento populacional e processos migratórios serão as principais fontes de estresse hídrico nos EUA contíguos. Há relação entre o estresse hídrico sofrido localmente com mudanças ocorridas à montante do ponto de estudo, tanto positivas quanto negativas, por conta de mudanças de alterações na precipitação e evapotranspiração, causadas pelas mudanças climáticas e alterações no uso do solo Duan *et al.* (2019). Quanto maior a contribuição de outras bacias hidrográficas e cursos de drenagem para uma dada bacia hidrográfica, maior é sua resiliência e capacidade de suporte à fatores de estresse derivados de atividades antrópicas (DUAN et al., 2019).

Malmir *et al.* (2022) desenvolveram um *framework* que engloba os modelos DPSIR e GOF com incorporação de elementos hidrológicos, de características da área de estudo, político-sociais, técnicos e econômicos para avaliação do impacto de políticas públicas visando redução no consumo de água subterrânea e concluíram que a partir da aplicação de duas políticas foi possível e redução do consumo em 10% era possível prevenir situações de escassez hídrica no futuro.

O desenvolvimento de um *framework* de trabalho para escalas locais e regionais deve ser adaptado para integrar os usuários e promover o sentimento de pertencimento no planejamento e no processo decisório do gerenciamento dos recursos hídricos de

subsuperfície (HOWARD, 2015). No entanto, embora seja importante agregar os usuários finais no processo decisório, é também igualmente importante que as decisões e planejamentos realizados acompanhem as novas tecnologias e avanços científicos feitos na área, evitando assim o aumento do estresse hídrico nos aquíferos urbanos e periurbanos (HOWARD, 2015).

Figura 01: Reprodução de esquema elaborado por Howard (2015) de montagem de *frameworks* para gestão de recursos hídricos



Fonte: (HOWARD, 2015)

Howard (2015) propôs um modelo amplo e geral que deve ser adaptado para aplicação em escalas locais que considerem a caracterização local, medidas de gestão e ferramentas de gestão para proposição de um plano de ação que possa ser mais eficaz.

Modelos de decisão multicritério são modelações cujo principal objetivo é avaliar e escolher entre alternativas geradas com base em múltiplos critérios reunidos via análise sistemática (KIKER et al., 2005). Existem diversas técnicas elaboradas para o processo de decisão que tem resultados finais diferentes. Algumas identificam uma melhor opção, outras sugerem três principais alternativas, algumas oferecem *ranks* entre as alternativas propostas) (KIKER et al., 2005). O processo de análise hierárquica (AHP) é um método de otimização que utiliza indicadores numéricos para avaliar uma opção frente a outras alternativas, com base em valores atribuídos a indicadores ou opiniões de profissionais experientes (KIKER et al., 2005). O método AHP utiliza da atribuição de valores a cada indicador de relevância para o contexto do estudo, tanto qualitativos quanto quantitativos, e a normalização destes valores em uma escala para alcançar valores de pesos determinados a cada indicador do estudo

(KIKER et al., 2005). O método mostrou-se o mais utilizado para a gestão de recursos naturais para realização de inventários, programas de monitoramento e também na elaboração estratégicos de gestão (KIKER et al., 2005).

Noori *et al.* (2022) elaboraram um modelo integrado para tomada de decisão considerando o processo de decisão de múltiplos critérios e sistemas de informação geográfica para encontrar soluções para a gestão de abastecimento de água urbana com base em modelo hierárquico em ambiente GIS e processo de análise hierárquica e chegaram à conclusão que gastos totais, condições climáticas e condições geográficas são os fatores que apresentam maior importância para avaliação de cenários de abastecimento urbano.

A seleção de critérios (ou fatores) é subjetiva e na maior parte dos casos não cobre todos os fatores que influenciam no estudo e, por serem subjetivos, o resultado final pode variar de acordo com a atribuição dos pesos (TEKNOMO, 2006). A definição dos critérios a serem utilizados necessita revisão bibliográfica que embase tanto os fatores escolhidos quanto às preferências tomadas e sintetize os fatores mais relevantes para o contexto do estudo, uma vez que a matriz de seleção de critérios é limitada. Em adição a tais informações, sabe-se que a quantidade de medidas que estão ao nosso alcance no cotidiano, é relativamente menor do que a quantidade possíveis medidas a serem consideradas, sendo então os critérios de comparação imprescindíveis para a tomada de decisão de forma satisfatória (TEKNOMO, 2006).

Saaty (2004) define uma escala de importância relativa com base na comparação entre critérios com auxílio de uma matriz recíproca ($a_{ji}=1/(a_{ij})$ e $a_{ii}=1$) de ordem n com $n(n-1)/2$ julgamentos necessários. A partir desta matriz é possível calcular o vetor prioridade pela normalização das entradas. O julgamento do valor a ser colocado na matriz (de julgamento) é então feito a partir da comparação entre os fatores analisados e a decisão entre qual destes representa maior importância no contexto do estudo realizado. Ao se utilizar critérios ligados ao julgamento, é necessária a ponderação sobre a validade e confiabilidade dos mesmos (SAATY, 2004).

A escala utilizada no método é uma escala absoluta elaborada para responder questões básicas no processo de comparação por pares: quantas vezes um determinado elemento é mais importante que outro levando em consideração determinado critério? A escala gerada a partir disto é obtida a partir da solução de um sistema de equações lineares cujos coeficientes são números absolutos, derivando assim em uma escala que também o é. Assim, tal escala não pode ser iniciada em 0, uma vez que os números de uma escala absoluta são definidos em

termos de equivalência. A atribuição dos pesos na escala é feita com base na comparação entre os critérios previamente estabelecidos.

Figura 02: Reprodução de escala de Importância para atribuição de pesos pelo método de comparação entre pares proposto por Saaty (2004)

<i>Intensity of Importance</i>	<i>Definition</i>	<i>Explanation</i>
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective
2	Weak or slight	
3	Moderate importance	Experience and judgment slightly favor one activity over another
4	Moderate plus	
5	Strong importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another
6	Strong plus	
7	Very strong or demonstrated importance	An activity is favored very strongly over another; its dominance demonstrated in practice
8	Very, very strong	
9	Extreme importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
Reciprocals of above	If activity <i>i</i> has one of the above nonzero numbers assigned to it when compared with activity <i>j</i> , then <i>j</i> has the reciprocal value when compared with <i>i</i>	A reasonable assumption
Rationals	Ratios arising from the scale	If consistency were to be forced by obtaining <i>n</i> numerical values to span the matrix

Fonte: (SAATY, 2004)

O grau de coerência é uma qualidade ou condição de ligação ou harmonia entre dois fatos ou duas ideias (Dicio, 2022). No entanto, novos conhecimentos requerem mudanças intrínsecas à incoerência e, por isso, deve ser estabelecido determinada incoerência entre os fatores, grande o suficiente para que hajam alterações nos modelos criados mas ao mesmo tempo pequena o suficiente para garantir que o modelo ainda seja consistente e, por isso é admitido um grau de inconsistência em torno de 10% (SAATY, 2004). Uma pontuação importante é dada: em ocorrências reais, a inconsistência é uma característica comum, e portanto, não deve ser rigidamente rejeitada (SAATY, 2004).

A comparação entre pares leva a construção da matriz A de ordem n, sendo n o número de fatores ou critérios analisados formados pelos número w₁ a w_n é construída de forma:

Figura 03: Montagem da matriz de comparação entre pares proposto por Saaty (2004)

$$\begin{array}{c}
 A_1 \quad A_2 \quad \cdots \quad A_n \\
 w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_n \\
 A_1 \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\
 A_2 \begin{bmatrix} w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\
 \vdots & & \ddots & \\
 A_n \begin{bmatrix} w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Fonte: (SAATY, 2004)

Sendo o vetor W recuperado pela solução do sistema definido pela multiplicação escalar entre a matriz A e vetor W:

Figura 04: Reprodução da equação de obtenção do vetor de prioridade proposto por Saaty (2004)

$$\begin{aligned}
 AW = & \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\
 w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\
 \vdots & & \ddots & \\
 w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \\
 & \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\
 w_2 \\
 \vdots \\
 w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\
 w_2 \\
 \vdots \\
 w_n \end{bmatrix} = nw
 \end{aligned}$$

Fonte: (SAATY, 2004)

A solução deste sistema retorna os autovalores, sendo a solução condicionada a n ser um autovalor característico da equação A (SAATY, 2004). Porém, como A tem posto 1, todos seus autovalores exceto 1 são iguais a 0 e a soma de todos os autovalores é igual ao traço da matriz, que é a soma dos elementos diagonais, neste caso igual a n e n é o maior ou principal autovalor de A e w é o principal autovetor associado, pertencendo assim a uma escala (SAATY, 2004).

Para o caso de matrizes inconsistentes, a soma normalizada das colunas da matriz contribui para o vetor final de prioridade e para isto é utilizado a soma de Cesaro e o teorema de Perron, cuja utilização leva às prioridades na forma do principal autovetor (SAATY, 2004). Independentemente do método utilizado para obter os valores w_i , tais valores retornam proporcionais pela expressão:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad i = 1, \dots, n,$$

Onde devemos resolver

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j = c w_i \quad i = 1, \dots, n.$$

Assim, o problema pode ser generalizado para o sistema abaixo

Figura 05: Reprodução da solução genérica para obtenção do vetor prioridade a partir da matriz de comparação entre pares elaborado por Saaty (2004)

$$Aw = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ & & \ddots & \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = cw$$

Fonte: (SAATY, 2004)

Em que o sistema $Aw=cw$ possui solução para w se c é o principal autovalor da matriz A .

A construção do vetor de prioridade por aproximação pode então ser feita por meio da normalização da soma dos valores das linhas do vetor W (AL-SHABEEB; AL-ADAMAT; MASHAGBAH, 2016). Segue-se para o cômputo do número de critérios n trabalhados. Então é feito o produto vetorial entre as linhas da matriz (cada critério) e o autovetor obtido da aproximação anterior (AL-SHABEEB; AL-ADAMAT; MASHAGBAH, 2016). O λ é obtido pela divisão entre os valores do produto vetorial pelo autovetor (AL-SHABEEB; AL-ADAMAT; MASHAGBAH, 2016). Segue-se para o cálculo do $\lambda_{\max}$, que neste caso é a média dos valores de λ e tal valor deve ser próximo do número de fatores computados na análise (AL-SHABEEB; AL-ADAMAT; MASHAGBAH, 2016).

(Al-Shabeeb, Al-Adamat, e Mashagbah, (2016) descreve em sua metodologia a aplicação do método desenvolvido por Saaty com a utilização do AHP. Para o desenvolvimento do trabalho, os autores descrevem o seguinte roteiro metodológico:

- A. Determinação dos critérios de importância;
- B. Avaliação da importância relativa entre os pares por meio da escala absoluta;
- C. Avaliação da consistência do trabalho para derivação da Razão de Consistência (RC).

Para o último passo, a razão de consistência é obtida da seguinte maneira:

- D. Cálculo do vetor de prioridade para um critério;

- E. Cálculo do principal autovalor (lâmbda máximo);
- F. Cálculo do índice de consistência (CI);
- G. Determinação do valor apropriado do índice de consistência aleatório;
- H. Cálculo do RC.

O valor apropriado do índice de consistência aleatório é um valor já pré-definido e tabulado que depende da quantidade n de fatores utilizados na análise. (Al-Shabeeb, Al-Adamat e Mahagbah (2016) utilizam uma tabela de referência adaptada de Saaty (2004) que permite a utilização de até 15 critérios por comparação.

Figura 06: Reprodução da tabela de referência adaptada por Al-Shabeeb, Al-Adamat e Mashagbah (2016) de valores de consistência para uma matriz de comparação de ordem (N)

Number of criteria (N)	1	2	3	4	5	6	7	8
Random consistency indices (RI)	0	0.0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41
Number of criteria (N)	9	10	11	12	13	14	15	
Random consistency indices (RI)	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56	1.57	1.59	

Fonte: (AL-SHABEEB; AL-ADAMAT; MASHAGBAH, 2016)

O cálculo do vetor prioridade por aproximação, de acordo com o descrito por Saaty, resume-se ao cálculo da média dos elementos de cada linha da matriz normalizada da matriz A com relação à soma dos elementos. Para a avaliação do índice de consistência (IC), a fórmula utilizada é de forma:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$$

Sendo o $\lambda_{\max}$ obtido pela média da divisão do produto vetorial e o autovetor, no caso de aproximação.

O cálculo do RC pode então ser realizado pelo quociente entre o IC calculado e o valor de IR tabelado. Como discutido anteriormente, um valor aceitável de RC é aquele correspondente a aproximadamente 10% do valor máximo de consistência. Valores muito superiores a essa porcentagem indicam que os critérios foram selecionados de modo aleatório e podem levar à conclusões não fundamentadas ou que não apresentem significância para o estudo realizado (SAATY, 2004).

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

A aplicação em ambiente GIS pode ser feita para problemas de otimização ou escolha de melhor cenário, e apesar de ser um método antigo, ainda é amplamente utilizado como mecanismo de suporte à decisão. No artigo de revisão dos métodos multicritério feito por Kiker *et al.* (2005), são apresentados modelos de trabalho realizados com a aplicação de AHP

para uma lista de problemas ambientais, sendo que alguns destes utilizaram-se da integração entre AHP e ambientes GIS para espacialização dos indicadores. O autor descreve uma tabela com os métodos de suporte à decisão e o contexto de decisão em que as ferramentas foram utilizadas. Para a ferramenta AHP isolada, são descritos processos de avaliação de impacto ambiental, a gestão de parques nacionais, gestão de florestas e identificação de vulnerabilidades ambientais (KIKER et al., 2005). Para a combinação do AHP e ambiente GIS são descritos processos de avaliação de condições ambientais, escolha de limites de parques e escolha da melhor alternativa para empreendimentos (KIKER et al., 2005).

Como a análise entre os critérios apresenta diferenças entre os valores e as escalas, e serão comparados elementos qualitativos e quantitativos, é necessária a normalização de todos os fatores para utilização de uma mesma escala e, assim, uma comparação válida sem a perda de importância entre os fatores analisados. Para isto, Falcão (2013) utilizou a aplicação de lógica *fuzzy* linear crescente para que cada pixel fosse enquadrado em uma escala de 0 a 1. A aplicação de tal lógica se dá pela necessidade de enquadrar dados georreferenciados quantitativos em uma escala que possibilite a comparação com os dados qualitativos utilizados no trabalho.

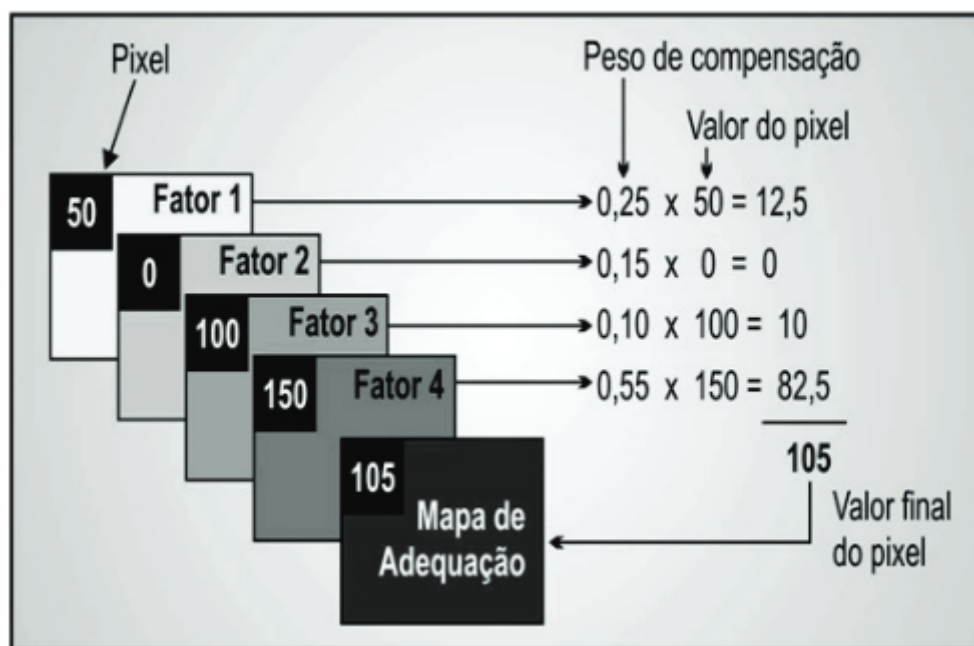
Mrówczyńska et al. (2021) descrevem a necessidade da utilização da lógica *fuzzy* no desenvolvimento de pesquisas científicas pois o avanço tecnológico e teórico de técnicas de análises multicriteriais possibilitou a cobertura de critérios em diferentes escalas dentro de um mesmo *framework* e, a partir da aplicação de uma transformação matemática (*fuzzy*) e normalização dos resultados é possível realizar a comparação entre tais critérios. Diversos trabalhos vêm sendo produzidos com temáticas de planejamento urbano, avaliação de impactos e projeção de cenários vêm sendo produzidos a partir da aplicação da lógica *fuzzy* em combinação com o método AHP de AMDA (MRÓWCZYŃSKA et al., 2021).

A tese de doutorado de Falcão (2013) afirma que existem três funções *fuzzy* que são amplamente utilizadas: Linear, sigmoidal e J-shaped, crescentes ou decrescentes.

Segundo Sartori, Silva e Zimback (2012) o método de Combinação Linear Ponderada é um dos mais empregados para avaliação multicritérios. O mesmo também foi encontrado por Kiker et al. (2005), que apresenta em sua tabela resumo um compilado de principais exemplos do emprego de técnicas de análise multicriterial. No artigo de Kiker et al. (2005) é argumentado que o método MAVT transforma valores de diversos critérios em uma escala que varia de 0 a 1 de valor adimensional, que permite a comparação eficaz entre os parâmetros selecionados nos estudos, desde que a seleção seja feita de maneira condizente. O método também parte da premissa de que as decisões são tomadas de maneira racional, ou

seja, maior valor é preferido em comparação com menor valor), as preferências não são alteradas e o órgão decisor tem conhecimento sobre o tema o qual está decidindo (KIKER et al., 2005).

Figura 07: Reprodução de fluxograma para aplicação do método de pesos ponderados proposto por Sartori, Silva e Zimback (2012).



Fonte: (SARTORI; SILVA; ZIMBACK, 2012)

A aplicação ocorre pela combinação dos valores ponderados obtidos pela normalização dos indicadores obtidos em etapas anteriores (tanto qualitativos quanto quantitativos). Para cada camada georreferenciada de critério os valores de pixel são multiplicados pelo valor final obtido na atribuição de pesos e combinados de acordo com a equação definida Falcão (2013). No caso deste trabalho, a equação escolhida foi a soma simples do valor final dos pixels ponderados.

A evolução rápida e desordenada da malha urbana do município de São Carlos acarretou pressões e impactos sobre recursos naturais e a população, sendo que os espaços degradados não são alvo de políticas públicas de recuperação e mitigação (STANGANINI; LOLLO, 2018). A população estimada para São Carlos em 2050 é de 392.385 habitantes (COSTA et al., 2013). Após a promulgação das restrições de ocupação de determinadas áreas no Plano Diretor de 2005 (Lei Municipal 13.691/2005) houve expansão da malha urbana e impermeabilização do solo nos mananciais do Rio do Monjolinho e do Ribeirão do Feijão, principais mananciais de captação superficial de água no município (COSTA et al., 2013).

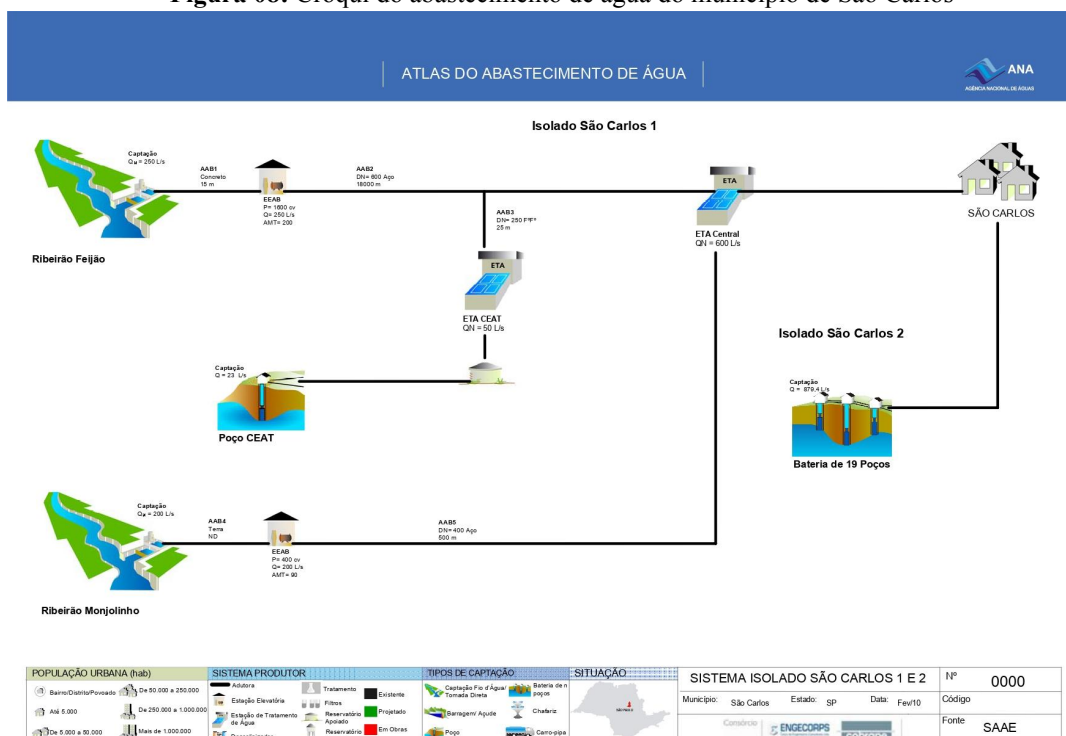
Entre os anos de 2010 e 2015 houve a remoção de vegetação em áreas de preservação permanente e ocupação das margens dos rios para construção de novas ruas, por meio de

processos de ocupação irregulares e fora do previsto no Plano Diretor, apontando que não foram respeitadas as zonas de expansão previstas no PD (STANGANINI; LOLLO, 2018).

A revisão do Plano Diretor feita em 2016 incorporou mais elementos com relação à fatores ambientais, restrições de ocupação e medidas visando promover a proteção, conservação e recuperação de mananciais de captação de água superficial, instituindo também zonas para preservação de futuros pontos de captação de água superficial (SÃO CARLOS (SP), 2016).

A distribuição mensal de precipitação no município de São Carlos está concentrada nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, abrangendo também os eventos extremos (SANCHES et al., 2017). As principais notícias veiculadas em portais de notícias locais confirmam a hipótese confirmam a tese anterior por meio do relato de episódios de inundações e alagamentos concentrados nos meses supracitados no intervalo de 1980 a 2009 (LIMA; AMORIM, 2015)

A Agência Nacional de Águas (ANA) elaborou o Atlas Água, que contém informações a respeito da avaliação de todos os mananciais e sistemas de abastecimento urbano de água (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2022). Como a população apresentou crescimento durante esse período, espera-se que o consumo de água tenha se elevado, também (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2017). É apresentado um croqui do sistema de coleta de água do município na Figura 08.

Figura 08: Croqui do abastecimento de água do município de São Carlos

Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2022)

A rede de abastecimento superficial do município conta com 2 rios e o abastecimento municipal está sujeito às alterações causadas nestes rios, o que inclui tanto a qualidade da água quanto a vazão. Conforme discutido anteriormente, o avanço da mudança de uso e cobertura do solo pode trazer problemas para a manutenção do rio, em especial em áreas à jusante, caracterizadas por áreas agrícolas no município. Além disso, também há coleta de água em 31 poços especializados pelo município, que retiram água dos lençóis freáticos. Devido ao alto escoamento superficial induzido pela impermeabilização e degradação dos espaços, isto pode ser um problema futuro, tendo em vista que os 31 poços apresentam a maior vazão total de todo o sistema.

4.2. Coleção de artigos e informações pertinentes ao desenvolvimento do trabalho

4.2.1. Artigos, Documentos e Leis

A coleta foi realizada de acordo com o descrito na metodologia. Foram coletados ao todo 103 artigos e documentos, dos quais foram encontrados relação com o trabalho desenvolvido em 29 destes, que constam na seção 'Referências bibliográficas'.

Os artigos que apresentaram relação foram lidos e apresentados ao longo do documento, concentrados na seção 'Revisão de Literatura'.

4.2.2. Aquisição de dados

Foi feito o levantamento de dados georreferenciados do município de São Carlos a partir das bases disponibilizadas no Brasil. Foram aquisitados dados do IBGE, Prefeitura de São Carlos, arquivos fornecidos pelo Instituto de Arquitetura e Urbanismo, USGS (*United States Geology Survey*), Estado de São Paulo, Suzantur, INPE, MapBiomas e DataGeo. Os arquivos obtidos foram então submetidos à validação de geometria para garantir que sua utilização no processamento dos dados não apresentariam problemas de incompatibilidade ou erros nas aplicações dos algoritmos. Além disso, também foram obtidas as documentações de planejamento municipal, regional e estadual para análise da conjuntura e contexto do local objeto de estudo. As documentações foram obtidas nos portais do Estado de São Paulo e da Prefeitura Municipal de São Carlos e comitês de bacias hidrográficas.

Alguns dos arquivos obtidos não estavam em formato vetorizado para manipulação em ambiente GIS, então foi necessário realizar o georreferenciamento dos dados a partir das cartas disponíveis e dados amarrados ao solo, principalmente aqueles disponibilizados nos anexos do Plano Diretor e dados municipais. Para os arquivos que não estavam atualizados ou com defasagem de informações, foi feita a atualização e correção de geometrias.

Após a correção e validação dos dados, foi feita a reprojeção de todos os arquivos em ambiente GIS para o DATUM SIRGAS 2000 e projeção UTM Zona 23s para converter todos os dados coletados em uma única projeção e realizar os processamentos de imagens com maior precisão. A reprojeção também foi feita com o objetivo de converter as unidades de graus para metros e permitir melhores análises pós-processamento.

4.3. Caracterização do município de São Carlos quanto aos temas selecionados

4.3.1. Pedologia em São Carlos

Segundo o mapeamento feito por Rossi (2017), o município de São Carlos está inserido em oito (8) categorias de subordem pedológicas. São elas: Argissolos vermelhos, Gleissolos Háplicos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Latossolos Vermelhos, Neossolos Litólicos, Neossolos Litólicos, Neossolos Quartzarênicos, Nitossolos Vermelhos e Organossolos Háplicos, Além disso, o autor também inclui duas categorias na classificação feita dentro do recorte municipal: Área Urbana e Rios, Represas e Lagoas.

Os Argissolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural com argila de atividade baixa imediatamente abaixo do A ou E (VALLADARES,

2003). Especificamente os Argissolos Vermelhos são mais vermelhos nos primeiros 100cm do horizonte B (VALLADARES, 2003).

Os Gleissolos são solos constituídos por material mineral com horizonte glei imediatamente abaixo de horizonte A, ou de horizonte hístico com menos de 40cm de espessura; ou horizonte glei começando dentro de 50cm da superfície do solo (VALLADARES, 2003).

Os Latossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200cm da superfície do solo ou dentro de 300cm, se o horizonte A apresenta mais que 150cm de espessura (VALLADARES, 2003).

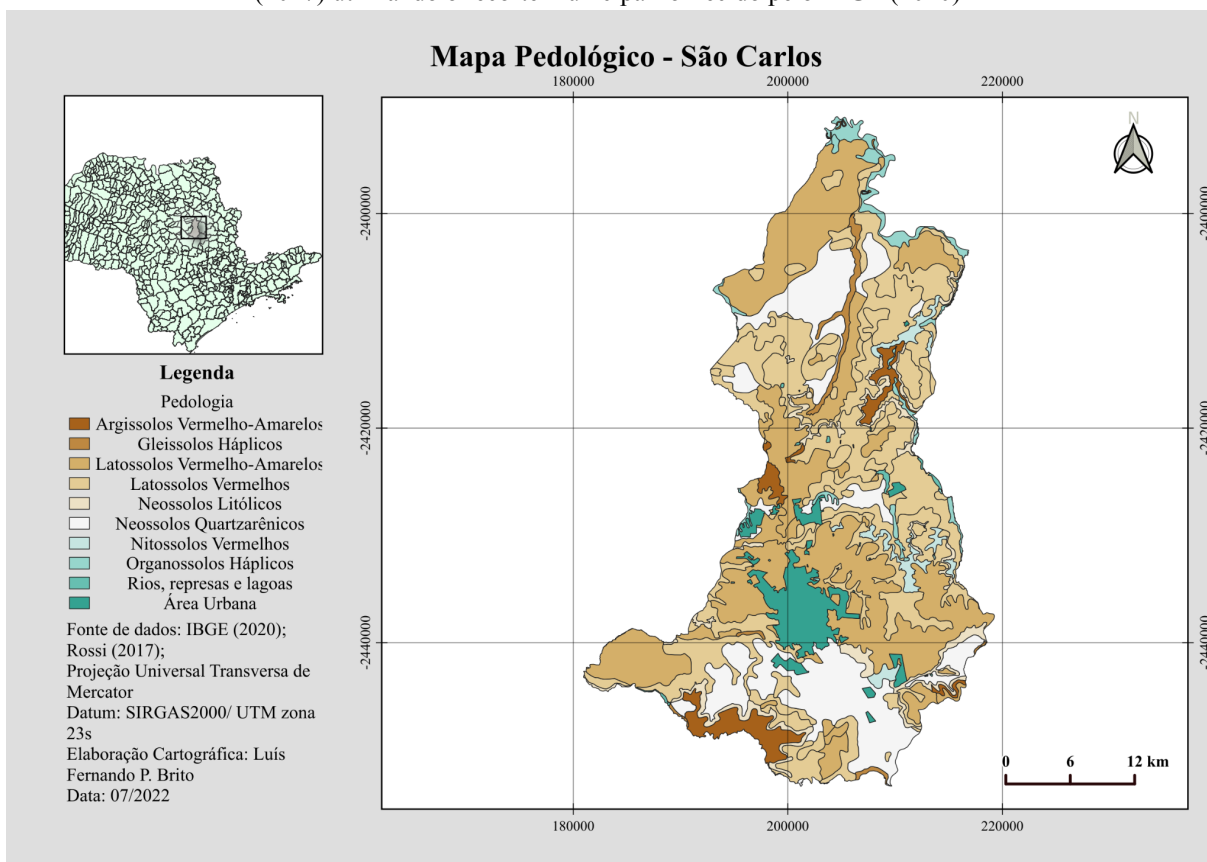
Neossolos são solos pouco evoluídos, que se dividem em três classes: Neossolos Flúvicos, Neossolos Quartzarênicos e Neossolos Litólicos (VALLADARES, 2003). Os Neossolos Litólicos são solos com horizonte A ou O hístico com menos de 40cm de espessura, assente diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr, ou sobre material com 90% (por volume), ou mais de sua massa constituída por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2mm (cascalhos, calhaus e matações) e que apresentam um contato lítico dentro de 50cm de superfície do solo (VALLADARES, 2003). Já os Neossolos Quartzarênicos são solos solos com seqüência de horizontes A-C, sem contato lítico dentro de 50cm de profundidade, apresentando textura areia ou areia franca nos horizontes até, no mínimo, a profundidade de 150cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico (VALLADARES, 2003).

Os Nitossolos Vermelhos são solos constituídos por um material mineral que apresentam horizonte B nítico, com argila de atividade baixa imediatamente abaixo do horizonte A ou dentro dos primeiros 50cm do horizonte B (VALLADARES, 2003).

Os organossolos são solos constituídos por matéria orgânica, que apresenta horizonte O ou H hístico com espessura mínima de 40cm (VALLADARES, 2003). Os organossolos háplicos são aqueles que apresentam teor de matéria orgânica maior ou igual a 0,65kg/kg de solo e Ds menor ou igual a 0,15 Mg/dm³ (VALLADARES, 2003).

As áreas classificadas como Urbana são aquelas que apresentam alteração de solo para construção civil, e inclui zonas de grande teor de ocupação, típicas de centros urbanos.

Figura 09: Mapa pedológico do município de São Carlos/SP elaborado com dados apresentados por Rossi (2017) utilizando o recorte municipal fornecido pelo IBGE (2020)

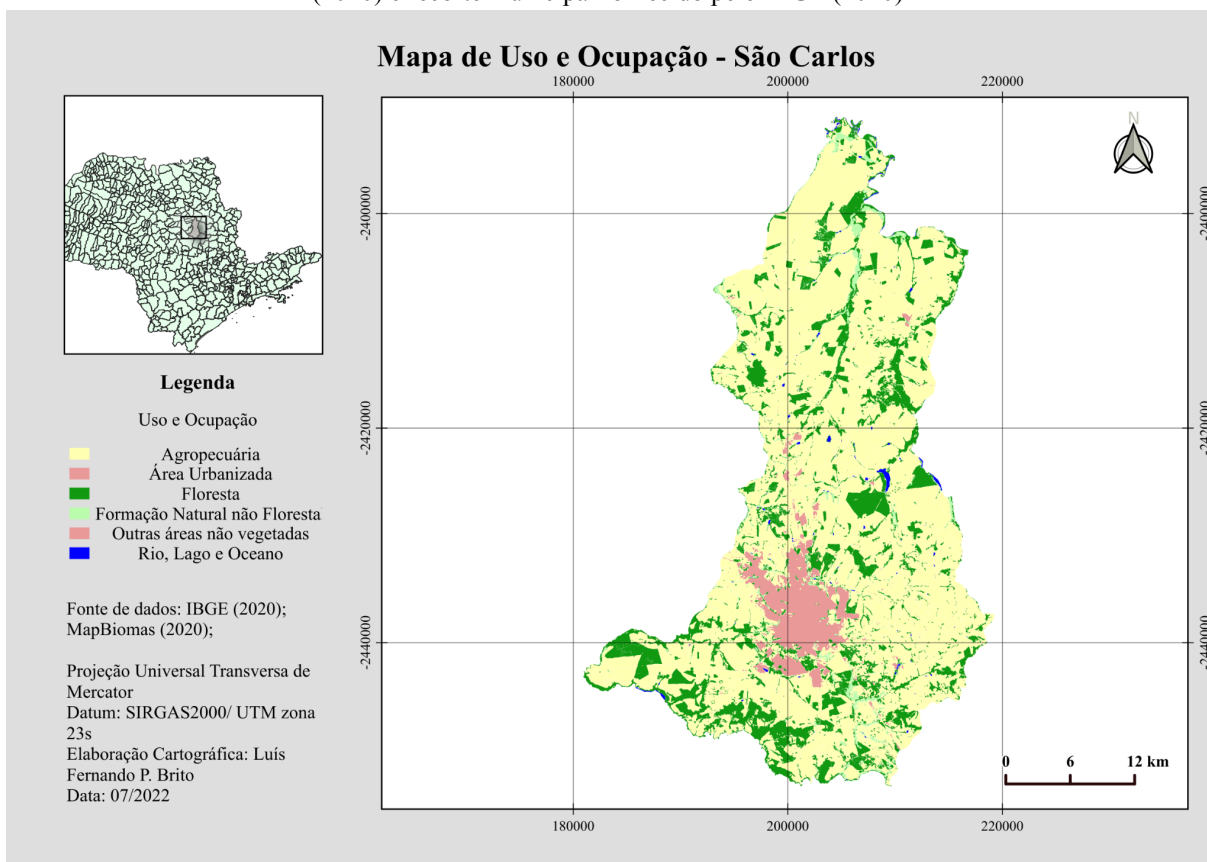


Fonte: Autor (2022); Rossi (2017); IBGE (2020)

4.3.2. Uso e ocupação MapBiomias

A coleção MapBiomias apresenta um compilado de informações processadas de grande utilidade para análises espaciais. A coleção 5 de Uso e Ocupação traz a classificação de imagens do satélite Landsat para cada ano (Mapbiomas Brasil | Coleções MapBiomias, 2017). A classificação feita divide os usos em cinco classes principais: Floresta, Formação Natural Não Florestal, Agropecuária, Área não Vegetada e Corpos D'água. Dentro de cada classe é feito mais um nível de classificação, que não foi utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 10: Mapa de Uso e Ocupação elaborado com o mapeamento realizado pela Coleção 05 do MapBiomas (2020) e recorte municipal fornecido pelo IBGE (2020)



Fonte: Autor (2022); IBGE (2020); MapBiomas (2020)

Para o recorte municipal de São Carlos foram identificadas todas as principais classes elaboradas pela Instituição. A maior parte da parte rural do município encontra-se em áreas de Agropecuária. Foi utilizada a classificação de solo feita pela Instituição realizada no ano de 2020.

4.3.3. NDVI

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um índice utilizado para avaliação da qualidade da cobertura vegetal, a partir do cálculo de métricas em ambientes GIS. Consiste na aplicação de processos de realce por operações matemáticas entre bandas de sensores (MELO; SALES; OLIVEIRA, 2011). É uma ferramenta utilizada na estimativa de biomassa, estimativa de cobertura vegetal e detecção de mudanças de padrão de uso e cobertura da terra (MELO; SALES; OLIVEIRA, 2011).

O cálculo do índice é feito pela equação abaixo:

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

O valor obtido a partir da equação acima flutua entre -1 e 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam maior densidade de cobertura vegetal e, valores mais próximos de -1 indicam a existência de corpos hídricos ou água (MELO; SALES; OLIVEIRA, 2011). Para solos expostos ou vegetação baixa, o valor obtido da equação fica próximo de 0, do lado dos números positivos, além de áreas urbanas (MELO; SALES; OLIVEIRA, 2011).

4.3.4. Dados Municipais

4.3.4.1. PLANO DIRETOR DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS

Esta seção dedica-se a revisão do Plano Diretor do município de São Carlos e ao destaque das principais diretrizes com relação ao tema ambiental e as zonas destinadas à preservação de mananciais de abastecimento hídrico, previstas dentro do planejamento aprovado na Lei 18.053/2016 (SÃO CARLOS (SP), 2016).

O art. 2º define entre os princípios que regem a Política de Desenvolvimento Urbano e Plano Diretor Estratégico, no inciso VI o Direito ao Meio Ambiente Ecologicamente Equilibrado e no inciso I o Função Social da Cidade e, no §1º especifica dentre as funções a qualidade de vida, serviços públicos e o saneamento ambiental. No mesmo artigo, §6º descreve atividades de interesse urbano e rural, dentre os quais é destacada a alínea h, que dispõe sobre a preservação dos recursos naturais necessários à vida urbana e rural, incluindo mananciais e corpos d'água.

Conforme capítulo 1, art. 3º inciso VIII, o Plano de Desenvolvimento Urbano e o Plano Diretor se orientam pelo objetivo, não exclusivamente, da contribuição da universalização do abastecimento de água. Já no inciso X estabelece que também se orienta para proteger as áreas de preservação permanente, unidades de conservação, áreas de proteção dos mananciais e biodiversidade.

O artigo 4º destaca que, dentre as principais funções do ordenamento territorial do Município, entre outras, são:

Art.4 - Inc. II:

[...]

B) Proteger e recuperar as áreas de mananciais responsáveis pelo abastecimento de água no Município;

C) Identificar áreas com características ambientais relevantes.

[...]

No Título II, que dispõe sobre o ordenamento territorial, capítulo II, que dispõe sobre o zoneamento municipal, art.10 são definidas as zonas e eixos e é conformado por:

- I - Eixo estruturante;
- II - Zona 1 - Ocupação consolidada;
- III - Zona 2 - Ocupação Induzida;
- IV - Zona 3 - Ocupação Condicionada;
- V - Zona 4 - Qualificação e Ocupação Controlada;
- VI - Zona 5 - Proteção e Ocupação Controlada:
 - A) 5A - Proteção e Ocupação Controlada SUC Monjolinho-Espraiado
 - B) 5B - Proteção e Ocupação Controlada SUC Manancial do Ribeirão Feijão.
- VII - Zona 6 - Regulação e Ocupação Controlada:
 - A) 6A - Regulação e Ocupação Controlada de Maior Densidade;
 - B) 6B - Regulação e Ocupação Controlada de Média Densidade;
 - C) 6C - Regulação e Ocupação Controlada de Menor Densidade;
 - D) 6D - Regulação e Ocupação Controlada de Indústrias e Serviços.
- VIII - Zona 7 - Proteção, Regulação e Ocupação Específica;
- IX - Zona 8 - Proteção e Ocupação Restrita:
 - A) 8A - Proteção e Ocupação Restrita do Monjolinho-Espraiado;
 - B) 8B - Proteção e Ocupação Restrita do Manancial Ribeirão Feijão.
- X - Zona 9 - Zona Multifuncional Rural:
 - A) 9A - Multifuncional Rural;
 - B) 9B - Multifuncional Rural e de Proteção Hídrica.

O Plano Diretor especifica para cada zona descrita acima determinadas condições de habitação e diretrizes para a utilização. Dentro disso, são destacadas aqui:

Art. 28. São diretrizes para a Zona 4 - Qualificação e Ocupação Controlada:

I - Recuperar e qualificar os elementos urbanos, sociais e ambientais.

[...]

Art. 31. A Zona 5 - Proteção e Ocupação Controlada corresponde às regiões de proteção dos mananciais do Monjolinho-Espraiado e do Ribeirão do Feijão que se encontram dentro do perímetro urbano.

Parágrafo único. São áreas que demandam restrição e orientações específicas à ocupação, a fim de evitar o adensamento construtivo e populacional das referidas regiões e os impactos ambientais deles decorrentes.

Art. 32. São Diretrizes para a Zona 5 - Proteção e Ocupação Controlada:

[...]

II - Preservar e proteger os principais pontos de captação de água do Município;

III - Prever e controlar densidades demográficas e de ocupação de solo urbano, como medida para a gestão do bem público, da oferta de abastecimento público e da conservação do meio ambiente;

IV - Garantir a melhoria do sistema público de saneamento ambiental;

V - Prevenir e corrigir os processos erosivos;

VI - Proteger e recuperar as Áreas de Preservação Permanente, em atendimento ao que rege a legislação federal, estadual e municipal, bem como em conformidade com a Lei Municipal nº 13.944, de 12 dezembro de 2006, e suas alterações.

Art. 34. A zona 5 - Proteção e Ocupação Controlada subdivide-se em:

I - Zona 5A - Proteção e Ocupação Controlada SUC Monjolinho-Espraiado;

II - Zona 5B - Proteção e Ocupação Controlada SUC Ribeirão do Feijão.

Art. 39. A Zona 6A - Regulação e Ocupação Controlada de Maior Densidade é a área localizada a oeste do perímetro urbano e caracterizada pela aptidão à urbanização, devido à proximidade da infraestrutura existente e pelas características ambientais, notadamente de solo e hidrografia, bem como as áreas urbanizáveis do entorno imediato do Distrito de Água Vermelha, necessitando de uma correta ocupação para preservação da qualidade de vida e do ambiente.

Art. 43. A Zona 6B - Regulação e Ocupação Controlada de média Densidade localiza-se próxima à malha urbana consolidada, em áreas com aptidão à urbanização, porém com características físico ambientais que exigem um controle na ocupação e adensamento planejado, abrangendo:

I - Região da bacia do Santa Maria do leme que ainda se encontra não urbanizada, área com boa aptidão à urbanização, desde que com ocupação controlada e adensamento planejado, devido ao importante papel hidrológico da bacia;

[...]

Art. 47. A Zona 6C - Regulação e Ocupação Controlada de Menor Densidade localiza-se em regiões periféricas à área urbana consolidada, em áreas que necessitam de uma

urbanização controlada com baixos índices de ocupação e densidade, devido às suas características físico-ambientais e de infraestrutura [...].

Art. 51 - A Zona 6D - Regulação e Ocupação Controlada de Indústrias e Serviços corresponde às áreas destinadas ao uso de logística, serviços e indústrias de médio e grande porte, aproveitando a proximidade das infraestruturas existentes, tais como rodovias, ferrovias e aeroporto, ou a capacidade de suporte da área, e incluindo inclusive atividades com grau de incomodidade incompatível com o uso habitacional, abrangendo as áreas abaixo descritas, conforme demarcação no Anexo 3 desta Lei [...].

Art. 55. A Zona 7 - Proteção, Regulação e Ocupação Específica se caracteriza por envolver ou estar próxima a diversos loteamentos de chácaras de recreio existentes, pela presença de importantes áreas verdes nativas remanescentes e Áreas de Preservação Permanente (APPs), e ainda por ocuparem terrenos que estão em boa parte sobre solos arenosos ou próximos a áreas alagadiças.

Art. 59. A Zona 8A - Proteção e Ocupação Restrita do Monjolinho-Espraiado corresponde à região da bacia do Monjolinho que se encontra fora do perímetro urbano, área de recarga de uma das principais captações superficiais de água da cidade.

Parágrafo único. Esta Zona estará em conformidade com a Lei Municipal nº 13.944, 12 de dezembro de 2006 e suas alterações, incluindo-se na Subárea de Uso e Ocupação Diferenciada (SUD)

Art. 60. São diretrizes para a Zona 8A - Proteção e Ocupação Restrita do Monjolinho-Espraiado:

- I - Preservar e proteger o manancial do Monjolinho-Espraiado, um dos principais pontos de captação de Água do Município
- [...]

Art. 63. A Zona 8B - Zona de Proteção do Manancial do Ribeirão do Feijão corresponde à proteção de um dos principais pontos de captação de água superficial do Município, responsável por 70% (setenta por cento) da captação de água bruta superficial da cidade.

Parágrafo Único. Esta Zona está em conformidade com a Lei Municipal 13.944, de 12 de dezembro de 2006, e suas alterações, coincidindo com a Subárea de Baixa Densidade (SBD), composta predominantemente por espaços livres e áreas verdes destinadas preferencialmente a sítios, chácaras de lazer e turismo local, localizados a montante da captação do Ribeirão do Feijão, e ainda se inclui na APA do Corumbataí.

Art. 67. A Zona 9A - Zona Multifuncional Rural corresponde às áreas rurais do Município, com maior vocação para o desenvolvimento de atividades agrícolas, e nas quais não é permitida a expansão urbana e parcelamento do solo em dimensões menores que 20.000 m².

Art. 69. A Zona 9B - Zona Multifuncional Rural e de Proteção Hídrica corresponde às áreas rurais do Município que, além da vocação agrícola e a restrição à expansão urbana ou parcelamento do solo em dimensões menores que 20.000 m², apresentam mananciais com potencial de se tornarem fontes de abastecimento hídrico em médio prazo, necessitando assim de uma maior proteção de seus mananciais, abrangendo:

- I - Na região lestes do município, as microbacias que conformam o ribeirão dos Negros, à montante da represa do 29, na Bacia do Quilombo, e a própria bacia deste, à montante da represa da Barra, sendo ambas represas consideradas com potencial de instalação de Estação de Captação de Água;
- II - Na região Sul do Município, a Bacia do Jacaré-Guaçu, com potencial de vazão para ser instalada uma futura Estação de Captação de Água.

Art. 71. As Áreas de Especiais Interesses compreendem porções do território que demandam tratamento diferenciado por destacar determinadas peculiaridades, cumprindo funções especiais no planejamento e no ordenamento do território, complementando o zoneamento por meio de normas ou diretrizes específicas quanto ao uso e ocupação do solo, visando:

[...]

- II - Identificar a ocorrência de áreas com vocações, potencialidades ou problemáticas comuns;

[...]

Art. 72. São Áreas de Especial Interesse:

- I - Áreas de Interesse Ambiental;
- II - Áreas Especiais de Controle e Recuperação Ambientais;
- [...]
- X - Áreas de Interesse Turístico, Histórico, Cultural e Ecológico;
- [...]

Art. 73. As Áreas de Interesse Ambiental são porções do território destinadas a:

- I - Proteger e recuperar os mananciais, nascentes e APPs;
- II - Proteger a biodiversidade, áreas com vegetação significativa ou reflorestamento de espécies nativas;

[...]

IV - Contribuir para a adequada drenagem de água pluvial no território do Município, prevenindo enchentes, erosões e promovendo a recarga dos reservatórios de águas subterrâneas;

[...]

Art. 74. As Áreas de Interesse Ambiental são demarcadas no Anexo 05 desta Lei e descritas [...].

Art. 75. As Áreas Especiais de Controle e Recuperação Ambientais são porções do território que passaram por distintas intervenções antrópicas que causaram ou apresentam potencial de causar danos ambientais, e que necessitam de medidas específicas de controle e recuperação ambientais para que voltem a apresentar condições próximas das anteriores às intervenções, com objetivo de que as mesmas tenham a possibilidade de se transformar em futuras áreas de preservação ambiental ou destinadas a parques e equipamentos públicos de uso coletivo, ou usos privados adequados após recuperação consolidada.

Art. 109. São Áreas de Interesse Turístico, Histórico, Cultural e Ecológico aquelas destinadas à preservação de sítios de interesse cultural, ecológico e turístico, compostos por imóveis, construções e paisagens rurais, objetivando a preservação, valorização e utilização dos mesmos [...].

4.3.4.2. Lei nº 13.944, de 12 de dezembro de 2006

A Lei instituiu a criação das Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais do Município - APREM (SÃO CARLOS (SP), 2006). Desta Lei, são destacados os artigos abaixo:

Art. 1º. Ficam instituídas as Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais do Município de São Carlos - APREM/SC, como áreas de relevante interesse ambiental municipal, destinadas ao cumprimento da função social e ambiental de proteção, preservação e conservação do abastecimento de água com qualidade.

Parágrafo único. As delimitações das APREM/SC [...] correspondem à:

I - Bacia Hidrográfica do Córrego Monjolinho a montante da Estação de captação de água do Espraiado;

II - Bacia Hidrográfica do Ribeirão Feijão, dentro do município de São Carlos, a montante da Estação de Captação de Água para abastecimento público de São Carlos.

Art. 4º. São objetivos desta Lei:

I - Promover o pleno desenvolvimento da função social de abastecimento da população, por meio da proteção e recuperação da qualidade e da quantidade das águas superficiais que compõem as APREM/SC, principalmente, através da recomposição da vegetação ciliar, ripária ou de galeria;

II - Implementar a gestão participativa das APREM/SC integrando setores e instâncias governamentais e a sociedade civil, com vistas à proteção e recuperação destes mananciais;

[...]

III - Garantir os instrumentos que proporcionem a articulação dos programas e políticas municipais, especialmente os referentes à habitação, transporte, saneamento ambiental, infraestrutura e manejo dos recursos naturais à preservação do meio ambiente.

Art. 7. Ficam criadas as seguintes Áreas de controle nas APREM/SC para a aplicação de dispositivos normativos de proteção, conservação e recuperação dos mananciais e implementação de políticas públicas:

I - Áreas de Preservação;

II - Áreas de Ocupação Dirigida;

III - Áreas de recuperação Ambiental

Art. 9. São áreas de Preservação, além das definidas por lei como de preservação permanentes, aquelas de interesse para a proteção dos mananciais e para a preservação, conservação e recuperação dos recursos naturais da bacia, compreendendo as seguintes Subáreas: [...].

Art. 10. Considera-se de Preservação Permanente:

I - As áreas, vegetadas ou não, situadas:

a. Ao longo dos rios ou de qualquer curso d'água desde o seu nível mais alto em faixa marginal cuja largura mínima seja de 50m em cada margem;

b. As nascentes, ainda que intermitentes e nos "olhos d'água", qualquer que seja a sua situação topográfica, num raio mínimo de 70m de largura;

[...]

3. As encostas ou parte destas, com declividade superior a 45°;

4. As bordas dos tabuleiros ou chapadas, a partir da linha de ruptura do relevo, em faixa nunca inferior a 100m em projeções horizontais

[...]

Art. 11. São admitidos nas SAPRE sem prejuízo de restrições estabelecidas em outras legislações mais restritivas desde que autorizadas ou licenciadas pelos órgãos competentes:

[...]

II - Instalação de drenagem, captação e abastecimento de água, coleta, transporte e afastamento de efluentes;

Serviços e obras destinados à proteção, preservação ou recuperação do manancial, à regularização das vazões e ao controle de cheias e inundações

Art. 26. São Áreas de Recuperação Ambiental - ARA, aquelas cujos usos ou ocupações estejam comprometendo a fluidez, potabilidade, quantidade ou qualidade dos mananciais de que trata esta Lei e que necessitem de intervenção de caráter corretivo

Art. 29. O Sistema de Saneamento Ambiental deverá garantir que cargas poluidoras não comprometam a qualidade e a quantidade das águas dos mananciais.

Parágrafo único. A implantação de infraestrutura e a continuidade da prestação de serviços deverão ser priorizadas nas APREM/SC de modo a assegurar o disposto no *caput* deste artigo.

4.3.4.3. Interpretação dos Dados Municipais

A leitura e compreensão tanto do Plano Diretor (Lei nº 18.053/2016) quanto da Lei dos Mananciais (Lei nº 13.944/2006), ambas vigentes no município de São Carlos leva à compreensão que existem aparatos de suporte à sustentabilidade e preservação tanto dos mananciais quanto dos remanescentes de vegetação nativa. A legislação vigente para o Município é mais restritiva do que a Federal em relação aos componentes ambientais e, portanto, vale a Municipal.

Tanto o PD quanto a Lei dos Mananciais estabelecem áreas prioritárias para a conservação. São especialmente destacadas medidas legais para a proteção dos mananciais de abastecimento municipal (compreendida pela Zona 8A), proteção de áreas de captação de água superficial (compreendida pela Zona 8B) e também de áreas que possam ser futuramente utilizadas para abastecimento de água (Compreendida pela Zona 9B).

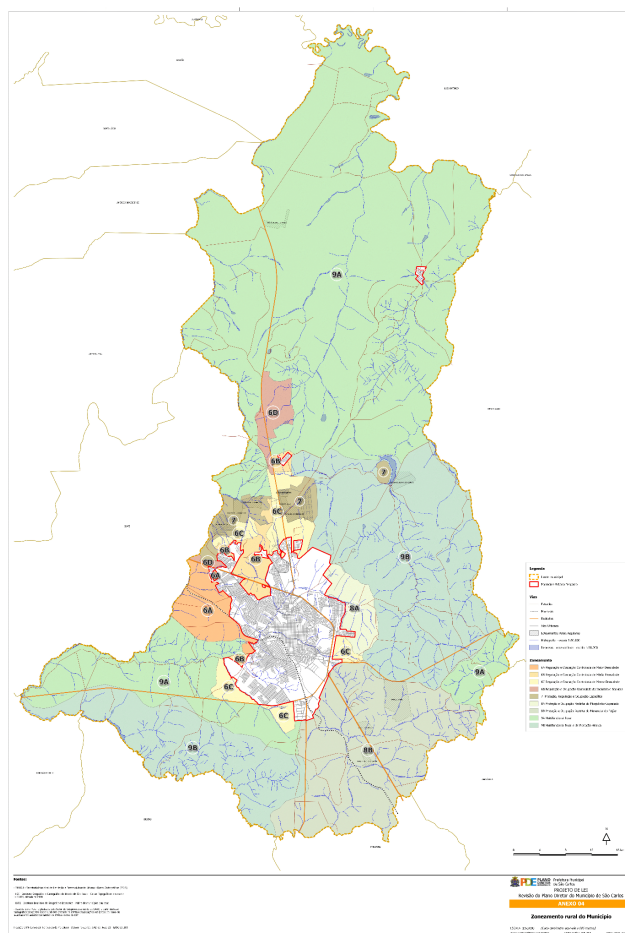
Pode-se assumir então que existe em certo nível a preocupação dos gestores com a preservação das áreas responsáveis pelo abastecimento, mas deve-se avaliar se tais medidas

estão sendo eficazes para garantir o abastecimento hídrico no Município, para os dias de hoje e para o longo prazo. Nos mapas disponíveis no portal da Prefeitura Municipal, é possível notar que a espacialização das Zonas de Proteção aos Mananciais (8 e 9) estão nos arredores da malha urbana ao Norte, Leste e Sul, compreendendo uma malha hidrográfica grande. A Zona de Proteção mais próxima da malha urbana é a 8A, localizada diretamente ao Leste da malha urbana. No Anexo 05 do Plano Diretor, é apresentado o mapa das AEIS ambientais, concentradas principalmente na Zona 8B e 8A. Não são representadas nos mapas disponíveis, nem no Plano Diretor AEIAs compreendendo a Zona 9A e 9B, que de acordo com o Art. 69 da Lei 18.053/2016 estabelece que são áreas com interesse para o abastecimento futuro do município.

Nota-se então que, por mais que exista o arcabouço jurídico que proteja os mananciais, áreas de recarga e cursos hídricos no Município, ainda faltam mais áreas destinadas à proteção de tais mananciais.

Embora ainda não sejam utilizadas, as Zonas 9B e, mais especificamente, as áreas de contribuição para o fluxo de água de tal zona deve ser preservada para a boa manutenção das áreas que já possuem expectativas de utilização para abastecimento público.

Figura 11: Zoneamento aprovado pela Lei Municipal 18.053/2016 (Revisão do Plano Diretor) disponibilizado em PDF no portal da Prefeitura Municipal de São Carlos/SP



Fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos (2016)

4.3.5. Construção do framework

Com base na revisão bibliográfica feita foram identificados fatores que agravam a situação hídrica de São Carlos, sendo os principais a alteração da utilização do solo e a expansão da malha urbana em direção a áreas que já apresentam fragilidades ambientais e encontram-se degradadas (COSTA et al., 2013; PONS; PEJON; ZUQUETTE, 2007). Tais fatores, além de impedirem a recarga de aquíferos, aumentam o escoamento superficial, com efeitos sobre a população municipal, conforme apontado por (LIMA; AMORIM, 2015).

Isso, somada à precipitação característica do município causa sob o sistema hídrico, principalmente nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro (período com maior incidência de chuvas extremas) pressões, principalmente nas áreas mais ambientalmente frágeis (SANCHES et al., 2017).

A revisão revelou um número significativo de artigos que apontam que o Plano Diretor Municipal deve tornar-se mais restritivo, limitando a expansão do município para áreas com remanescentes de vegetação e áreas de recarga. No entanto, Stanganini e Lollo (2018)

apontam que embora o Plano Diretor estipule áreas restritas, estas não são respeitadas e há de fato expansão da malha urbana nesta área, de maneira desordenada. Deste modo, a maior restrição no Plano Diretor poderá não surtir efeito, sendo necessário encontrar outras maneiras de lidar com a impermeabilização de áreas de interesse ambiental.

A partir da análise dos artigos estudados, foi identificada a necessidade de inicialmente compreender os fatores físicos que determinam a área de estudo: Relevo, Precipitação, Pedologia. Após, o estudo das alterações antrópicas e sua relação com o local inserido, eixos de expansão municipal, expansões previstas e também as que estão em desacordo com os planos municipais. Também faz-se necessário analisar a maneira na qual a legislação vigente exerce influência sobre a área de estudo.

Foram identificados três eixos que exercem influência sobre o sistema de abastecimento hídrico no município de São Carlos, com impactos sobre a resiliência do sistema hídrico: Eixo físico, Legislativo e Social. Estão compreendidos no eixo físico os fatores naturais (pedologia, vegetação e fluxo acumulado de água), dentro do Eixo Legislativo estão o arcabouço legal e o Plano Diretor e no eixo Social o Uso e Ocupação do solo.

4.3.6. Hierarquização dos critérios

A partir da revisão bibliográfica feita pôde-se identificar cinco principais fatores dentro de diversos utilizados em análises prévias. Conforme discutido anteriormente, buscou-se elaborar e avaliar um *framework* de trabalho que englobasse fatores das esferas sociais, ambientais e políticas. Foram selecionados diante a revisão bibliográfica feita os fatores: Uso e Ocupação de Solo, Plano Diretor de São Carlos (2016), Fluxo Acumulado, Pedologia e NDVI.

Dentre os fatores selecionados para o *framework*, tanto a Pedologia e o Fluxo Acumulado são critérios que são pouco alteráveis e se constituem por características derivadas de formações geológicas e alterações por intemperismo.

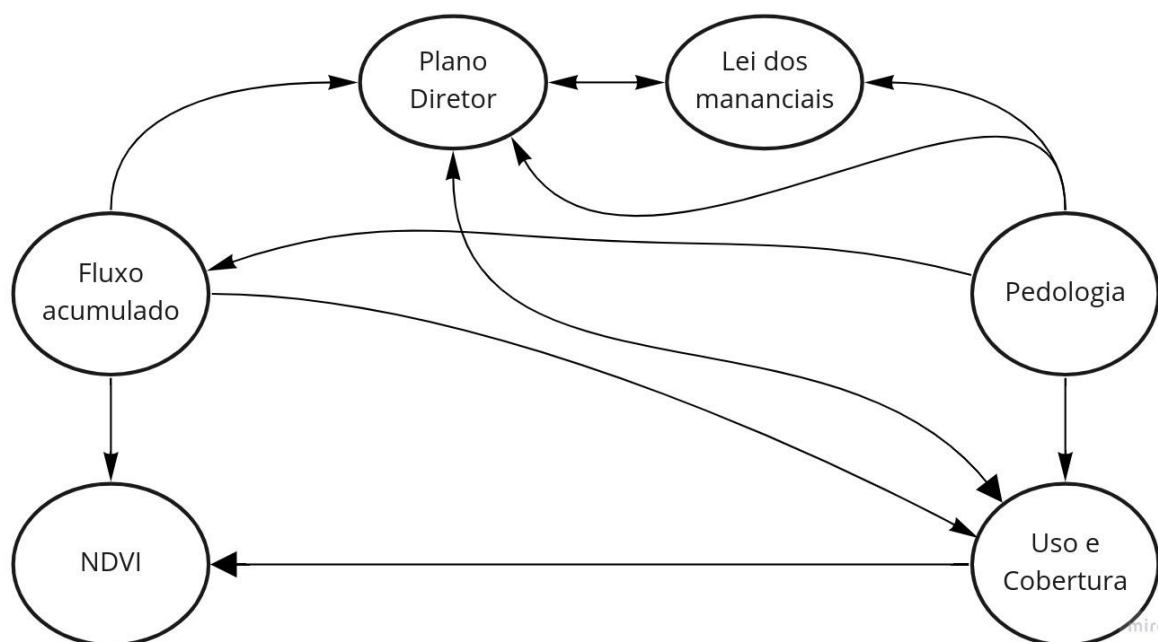
Os fatores Uso e Ocupação e NDVI são critérios que podem ser alterados e representam características do uso atual e antrópico, sendo fatores que podem sofrer alterações mediante mudanças na políticas de uso ou outros fatores, como avanço de processos de urbanização sobre a zona rural de municípios (tal processo pode ser visto no PD de São Carlos, nas zonas específicas para urbanização no futuro). Ambos fatores estão indiretamente relacionados, uma vez que determinados Usos (i.e. Área Urbana, Parques, Agricultura ou Pecuária) apresentam diferentes padrões de presença de vegetação. Assim, embora determinado uso condicione a existência de vegetação, a cobertura desta pode ser

mais ou menos densa, de maior qualidade ou menor qualidade. Então, embora estejam relacionados e o primeiro condicione o segundo, a manutenção dos índices de qualidade e coberturas vegetais mostram-se importantes na modelação de índices de sustentabilidade e também na resiliência de mananciais.

O Plano Diretor de São Carlos é um dispositivo legal pautado pelo disposto no Estatuto das Cidades e, mais especificamente para São Carlos, define os instrumentos de política urbana, sistema municipal de gestão e o ordenamento territorial. Embora este dispositivo tenha como objetivos fundamentais o fornecimento de água e saneamento ambiental a todos os habitantes e também a preservação de áreas frágeis, estratégicas e a proteção de áreas de preservação permanente, e tenha sido construído sob tais condições, é importante analisar o impacto de tais políticas e avaliar se a Lei vigente está atendendo às necessidades ambientais, municipais e sociais. Deste modo, é um fator que apresenta relevância na análise da sustentabilidade dos mananciais, pois é o principal meio de regulação e ordenação da ocupação territorial.

Ainda no eixo Legislativo considerou-se a Lei dos Mananciais que, embora tenha sido parcialmente contemplada no Plano Diretor revisto em 2016, trata o Plano Diretor como um dos instrumentos de sua aplicação, sendo assim mais restritivo e com maior importância diante deste.

Figura 12: Fluxograma das relações identificadas entre os parâmetros selecionados para análise da sustentabilidade dos mananciais de abastecimento hídrico de São Carlos/SP



Fonte: Autor (2022)

Os fatores selecionados para a avaliação apresentam relação entre si, levando em consideração que características de relevo influenciam no fluxo de água e também na composição da paisagem. A pedologia está relacionada com fatores de uso e ocupação, e também com o plano diretor. O Uso e cobertura, por sua vez, relaciona-se com a qualidade da vegetação presente no local e com o plano diretor, também sendo influenciado por este. A Lei dos mananciais também presta um fator muito importante na análise, uma vez que apresenta diretrizes específicas para as áreas da bacia de contribuição para os pontos de captação superficiais, concentrados na Bacia Hidrográfica do córrego do Monjolinho a montante da Estação de captação de água no Espraiado e a Bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, a montante da estação de captação de água para abastecimento público.

Considerando os fatores selecionados, aqueles ligados às condições do solo e terreno condicionam os demais, que são fruto da disponibilidade e aptidão dos primeiros e, por conta disso, possuem preferência quando comparados aos demais. Entre si, a comparação entre pedologia local e fluxo acumulado, o solo mostrou-se moderadamente mais importante, uma vez que as características de cada solo influenciam diretamente na infiltração da precipitação e do escoamento superficial. O mesmo padrão seguiu para a comparação da pedologia e os outros fatores considerados, variando entre fracamente e moderadamente mais importante.

O fluxo acumulado também mostrou-se mais importante do que os outros fatores, exceto a pedologia. A comparação entre este critério e os fatores do Eixo Legislativo, foi

atribuído ao fluxo acumulado forte importância se comparado ao Plano Diretor, pela distribuição do fluxo ao longo do município e porque o próprio Plano Diretor apresenta áreas cujo Fluxo Acumulado é muito alto mas não são definidas estratégias específicas para garantir proteção a este fator. Quanto à Lei dos Mananciais, o Fluxo acumulado mostrou-se ligeiramente mais importante, pois embora a Lei dos Mananciais tenha por objetivo a proteção e conservação dos mananciais das áreas das estações de captação de água superficial (e futuras), também existem outras áreas no município em que os valores de Fluxo Acumulado apresentam altos valores com potencial de contribuição para as redes de drenagem. O mesmo vale para o NDVI, embora esteja ligado a outros fatores. O NDVI é diretamente influenciado pelas diretrizes municipais, a citar as Áreas de Preservação Permanente, definidas tanto no PD quanto na Lei dos Mananciais, que são mais restritas que a Lei Federal e, pela seu teor de conservação de mata ciliar, áreas de nascentes e outras, acaba por influenciar diretamente na presença e cobertura vegetal. Tais áreas estão diretamente ligadas às áreas de maior concentração de fluxo acumulado, uma vez que a direção do fluxo de água tende a ir para os vales da região, coincidindo com as redes de drenagem. O uso e ocupação também segue a mesma tendência, principalmente se considerarmos que o Fluxo Acumulado é fruto direto da declividade do local, e este condiciona as aptidões para os diferentes usos do solo.

A comparação entre o Uso e Ocupação da região e o Plano Diretor mostrou o Uso e Ocupação ligeiramente mais importante, uma vez que o Uso e Ocupação é consequência do Plano Diretor e estão diretamente relacionados. O maior valor atribuído ao Uso e Ocupação deve-se a maior relação deste com a influência direta nos mananciais de água. A relação entre Uso e Ocupação e o NDVI utiliza do mesmo argumento anterior. O NDVI é consequência do Uso e, por isso, o Uso e Ocupação mostrou-se mais importante. A única diferença foi com relação à Lei dos Mananciais, que foi ligeiramente mais importante pois incide diretamente sobre áreas de captação.

A comparação entre o Plano Diretor e o NDVI mostrou importância moderada para o Plano Diretor, já que este define as diretrizes que possibilitam o Uso e Ocupação e, por consequência, os valores de NDVI para cada componente da região. Foi atribuída a mesma importância para a Lei dos Mananciais e o Plano Diretor pois os dois estão no mesmo âmbito de proteção e guiam os outros fatores, exceto aqueles físicos.

Por último, a comparação entre o NDVI e Lei dos Mananciais mostrou que a Lei dos Mananciais é ligeiramente mais importante que NDVI por conta principalmente pelas

limitações à ocupações dentro das áreas delimitadas nas micro bacias hidrográficas acima das captações.

Deste modo foi construída a matriz de correlação entre os fatores. Para a hierarquização dos critérios selecionados foi utilizado o método AHP. A comparação foi feita critério a critério a partir da utilização da escala absoluta de 1 a 9 proposta por Saaty (2004). Os valores foram computados pela comparação entre linha e coluna, nesta ordem, para os elementos acima da diagonal principal da matriz. A atribuição de pesos foi feita com base tanto na revisão bibliográfica quanto em *networkings* com profissionais da área ambiental. Após os cálculos do autovetor da matriz obtida foi possível chegar aos pesos atribuídos à cada categoria.

Tabela 01: Pesos atribuídos a cada fator e valor final do vetor prioridade calculado

Crítérios	USO E OCUP	PLANO DIRETOR	FLUXO ACUMULADO	PEDOLOGIA	NDVI	Lei dos manan.
USO E OCUP	1	2	0,5	0,25	3	0,5
PLANO DIRETOR	0,5	1	0,25	0,2	0,33	1
FLUXO ACUMULADO	2	4	1	0,25	5	2
PEDOLOGIA	4	5	4	1	3	2
NDVI	0,33	3	0,2	0,33	1	0,5
Lei dos Manan.	2	1	0,5	0,5	2	1

Fonte: Autor (2022)

Para fatores de checagem também foi calculada a Razão de Consistência. De acordo com Saaty são sugeridos valores de Razão de Consistência inferiores a 10%, que embora admitam certa inconsistência, ainda é considerado coeso quanto à escolha dos pesos feitos. O cálculo da RC para os pesos atribuídos à matriz retornou 9,96%, dentro do intervalo percentual considerado aceitável. Os valores na tabela foram arredondados para duas casas decimais para efeitos de ilustração, mas nos cálculos os valores foram considerados até a 5ª casa decimal. Em ordem de maior para menor foram classificados os critérios: Pedologia (0,3383); Fluxo Acumulado (0,2537); Uso e Ocupação (0,1291), Lei dos Mananciais (0,1246), NDVI (0,0985) e Plano Diretor (0,0555).

4.4. Processamento de informações em ambiente GIS e normalização dos fatores

4.4.1. Pedologia

Foram atribuídos valores para os dados de pedologia obtido de Rossi (2017) para São Carlos de acordo com a fragilidade ambiental com relação à escoamento superficial difuso e

concentrado de águas pluviais apresentada por cada subclasse de solo. Os valores foram atribuídos com base na classificação proposta por (ROSS, 1994) que vão de 1 a 5. Os valores atribuídos estão resumidos na tabela.

Figura 13: Reprodução da classificação de fragilidade de solo proposta por Ross (1994) para diferentes tipos de pedologia

Classes de Fragilidade	Tipos de Solos
1-Muito Baixa	Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho escuro e Vermelho amarelo textura argilosa.
2-Baixa	Latossolo Amarelo e Vermelho amarelo textura média/argilosa
3-Média	Latossolo Vermelho amarelo, Terra Roxa, Terra Bruna, Podzólico Vermelho-amarelo textura média/argilosa.
4-Forte	Podzólico Vermelho-amarelo textura média/arenosa, Cambissolos
5-Muito Forte	Podzolizados com cascalho, Litólicos e Areias Quartzosas.

Fonte: (ROSS, 1994)

4.4.2. Fluxo Acumulado

O Fluxo acumulado é um módulo de cálculo de métricas hidrológicas a partir de um modelo digital de elevação (MDE).

Análises derivadas de modelos digitais de elevação são partes importantes de interpretações e análises hidrológicas Zhang *et al.* (2017) pois estes fatores influenciam diretamente na dinâmica da direção de escoamento e também na vazão em determinados pontos da bacia hidrográfica (ZHANG et al., 2017).

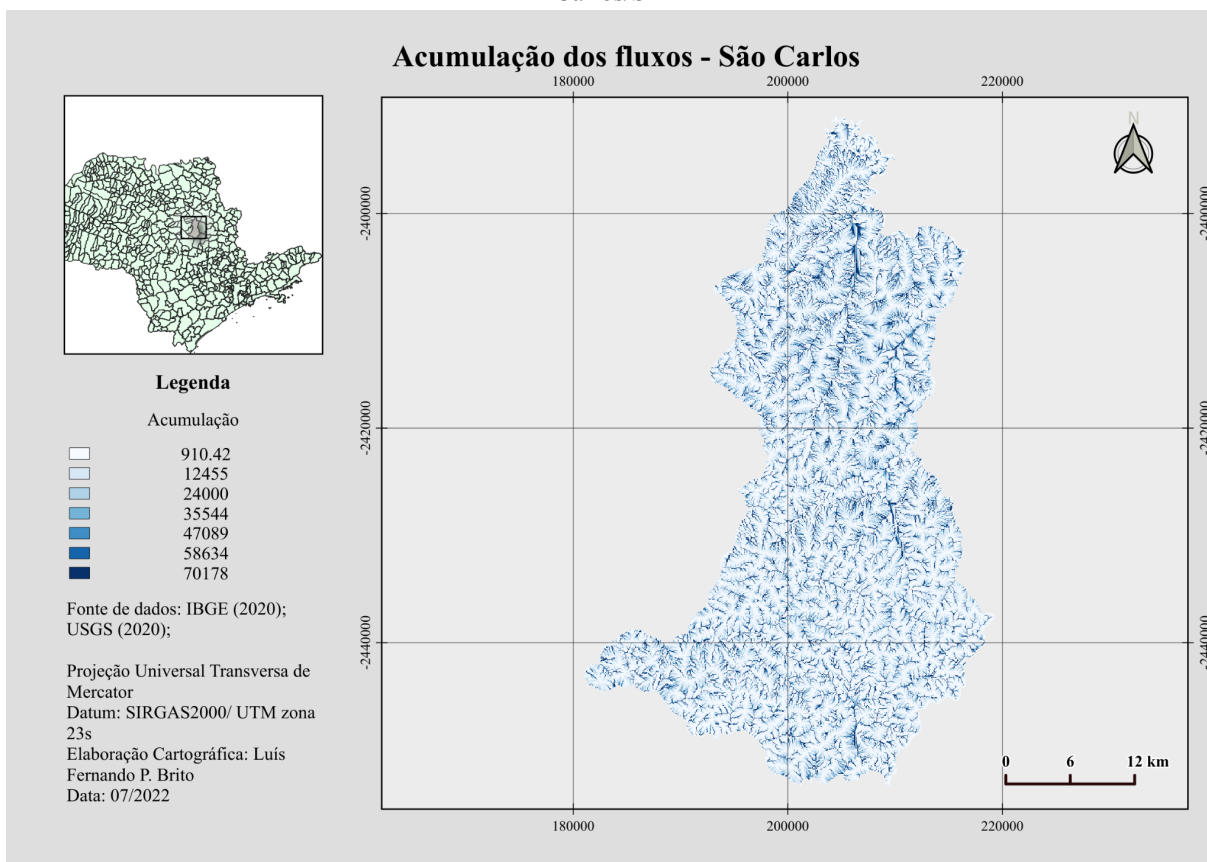
O arquivo matricial resultante é importante pois reflete a simulação de escoamento com a soma de cada arquivo, refletindo assim não a ordem dos rios, mas as ordens cumulativas da drenagem superficial do terreno. Assim, é um fator de peso hidrológico na análise dos mananciais pois exerce influência direta tanto no volume de água que chega aos corpos hídricos por meio do escoamento superficial quanto na recarga dos aquíferos e lençóis freáticos em áreas de recarga.

O *software* SAGA apresenta diversos métodos para cálculo da acumulação de fluxo. Um dos métodos mais utilizados é o *Flow Accumulation (top-down)*. O módulo do SAGA faz o cálculo a partir da maior elevação para a menor acumulando os valores computados e a partir da direção do fluxo de escoamento superficial do terreno pelo cálculo da direção de fluxo a partir de um modelo digital de elevação e posteriormente por fazer o cálculo acumulado de cada elemento da matriz a partir da soma dos valores de cada pixel (“Hydrology Analyst > Flow Accumulation”, 2016; “Module Flow Accumulation (Top-Down) / SAGA-GIS Module Library Documentation (v2.3.0)”, 2016).

O fluxo acumulado reflete a conexão entre o relevo local, a direção de fluxo do escoamento superficial com base no primeiro e os principais trechos de drenagem, frutos da soma da acumulação de valores prévios. Relaciona-se assim não somente com a ordem dos cursos de drenagem mas também com o valor total acumulado em cada ponto das bacias hidrográficas, podendo ser utilizado como parâmetro para avaliar e selecionar regiões em que podem ser aplicadas medidas com objetivo de preservação da qualidade da água de escoamento e também do volume total que chega aos trechos de drenagem. É também de relevância pois as áreas onde são concentradas grandes somas de vazão, desconsiderando os trechos de drenagem, podem ser frutos de medidas de manutenção de fragmentos de vegetação com o objetivo de evitar grandes volumes de escoamento e, por consequência, picos de vazão nos rios que drenam estas regiões.

Para obtenção do arquivo matricial de fluxo acumulado foi utilizado o modelo digital de elevação com o recorte do município de São Carlos/SP. O arquivo de elevação foi reprojetoado para coordenadas UTM, na projeção SIRGAS 2000 / UTM 23s.

Figura 14: Mapa do Fluxo acumulado de precipitação elaborado no *software* SAGA para o município de São Carlos/SP

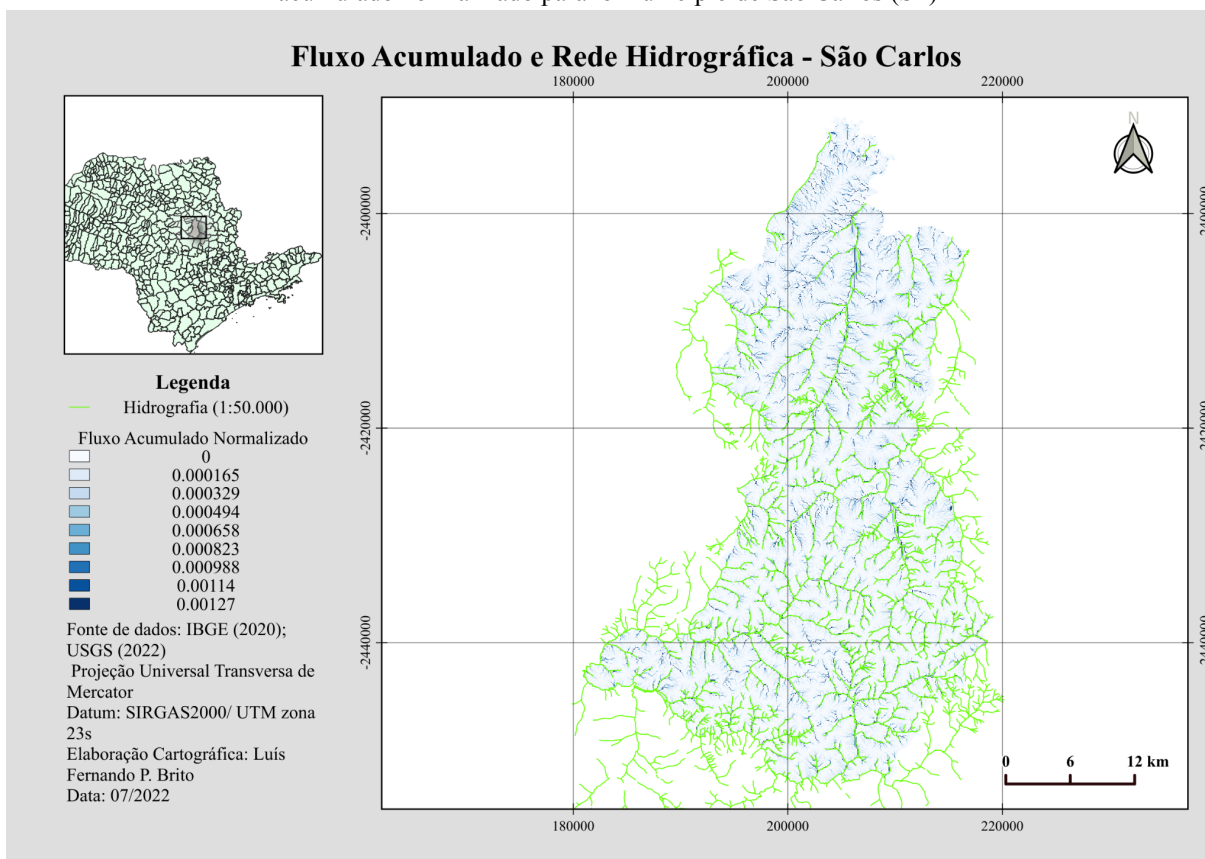


Fonte: Autor (2022); IBGE (2020); USGS (2020)

A análise feita considerou o mesmo peso para cada pixel, com valor atribuído de 1, e também a soma feita em 8 direções. O cálculo considerou o MDE recortado para o município de São Carlos. Além disso, embora o MDE obtido já estivesse corrigido na aquisição, foi aplicado o método de preenchimento de vazios proposto por Wang & Liu. As colorações mais escuras obtidas representam maiores valores de soma para o MDE utilizado, refletindo assim que o escoamento dentro do recorte é direcionado para tais pontos. Nota-se que os maiores valores acumulados estão concentrados na porção Norte do município, sendo a direção desse fluxo direcionada para o extremo Norte. Por ser um fator determinado pelas condições de relevo do local, é uma característica cuja alteração é de grande dificuldade.

Os valores de fluxo acumulado foram comparados com a base de dados de hidrografia fornecida pelo IBGE (escala 1:50.000) e revelaram que os maiores valores de fluxo acumulado coincidem com os cursos d'água mapeados pelo Instituto, conforme esperado.

Figura 15: Mapa de comparação entre rede hidrica municipal (IBGE (2020); escala 1:50.000) e fluxo acumulado normalizado para o município de São Carlos (SP)



Fonte: Autor (2022); USGS (2022); IBGE (2020)

No entanto, nota-se que para determinados pontos em que o fluxo acumulado é alto não foram mapeados rios ou córregos pela base de dados realizada pelo IBGE, o que pode refletir que são redes de drenagem intermitentes que surgem somente quando há eventos de precipitação, mas que ainda contribuem para a vazão das sub bacias e recarga de lençóis freáticos.

4.4.3. Uso e Ocupação

A aquisição dos dados de Uso e Ocupação da coleção 5 do MapBiomas foi utilizada para as análises pelo portal oficial da organização. Como dito anteriormente, o trabalho se concentrou nas classes principais de uso. Para a classificação dos usos identificados para o local foram atribuídos valores pertencentes ao intervalo de 0 a 1, sendo 0 elementos com menor peso para a sustentabilidade ambiental de mananciais e 1 elementos que apresentam o maior desempenho para a conservação de mananciais.

Além disso, como a avaliação busca considerar elementos que contribuem para a sustentabilidade de cursos de drenagem, usos identificados como Rio, Lago e Oceano foram considerados como peso 0 para não influenciar no resultado final, uma vez que é feita a

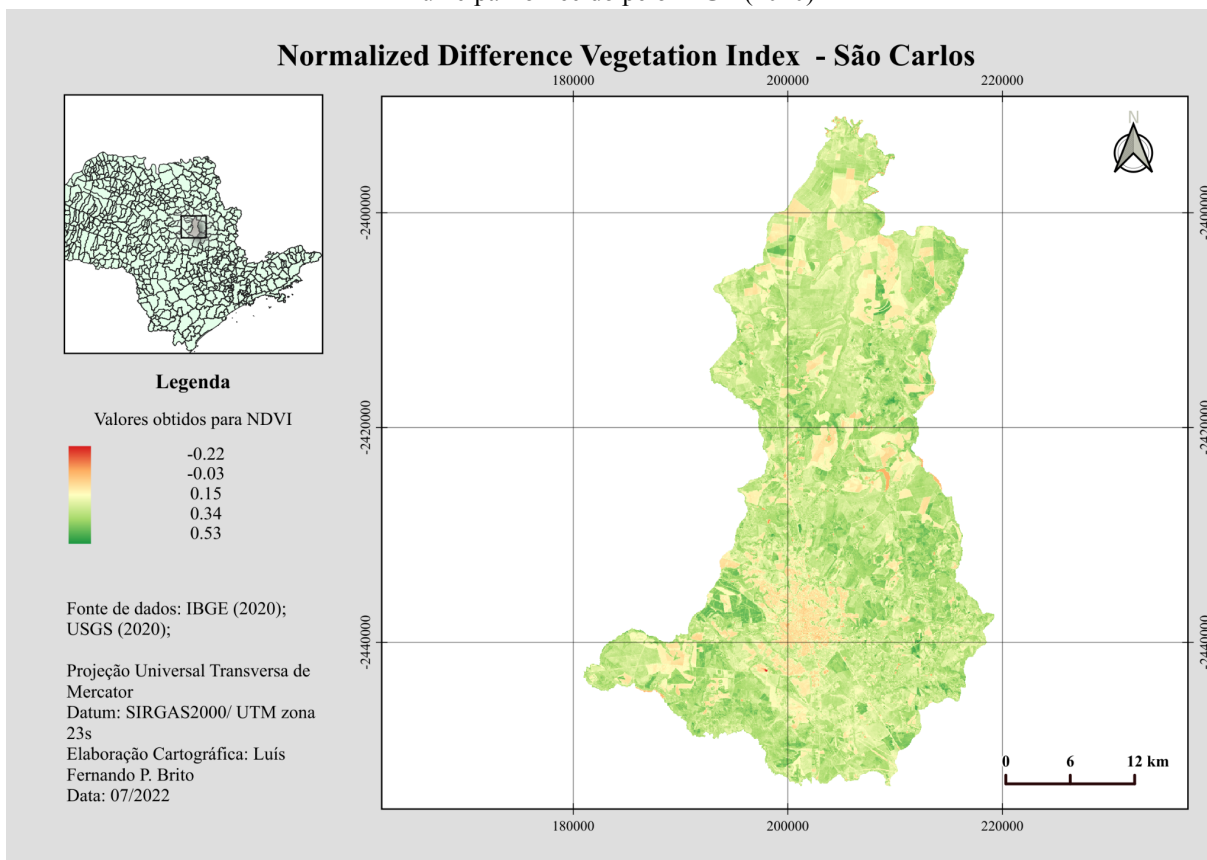
multiplicação do peso da classe do critério pelo seu peso atribuído e, sendo 0 o elemento nulo, a soma final não será influenciada por tal classe, além destes trechos já terem sido considerados no critério fluxo acumulado.

Foram atribuídos para cada classe os pesos, em ordem decrescente: Floresta (1); Formação Natural não Florestal (0,8); Outras áreas não vegetadas (0,6); Agropecuária (0,4); Área Urbanizada (0,2) e Rios, Lagos e Oceano (0), sendo o peso atribuído à última classe decorrente da discussão do parágrafo anterior.

4.4.4. NDVI

No presente trabalho foram utilizadas imagens obtidas do satélite Landsat-9 para aplicação da equação descrita, por meio do download no portal *Earth Explorer*, da USGS. A imagem do satélite foi obtida na data de 24/06/2022, apresentando cobertura de nuvens menor do que 10% para evitar erros no cálculo devido sua presença. Foram mescladas as bandas R-G-B e NIR-G-B (bandas 4-3-2 e 5-3-2, respectivamente) para exemplificação e verificação das composições. O cálculo foi feito com auxílio do software QGIS por meio da calculadora de raster. Foram obtidas as imagens da figura 16.

Figura 16: Mapa do índice de Vegetação por diferença Normalizada do Município de São Carlos/SP elaborado com as bandas NIR-G-B do Satélite Landsat 09 (órbita-ponto 220-075 e passagem 24/06/2022) e recorte municipal fornecido pelo IBGE (2020)



Fonte: Autor (2022); USGS (2020); IBGE (2020)

4.4.5. Plano Diretor

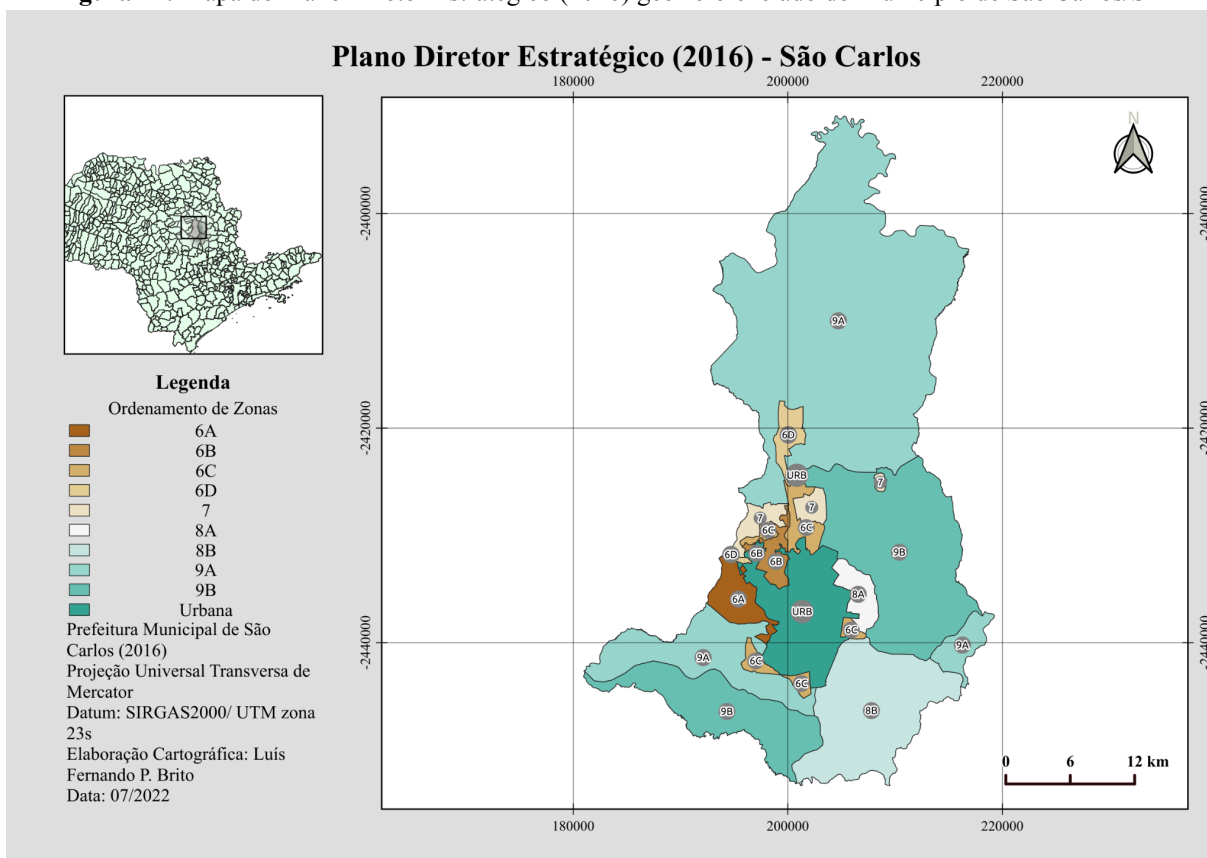
Em consulta aos arquivos disponibilizados no portal da Prefeitura foram encontrados apenas os mapas do parcelamento das zonas em PDF e foi necessário realizar o georreferenciamento das imagens para processamento em ambiente GIS. O georreferenciamento foi feito com base no *shapefile* vetorizado disponibilizado no próprio portal da prefeitura e validado com base no zoneamento vigente até a revisão do Plano Diretor em 2016.

Foram atribuídos pesos ao Plano Diretor (2016) com base nas diretrizes dispostas no documento dentro de uma escala de intervalo [0,1]. Para as zonas que se encontravam dentro da malha urbana foi atribuído o peso 0,1 e não foram discretizadas na análise e denominadas URB. Para as outras zonas (6A, 6B, 6C, 6D, 7, 8A, 8B, 9A, 9B) os pesos foram atribuídos com base nas disposições a respeito da preservação de Áreas de Proteção Permanente,

Remanescentes de Vegetação, Políticas de proteção aos mananciais e presença com características ambientais de solo e hidrografia, conforme definido no próprio PD.

Áreas com maior teor de proteção obtiveram valores iguais a 1 (Zonas 8A 8B) e aquelas com menor proteção valores mais próximos de 0 (6D = 0,1; 6C = 0,3). a Zona 9B teve valor final de 0,9; 9A = 0,7; 6B = 0,6; 7 = 0,5; 6A = 0,4; 6C = 0,3; 6D = 0,1; URB = 0,1).

Figura 17: Mapa do Plano Diretor Estratégico (2016) georreferenciado do Município de São Carlos/SP

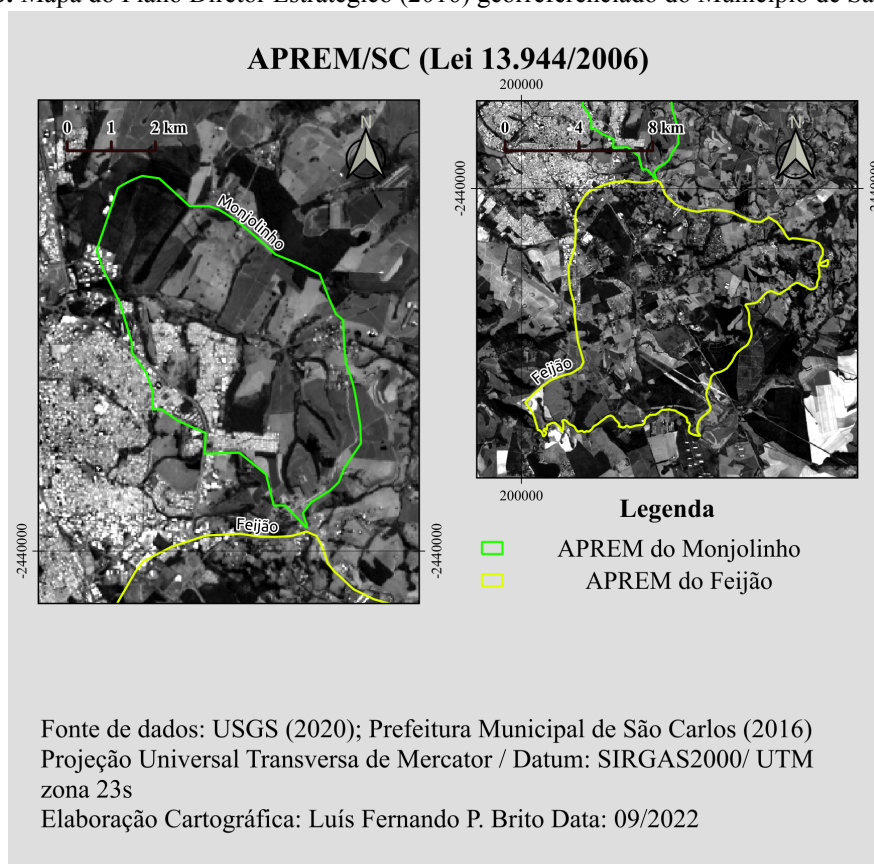


Fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos (2016)

4.4.6. Lei dos Mananciais

A Lei dos Mananciais instituiu as Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais do Município de São Carlos (APREM/SC) como áreas de relevante interesse ambiental municipal (SÃO CARLOS (SP), 2006, p. 944). As duas áreas de APREM no município compreendem as áreas de contribuição para os dois pontos de captação de água superficial para o município de São Carlos, representadas na figura 18.

Figura 18: Mapa do Plano Diretor Estratégico (2016) georreferenciado do Município de São Carlos/SP



Fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos (2006)

É importante notar que, embora a APREM/SC do Feijão compreenda grande parte da sub bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, ainda existe uma porção da bacia hidrográfica que não é abrangida pela Lei Municipal, uma vez que a sub bacia em questão vai além dos limites municipais. A informação é corroborada pela análise da rede hidrográfica da sub bacia, que indica a presença de nascentes e a contribuição direta para o ponto de captação presente na APREM/SC do Ribeirão do Feijão. As imagens de satélite também indicam que, na porção da bacia hidrográfica localizada fora do município, não estão sendo corretamente preservadas as nascentes. Os valores de NDVI indicaram a presença de solo exposto nas regiões próximas do leito dos córregos e, em alguns pontos, valores negativos associados à presença de corpos hídricos.

4.4.7. Normalização dos arquivos

A normalização dos valores se dá para o enquadramento dos valores obtidos pelo processamento das imagens em uma escala única e universal, para que possa ser feita a comparação sem perda de informação ou para que não haja tendência por conta de valores

maiores em determinados critérios frente a outros. Como exemplo da necessidade de normalização dos critérios podemos comparar os valores brutos de Pedologia e Fluxo Acumulado. O valor máximo para Pedologia foi de 5, o maior atribuído à este critério, enquanto o valor máximo obtido para o Fluxo Acumulado foi de 199376576, um valor 4×10^7 vezes maior que o primeiro. Por conta da metodologia adotada, que busca efetuar a soma dos critérios multiplicados pelo seu valor de importância, caso tenha sido feita a simples multiplicação do valor o Fluxo Acumulado, mesmo em seus menores valores, impediria a correta análise e interpretação dos dados uma vez que sobreporia todos os outros critérios por conta de seu valor muito acima dos outros.

A normalização simples foi aplicada para aqueles critérios que foram definidos com base em escala que não variava no intervalo de [0,1]. Foram normalizados os valores para Pedologia, Fluxo acumulado e NDVI. Os valores de Pedologia estão resumidos na tabela abaixo.

Tabela 02: Valores atribuídos para o critério pedologia e seus respectivos valores normalizados

PEDOLOGIA	Valor atribuído	Valor normalizado
Argissolos vermelhos	4	0,8
Gleissolos Háplicos	5	1
Latossolos Vermelho-Amarelos	1	0,2
Latossolos Vermelhos	1	0,2
Neossolos Litólicos	5	1
Neossolos Quartzarênicos	5	1
Nitossolos Vermelhos	3	0,6
Organossolos Háplicos	5	1
Área Urbana e Rios	0	0
Represas e Lagoas	0	0

Fonte: Ross (1994)

A normalização dos fatores de Fluxo acumulado e NDVI foi feita pela manipulação dos arquivos matriciais obtidos em ambiente GIS por meio da ferramenta calculadora raster do *software* QGIS. Os valores máximos e mínimos foram gerados pelo próprio software e foram utilizados automaticamente no processo de normalização.

Para o NDVI foram obtidos os valores máximo e mínimo de -0.23 e 0,54, que indicam baixa variação, com desvio padrão entre os píxeis de 0.085. Os valores refletem a vegetação, espaço urbano e também áreas com solos expostos e afloramentos rochosos. Foi feita a verificação pela comparação com o padrão de solo observado e cruzados com os dados de uso e ocupação do solo.

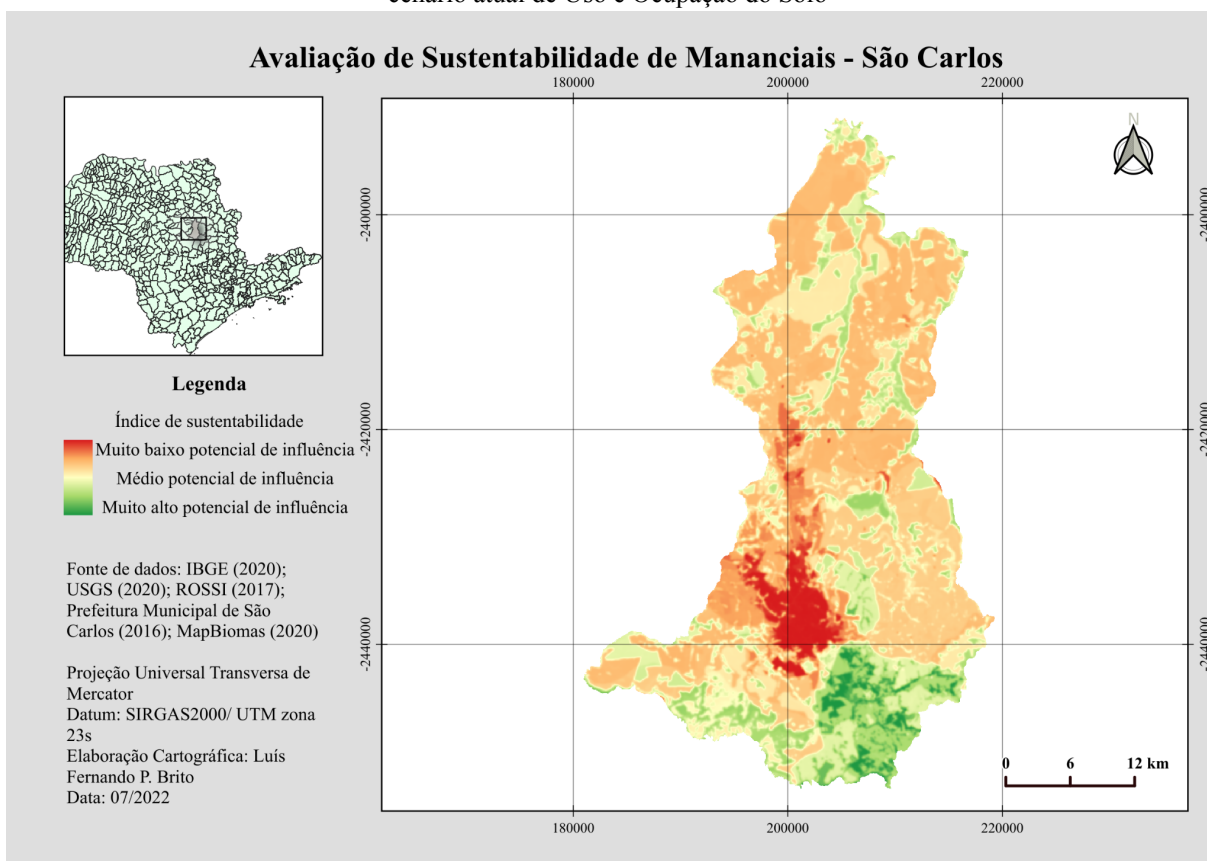
Por último, para o fluxo acumulado foram obtidos os valores máximos de 199376576 e mínimo de 910.42. A normalização dos valores retornou o valor máximo de 0,97 e mínimo

de 0, com o valor médio dos pixels de 0,0012. O valor muito baixo indica que há presença predominante de fluxos com valores baixos, atribuídos ao início do fluxo de água no relevo.

4.4.8. Geração do arquivo matricial de áreas com maior influência sob a sustentabilidade de mananciais de água para abastecimento público

O resultado do processo foi um arquivo matricial em que os valores de cada pixel correspondiam à sustentabilidade dos mananciais de água com base nos critérios selecionados.

Figura 19: Mapa da Áreas Prioritárias para a sustentabilidade dos mananciais de São Carlos/SP considerando o cenário atual de Uso e Ocupação do Solo

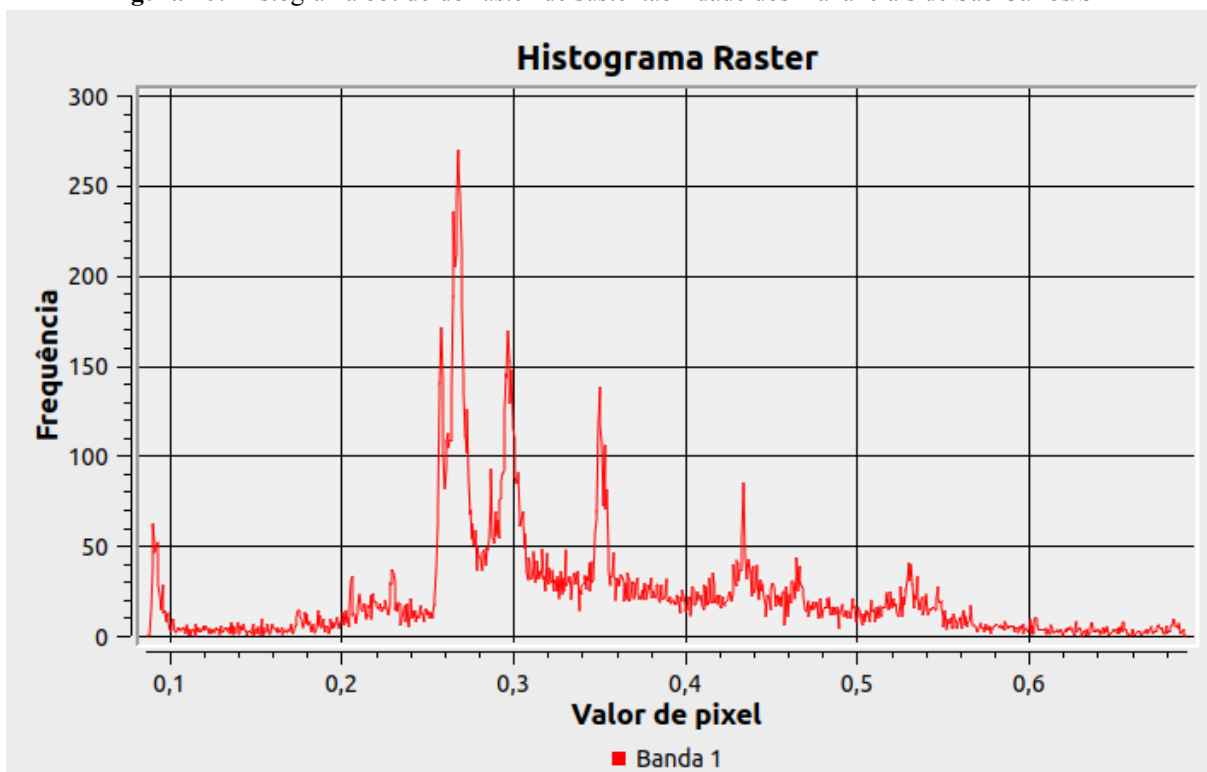


Fonte: Autor (2022); IBGE (2020); USGS (2020); ROSSI (2017); Prefeitura Municipal de São Carlos (2016); MapBiomias (2020)

O corte de classificação foi feito considerando o histograma calculado para a imagem, continuamente dividido considerando o histograma gerado. Nota-se que no histograma há 6 picos de frequência na imagem gerada, sendo o maior volume concentrado na porção de valor menor que 0,33. O valor médio dos pixels ficou concentrado aproximadamente na metade do valor máximo obtido, indicando que existe um

balanceamento entre a frequência dos maiores valores e dos menores valores, embora o valor máximo obtido tenha sido 69% do valor máximo admissível para o modelo construído. Para os fatores considerados existem locais mais específicos que apresentam muita influência na sustentabilidade dos mananciais para o cenário atual. Os valores obtidos foram representados no histograma de frequência abaixo.

Figura 20: Histograma obtido do *raster* de sustentabilidade dos mananciais de São Carlos/SP



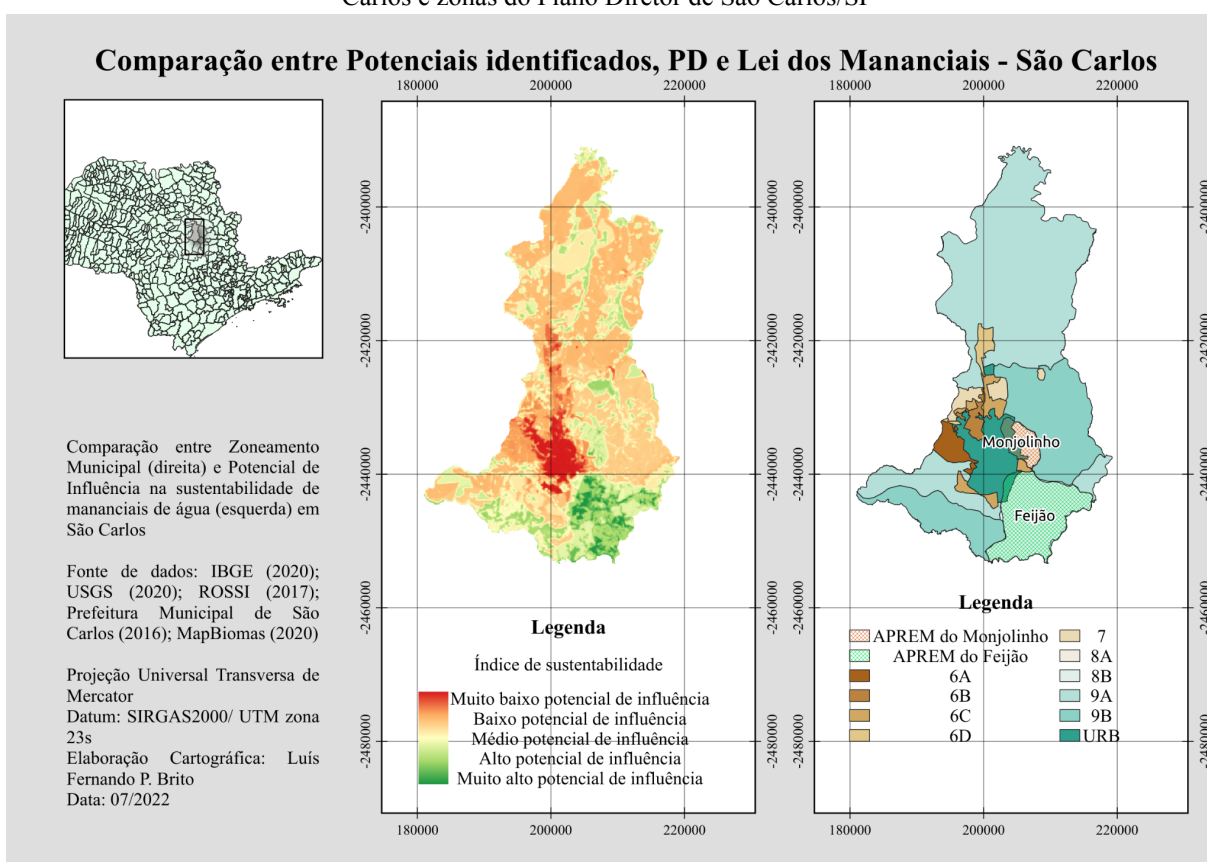
Fonte: Autor (2022)

Além disso, a análise espacial indica que as áreas cujo corte feito apresenta $>0,6$ estão concentradas em locais que possuem cobertura vegetal nativa intacta, especialmente relacionados com áreas de preservação permanente ou remanescentes de vegetação nativa, conforme dados da coleção 5 de Uso e Cobertura de Solo do MapBiomas (2020).

O critério de Pedologia foi o que mais se destacou na influência do raster final, que já era esperado devido ao seu maior peso atribuído obtido na definição do vetor prioridade feito, sendo possível encontrar semelhanças visuais entre as delimitações de formações pedológicas e o arquivo final. O mesmo também foi observado para o fluxo acumulado, sendo que o último coincide com áreas vegetadas e com bons índices de cobertura vegetal, dado que os maiores valores de fluxo acumulado são rios ou cursos de drenagem permanente. Tais áreas estão sob a proteção de instrumentos de política ambiental visando sua conservação, proteção e reparação e, por conta disso, tendem a apresentar cobertura vegetal mapeada classificada como floresta, além de cobertura classificada como de qualidade.

Os índices que menos apresentaram influência sobre o resultado final foram o NDVI e o Plano Diretor. O PD embora exerça influência indireta sobre o uso e ocupação é fruto da discussão e revisão de prioridades do município e é responsável por guiar a expansão do município. Assim, era esperado que dentre todos os fatores considerados fosse o que menos tivesse influência direta no produto final. O mesmo vale para o NDVI, que é uma consequência direta do Uso e Ocupação e de outros fatores que possam influenciar na cobertura vegetal. A Lei dos Mananciais apresentou maior valor por conta do teor de proteção e condicionamento do uso do solo nas áreas em que é incidente.

Figura 21: Comparação entre o cenário atual de áreas prioritárias para sustentabilidade dos mananciais de São Carlos e zonas do Plano Diretor de São Carlos/SP



Fonte: Autor (2022); IBGE (2020); USGS (2020); ROSSI (2017); Prefeitura Municipal de São Carlos (2016); MapBiomias (2020)

As áreas identificadas com maior potencial de influência nos mananciais de água estão majoritariamente inseridas nas zonas 8B, 9A e 9B. São as zonas inseridas em áreas rurais com importantes componentes ambientais e que possuem diretrizes de ocupação que visam a preservação e conservação de elementos naturais, visando a proteção de mananciais de água. Além disso, uma porção considerável incide sobre a zona 6C. Tal Zona é classificada como de ocupação de menor densidade e engloba o antigo Aterro Sanitário Municipal.

Todas as áreas englobadas pelas áreas com muito potencial de influência possuem diretrizes de ocupação que se pautam na preservação e conservação ambiental, mas podem se mostrar insuficientes para a conservação, uma vez que grande parte destas áreas deveria ser direcionada para a preservação dos mananciais de água municipais.

A Zona 8A já é classificada no Plano Diretor como área de recarga de uma das principais captações superficiais de água da cidade. São definidas diretrizes para a zona a preservação e ocupação condicionada. No entanto, ao avaliar a coleção de Uso e Ocupação obtida do MapBiomass é possível perceber que, embora o Plano Diretor seja claro na especificação de que é uma área prioritária na conservação dos mananciais de abastecimento, não é observada segundo a classificação feita manchas de florestas ou remanescentes de vegetação. A análise dos dados de NDVI também revela baixos índices de cobertura vegetal para a região, com a existência de fragmentos de solo expostos.

A Zona 8B, classificada como Zona de Proteção ao Manancial Ribeirão do Feijão, é a zona com maior importância do ponto de vista do abastecimento superficial municipal, concentrando 70% da captação de água bruta superficial. Apresenta padrões de ocupação majoritariamente de agropecuária, mas é possível notar a presença de usos de terra ligados a processos de urbanização. Segundo a classificação de Uso e Ocupação, apresenta elementos classificados como Floresta e também Formações Naturais não Florestais, principalmente em regiões que há presença de cursos hídricos. É uma região de grande importância na manutenção atual do abastecimento superficial municipal e existem diretrizes que visam sua conservação, mas que podem se mostrar insuficientes diante a expansão da malha urbana em direção à matriz vegetal, principalmente considerando a maior impermeabilização do solo em regiões de recarga de manancial e a alteração de uso do solo de atividades agropecuárias para solo impermeabilizado.

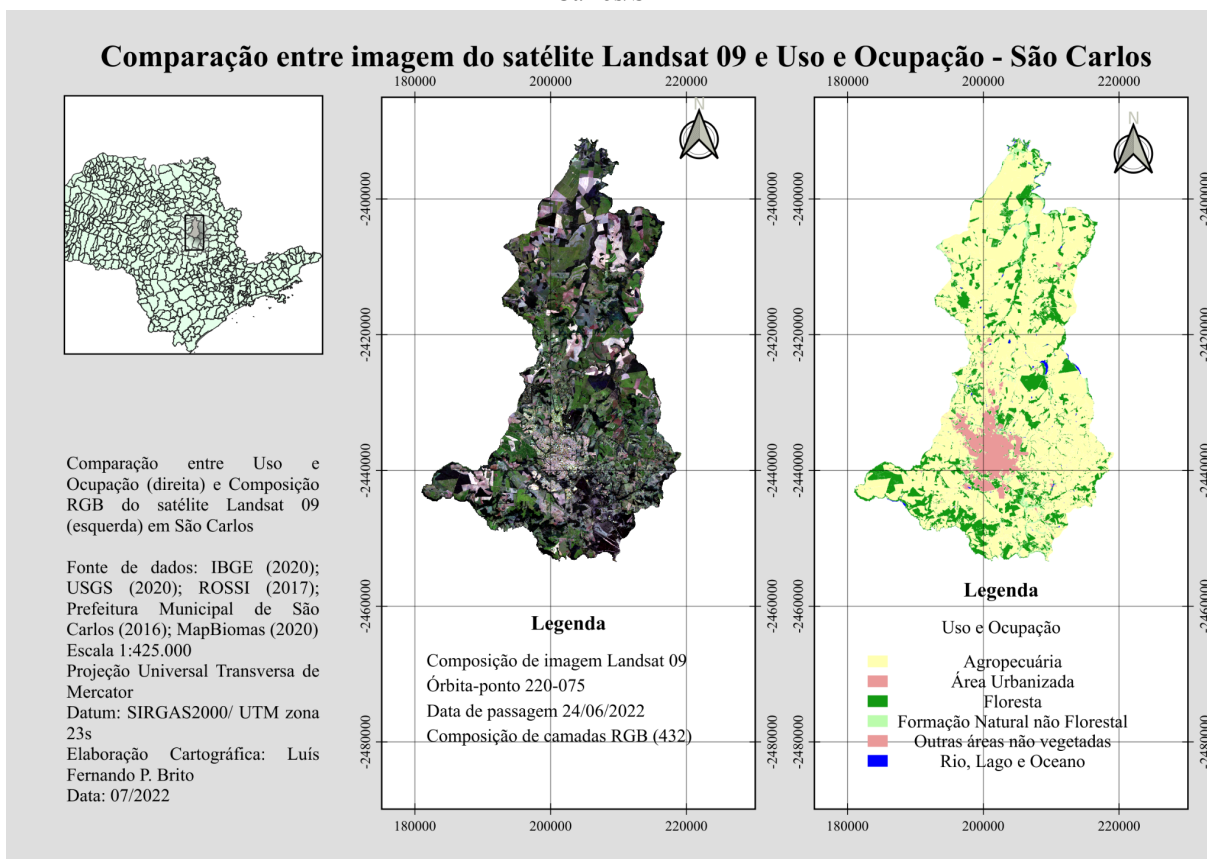
A Zona 9A se particiona em duas porções separadas, sendo uma ao Sul da Malha Urbana e outra na porção Norte do município. Ambas apresentam áreas com potencial de influência na sustentabilidade dos mananciais de água municipais, embora a porção ao Norte concentre a maior porção absoluta tanto em potencial muito alto quanto potencial alto. Nesta Zona não existem diretrizes específicas para a conservação dos mananciais, embora a porção Norte desta Zona apresente uma rede hidrográfica ramificada e com número considerável de nascentes. São incentivadas atividades agrícolas com manejo adequado e que visem a preservação ambiental e, comparando o uso e ocupação atual da região é notável a predominância de atividades agropecuárias em ambas porções desta zona. Existem fragmentos classificados como Floresta que coincidem com a rede hidrográfica mas que não

apresentam continuidade ao longo dos trechos de rios, indicando que não está sendo realizado o cumprimento das leis Federais e Municipais que dispõe sobre as Áreas de Preservação Permanente.

Devido à resolução utilizada para processamento das imagens, baseadas nos satélites Landsat com resolução espacial de 30m existe a possibilidade de que pixels que apresentem mais de um valor sejam classificados de maneira não-exata. Olhando as classificações mais específicas do MapBiomas para as áreas de Rios (que deveriam ter 50m de APP segundo a Lei Municipal 13.944/2006) é apresentado a atribuição de mosaico de Agricultura e Pastagem, o que leva à conclusão de que as áreas não estão sendo corretamente preservadas, embora existam instrumentos legais que prevêm tais medidas nas áreas discutidas.

A Zona 9B, por sua vez, é classificada como Zona Multifuncional Rural e de Proteção Hídrica, com potencial de abastecimento hídrico futuro e instalação de Estações de Captação de Água. A Zona ao leste do município segue o mesmo padrão das anteriores, com ocupação predominantemente rural agropecuária e com as APPs degradadas ou sem nenhuma cobertura vegetal, confirmado pela análise dos dados obtidos das imagens NDVI e Uso e Cobertura. A Zona ao Sul do Município apresenta diferentes configurações das outras Zonas Municipais. Seu grau de conservação, embora não esteja completamente de acordo com a legislação vigente, apresenta mais áreas classificadas como Floresta e também apresenta maiores valores de cobertura e densidade vegetal.

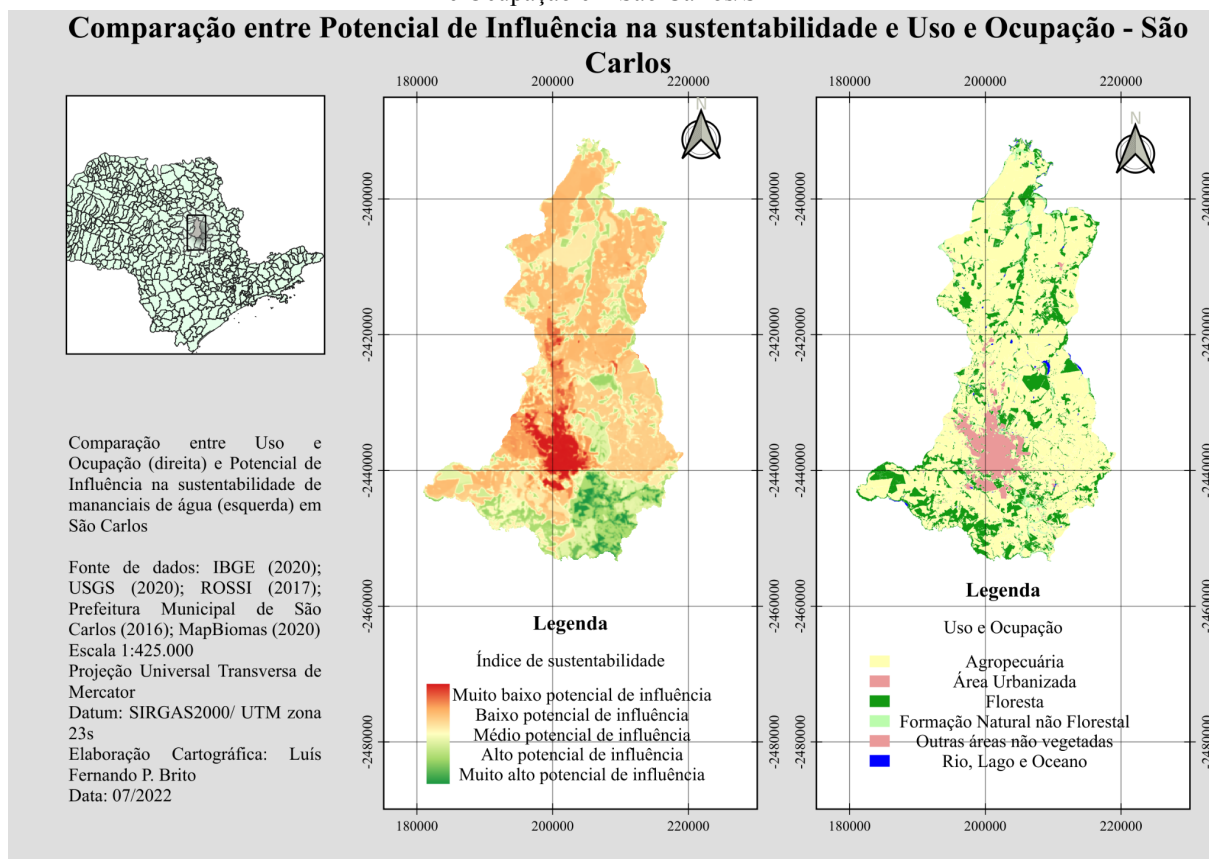
Figura 22: Comparação entre Uso e Ocupação de São Carlos e Imagem RGB do satélite Landsat 09 em São Carlos/SP



Fonte: Autor (2022); IBGE (2020); USGS (2020); ROSSI (2017); Prefeitura Municipal de São Carlos (2016); MapBiomias (2020)

A comparação entre as imagens classificadas pelo MapBiomias e a composição RGB do município de São Carlos indica que nas áreas classificadas como uso agropecuário existem grandes porções de solos expostos, sendo possível notar em escalas pequenas (a nível municipal). O potencial de contribuição para a sustentabilidade e resiliência nestes pontos é menor do que o calculado esperado, uma vez que a consideração feita na matriz de cálculo do processo hierárquico não considerou as exposições de solo decorrentes de processos de reforma de solo para implementação de novas culturas ou alteração de finalidade de uso. Além disso, o levantamento feito pelo MapBiomias apresentou muito semelhança com o padrão de uso de solo em imagens mais recentes do município observado.

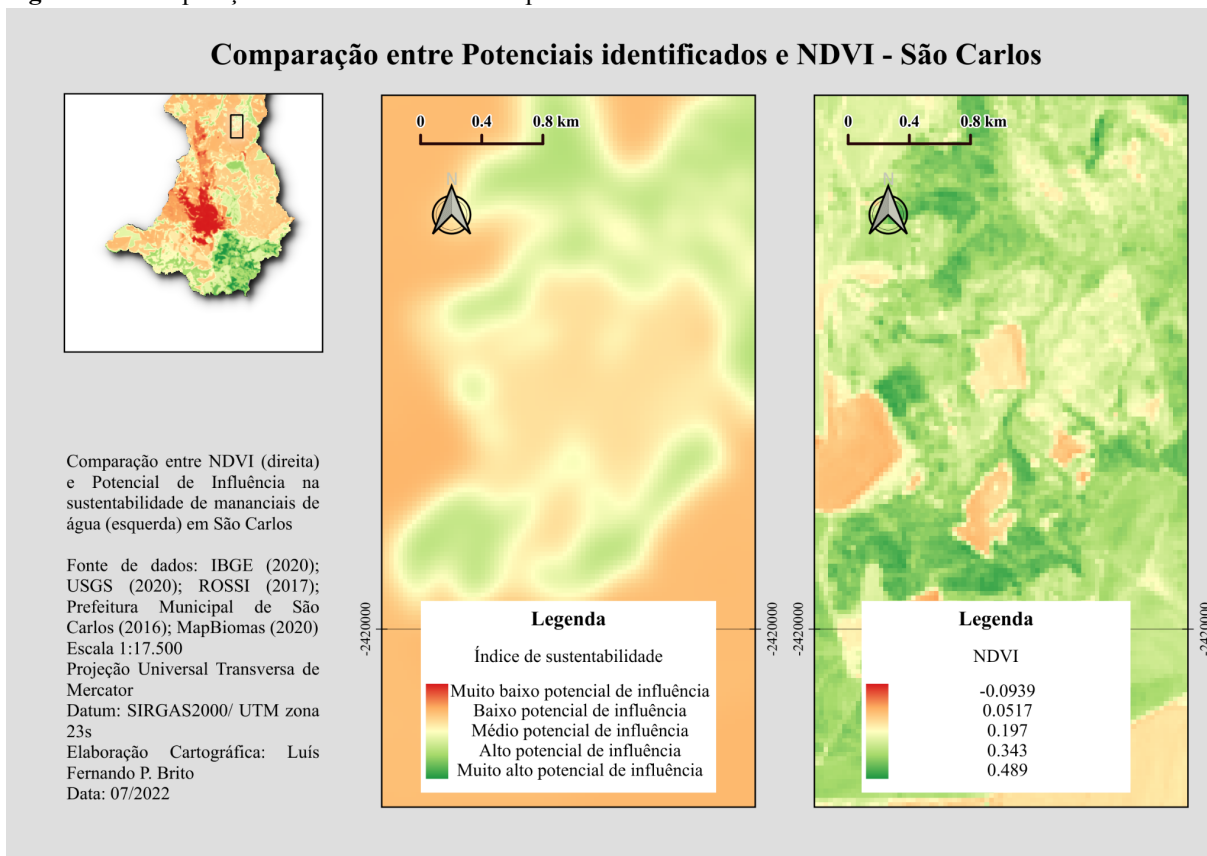
Figura 23: Comparação entre o Áreas Prioritárias para sustentabilidade dos mananciais de São Carlos/SP e Uso e Ocupação em São Carlos/SP



Fonte: Autor (2022); IBGE (2020); USGS (2020); ROSSI (2017); Prefeitura Municipal de São Carlos (2016); MapBiomias (2020)

Por outro lado, a comparação entre o uso e cobertura de solo com as áreas com potencial de contribuição para a sustentabilidade e resiliência do sistema de abastecimento hídrico superficial de São Carlos indica que, embora o uso do solo e a vegetação exerçam influência sobre o produto final, as áreas classificadas como uso de floresta ou Formações Naturais não Vegetais não estão obrigatoriamente inseridas nas classificações de alto potencial e muito alto potencial de influência. Além disso, para as áreas classificadas como uso agropecuário existe a influência da reforma de solo para manutenção da qualidade do mesmo, que podem exercer influência negativa sobre os mananciais de água e escoamento superficial, conforme pôde ser observado na Figura 21. A análise da imagem NDVI para recortes do município de São Carlos ilustra melhor o processo na Figura 22.

Figura 24: Comparação entre Áreas Prioritárias para sustentabilidade dos mananciais de São Carlos/SP e NDVI



Fonte: Autor (2022); IBGE (2020); USGS (2020); ROSSI (2017); Prefeitura Municipal de São Carlos (2016); MapBiomias (2020)

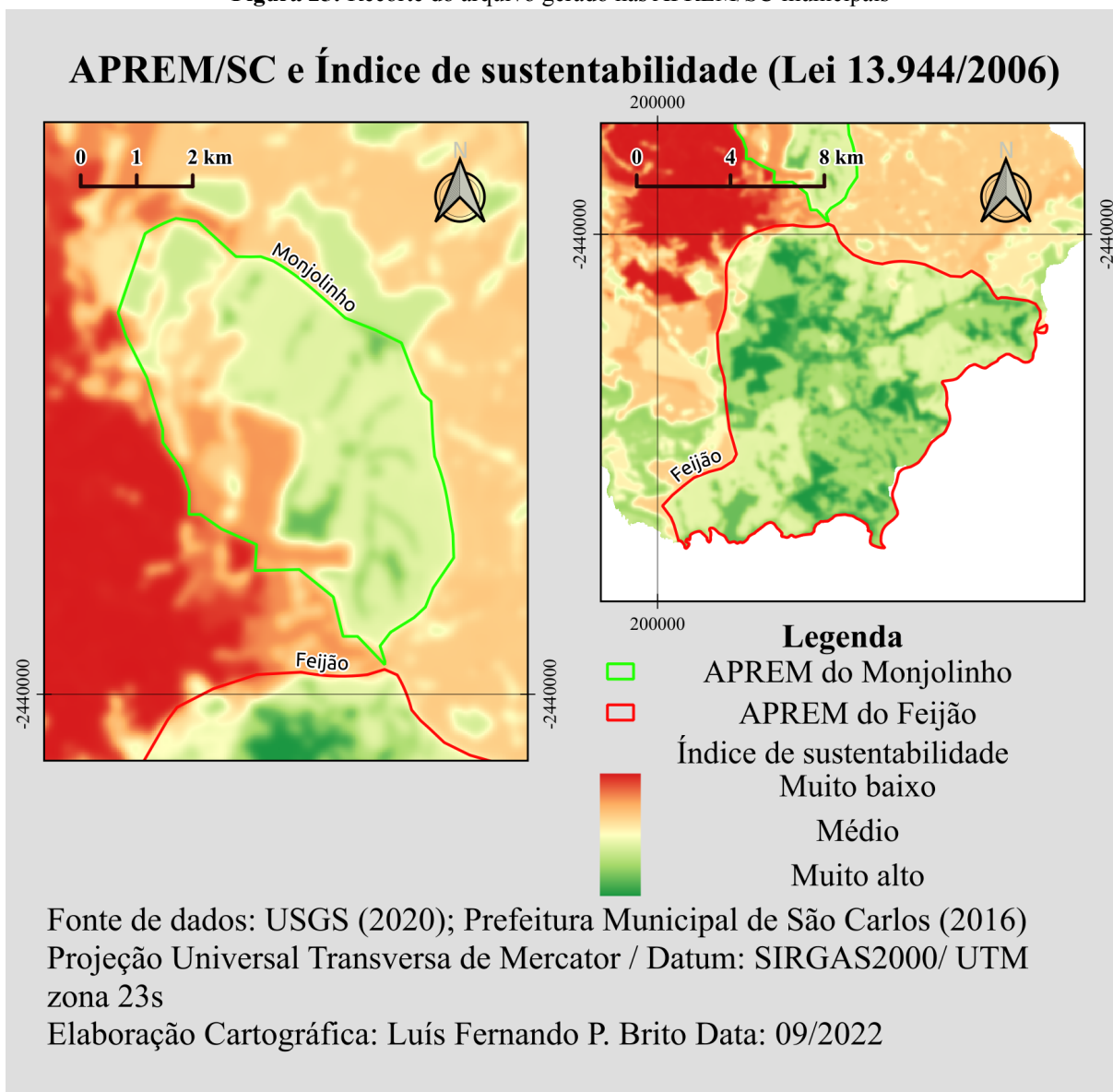
O recorte ilustrado na Figura 25 é classificado como Agropecuária e no mapa final apresentou Alto potencial de influência na sustentabilidade, mas ao analisarmos o recorte de NDVI para a área, notamos que na data de passagem do satélite o solo encontrava-se exposto. Podem ser feitas sugestões quanto à tecnologias utilizadas para a manutenção e manejo do solo, de maneira a evitar que, mesmo temporariamente, o solo seja exposto. Embora medidas restritivas não sejam respeitadas, como discutido na revisão, faz-se necessário encontrar soluções eficazes que possam prevenir fatores negativos em regiões de alto e muito alto potencial de influência na sustentabilidade.

As áreas com maior concentração de valores altos dos pixels foram aquelas em que há incidência da Lei dos Mananciais, concentradas nas sub bacias do Monjolinho e do Ribeirão do Feijão, e foram destacadas na imagem abaixo. Na APREM do Ribeirão do Feijão os valores médios foram maiores do que os observados na APREM do Ribeirão Monjolinho, principalmente por conta do maior grau de conservação apresentado na sub bacia hidrográfica. Vale destacar que áreas da APREM do Ribeirão do Monjolinho apresentaram valores muito baixos, principalmente nas regiões em que há presença de malha urbana. Além disso, para as regiões que não têm presença de malha urbana, foram encontrados médios

valores de sustentabilidade, mesmo naquelas áreas em que existem as nascentes de córregos que contribuem para o abastecimento da estação de captação do Ribeirão do Monjolinho.

Outras áreas dentro dos limites municipais foram identificadas com valores obtidos maiores ou iguais àqueles encontrados para a APREM do Ribeirão do Monjolinho, concentradas em áreas distintas do Plano Diretor Municipal, que não são contempladas por diretrizes específicas de proteção aos mananciais e também não encontram-se dentro dos limites das áreas definidas no APREM/SC.

Figura 25: Recorte do arquivo gerado nas APREM/SC municipais



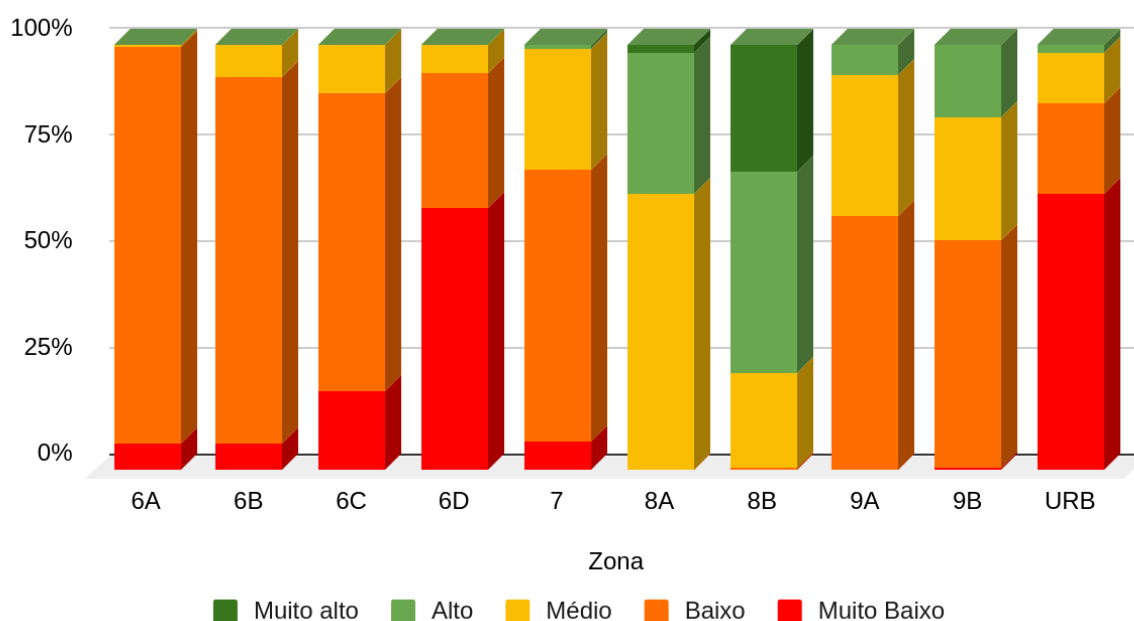
Fonte: Autor (2022); IBGE (2020); USGS (2020); ROSSI (2017); Prefeitura Municipal de São Carlos (2016; 2006); MapBiomass (2020)

A distribuição das classes por zonas do Plano Diretor revelou que as áreas que apresentam maior percentual de valores altos do índice estão concentradas nas porções rurais

que praticamente não apresentam malha urbana. A maior concentração de valores Alto e Muito Alto foram obtidas para as Zonas 8B (77,28%), 8A (35,19%), 9B (17,02%) e 9A (7,25%), sendo que as demais zonas somam ao todo 3,2%. Se considerados os valores Médio, Alto e Muito Alto as zonas com maior concentração em ordem decrescente são 8A (99,82%), 8B (99,66%), 9B (46,20%), 9A (40,07%) e 7 (29,54%).

Figura 26: Distribuição das classes por cada Zona do Plano Diretor

Distribuição percentual de classes por zona do Plano Diretor

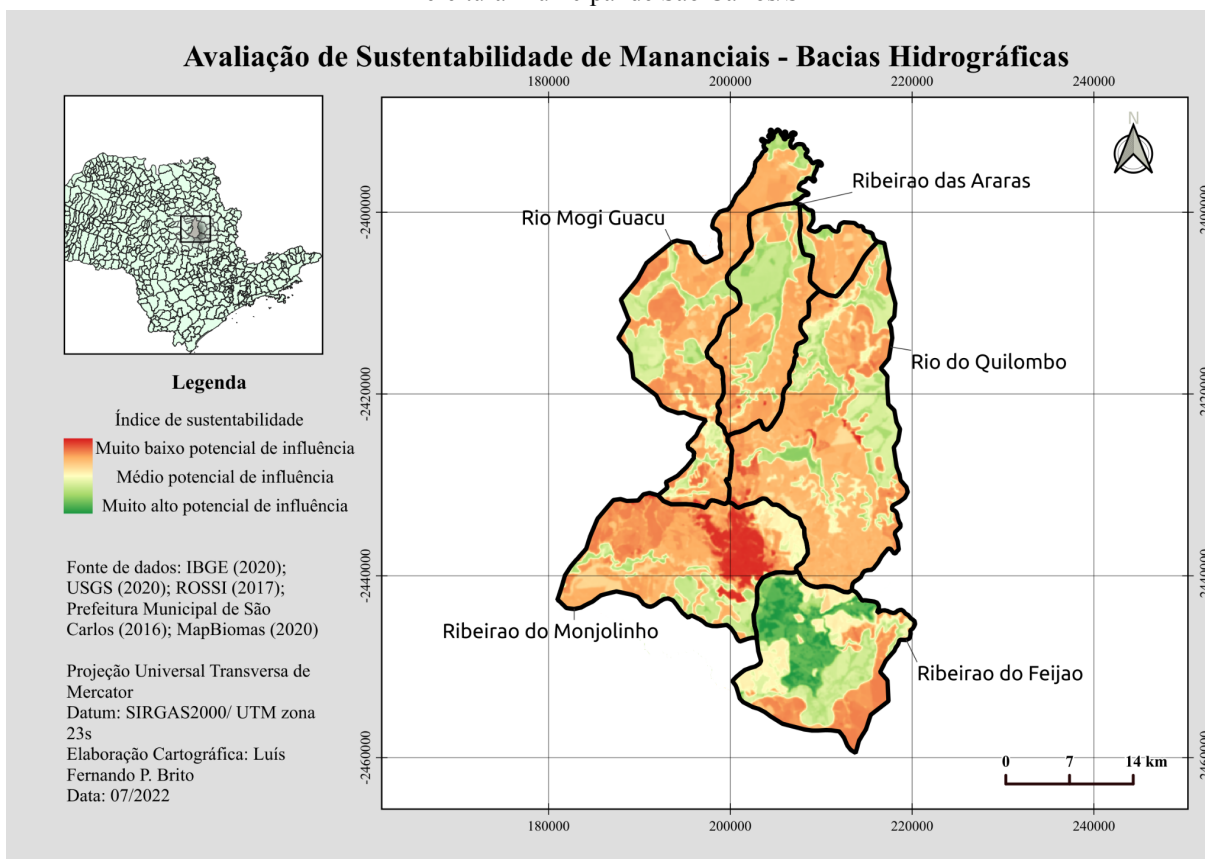


Fonte: Autor (2022)

As Zonas com maior concentração de classes Alto e Muito Alto são aquelas que apresentam diretrizes específicas para a conservação de mananciais ou estão inseridas das áreas de APREM/SC e suas subáreas (8A e 8B). No entanto são observados fragmentos com potencial muito alto de influência em locais que não são contemplados especificamente nas APREM/SC ou suas sub áreas de preservação, localizadas em outras sub bacias hidrográficas.

Foi feita também a distribuição por sub bacias hidrográficas, com o intuito de comparar os valores obtidos para cada sub-bacia presente no município, de acordo com os dados disponíveis no portal SIGA-SC da Prefeitura Municipal de São Carlos.

Figura 27: Recorte de áreas prioritárias por Sub Bacias Hidrográficas, conforme disponibilizado no portal da Prefeitura Municipal de São Carlos/SP



Fonte: Autor (2022); IBGE (2020); USGS (2020); ROSSI (2017); Prefeitura Municipal de São Carlos (2016); MapBiomias (2020)

A distribuição das classes mostra que a sub-bacia do Ribeirão do Feijão é a que mais apresenta a classe Alta e Muito Alta (48,85%), seguida pela Ribeirão das Araras (29,5%) e pela Rio Mogi-Guaçu (19,8%). Na consideração das bacias hidrográficas por totalidade, conforme disponibilizado na Prefeitura, algumas porções das sub bacias do Ribeirão do Feijão e Ribeirão do Monjolinho estavam fora dos limites municipais, e para elas foram atribuídos os valores de 0 na consideração dos cálculos, uma vez que as Leis aqui consideradas apenas são consideradas para o perímetro municipal de São Carlos/SP. O cruzamento das camadas de Zonas do Plano Diretor, Sub bacias hidrográficas (1:50.000) e o arquivo matricial gerado indicam as sub bacias que também apresentam potencial na sustentabilidade dos mananciais. A Sub Bacia do Ribeirão do Feijão já apresenta estações de captação superficiais e, conforme discutido na revisão bibliográfica, a sustentabilidade do abastecimento hídrico pode ser alcançada pela diversificação do sistema de abastecimento de água.

A partir da análise percentual de cada sub bacia hidrográfica e as Zonas definidas no Plano Diretor de São Carlos, nota-se que a segunda sub bacia hidrográfica que apresenta bons valores para o índice de sustentabilidade, tanto em percentual quanto em conectividade é a

sub-bacia do Ribeirão das Araras, concentrada nas Zonas 9A, 6D e na malha urbana, pela sua distribuição percentual mostrada na Figura 29. Sua área é composta majoritariamente pela Zona 9A, enquanto as Zonas 6D e URB localizam-se próximas dos divisores de água da sub-bacia. As Zonas 6D e URB estão concentradas nas proximidades de diversas nascentes presentes na bacia hidrográfica.

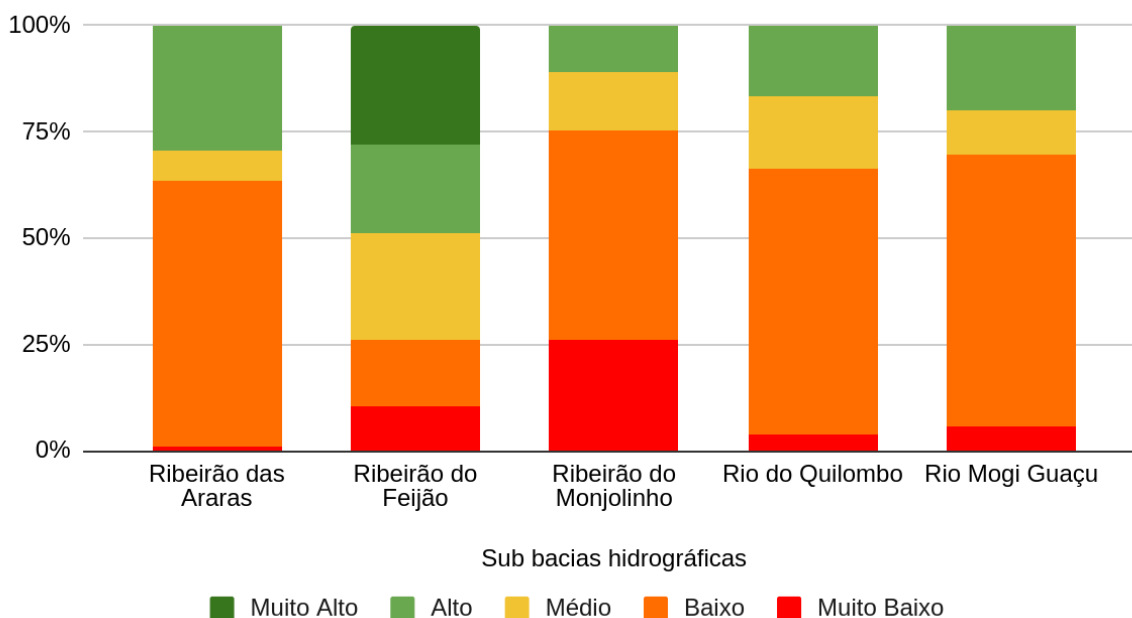
A principal rede de drenagem da sub-bacia em questão é o Ribeirão das Araras. A sub-bacia pode qualificar-se como alternativa para captação de água superficial e consequente diversificação do sistema de abastecimento municipal, mas é necessária uma caracterização quanto ao potencial e vazão apresentados na sub-bacia hidrográfica. Como já apresenta influência alta, medidas de gestão aplicadas à bacia podem mostrar-se favoráveis ao aumento dos valores Alto e Muito Alto presentes na região, e consequente melhoria nas condições de atendimento às exigências de captação de água.

Importante ressaltar que a porção da Zona 9A (ao Norte da malha urbana), em que a sub-bacia das Araras está inserida, não possui diretrizes como as Zonas 8B e 9B, que especificam diretrizes e medidas para promoção da preservação e conservação de elementos naturais visando a proteção da região e também não está inserida em APREM/SC. Mesmo sem medidas Legais adicionais, apresentou boa classificação, se comparadas com a sub-bacia hidrográfica do Ribeirão do Monjolinho e Ribeirão do Feijão, que são abrangidas pelas APREM, além de diretrizes previstas no PD municipal.

Também é importante ressaltar que a estação de captação superficial localizada na sub-bacia do Ribeirão do Monjolinho está em uma porção à Leste da sub-bacia, sendo a área de captação muito menor do que a área total em questão. Além disso, a incidência da Lei 13.944/2006 não abrange a sub-bacia completa, uma vez que foram definidos nela apenas as áreas de contribuição acima do ponto da estação de captação.

Figura 28: Distribuição por Sub Bacias Hidrográficas, conforme disponibilizado no portal da Prefeitura Municipal de São Carlos/SP

Distribuição percentual de classes por sub bacia hidrográfica



Fonte: Autor (2022)

Conforme discutido na revisão, a diversificação da captação de água superficial aumenta a resiliência do sistema de abastecimento e, distribuir pontos de captação em microbacias hidrográficas diferentes pode ser benéfico para a garantia de um sistema de abastecimento que tenha resiliência a eventos distintos que possam ocorrer em tais bacias hidrográficas. Além disso, o aumento de pontos de captação superficial pode reduzir a dependência de água subterrânea (aproximadamente 65% da captação em MAR/2020 de acordo com o Atlas Água) que passaria a cumprir a função de uso emergencial em casos de escassez, preservando assim os níveis de águas subterrâneas.

A identificação de tais áreas também é importante se consideradas as previsões de aumento populacional para São Carlos, que aumentarão a demanda e consequentemente o estresse hídrico causado aos lençóis freáticos. Isso, somado à possível deterioração dos sistemas de recarga destes aquíferos via processos de expansão da malha urbana e impermeabilização do solo, resulta em uma maior diferença entre a demanda exigida de tais sistemas e a oferta de água disponível.

5. Conclusão

A utilização exacerbada de recursos hídricos subterrâneos mostra-se um fator de estresse para o ciclo hidrogeológico, com a possibilidade de redução de níveis de aquíferos e lençóis freáticos e que pode levar a cenários de conflitos entre o abastecimento hídrico e outros usos. A diversificação do sistema de abastecimento, somado à identificação de locais chave para a conservação do fluxo de água em cursos de drenagem são pontos essenciais para a sustentabilidade de sistemas de abastecimento de cidades que apresentam previsões de crescimento populacional.

O uso da combinação do processo de análise hierárquico e análises em ambiente GIS levou à construção de um *framework* específico para a avaliação do potencial de contribuição para a sustentabilidade de sistemas de abastecimento hídrico superficiais e também para a identificação de áreas que possam servir para a diversificação dos sistemas de captação de superfície.

O sistema analisado com o *framework* proposto mostrou que os critérios selecionados para o trabalho apresentam ligação entre si e influenciam um ao outro, sendo o de menor peso aqueles políticos ligados ao ordenamento do uso da terra. A alteração do uso e cobertura do solo pode apresentar papel essencial na preservação do abastecimento público de água e está ligada à cobertura vegetal. Além disso, embora exista o arcabouço legal para preservação de cursos de drenagem, estes não estão sendo respeitados, o que apresentou influência negativa na análise conduzida. A aplicação real das medidas previstas no Plano Diretor podem influenciar positivamente o balanço hídrico, não somente das áreas que já operam no abastecimento municipal, mas também para as futuras áreas, mapeadas ou não pelo Plano Diretor.

O índice gerado também serve de base para guiar decisões quanto à substituição de captações subterrâneas para captações superficiais, pela identificação de áreas que não estão previstas no Plano Diretor de 2016 e que, mediante confirmação via estudos mais aprofundados de hidrologia, possam servir como fontes de captação. A substituição da modalidade de captação é importante para a preservação dos níveis de água subterrânea no município e como reserva para eventos períodos longos de escassez, que podem se tornar mais frequentes no futuro. Foram identificadas áreas que não estão em zonas com diretrizes de preservação a mananciais de água, inseridas 6B, 6C, 6D e 9A, em que a aplicação de medidas de preservação poderiam ser muito benéficas à sustentabilidade do abastecimento.

Foram identificadas áreas que podem exercer influência na preservação de recursos hídricos e também possíveis pontos de futura captação de água superficial que não estão previstos na diretriz de preservação e conservação de tais locais. A inserção de tais áreas em Leis mostra-se essencial para que o componente ambiental torne-se um fator realmente considerado no planejamento urbano municipal.

A sub bacia do Ribeirão das Araras, embora não seja contemplada pela Lei dos Mananciais e também não apresente diretrizes específicas no Plano Diretor apresentou bons resultados de acordo com a classificação realizada, com uma classificação contínua em classe Alta, que pode ser benéfico para a produção de água superficial, levando em conta também suas redes de drenagem e os números de nascentes que se concentram dentro do Município de São Carlos. Mais estudos podem ser realizados para caracterizar a vazão e a qualidade de água presente na sub bacia hidrográfica e também para avaliar a aptidão da sub bacia para integração no sistema de abastecimento ambiental do município.

Referências

- ROSSI, M. 2017. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. V.1. 118p. (inclui Mapas)
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2005a. Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil. Brasília. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>> Acesso em: 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Atlas Água. *In*: Atlas Água. Brasil, 2022. Disponível em: <<https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/1d27ae7adb7f4baeb224d5893cc21730>>. Acesso em: 2022.
- AL-SHABEEB, A. R.; AL-ADAMAT, R.; MASHAGBAH, A. AHP with GIS for a Preliminary Site Selection of Wind Turbines in the North West of Jordan. **International Journal of Geosciences**, v. 7, n. 10, p. 1208–1221, 19 out. 2016.
- BARBIERI, J. C. **Desenvolvimento sustentável: Das origens à agenda 2030**. [s.l.] Editora Vozes, 2020.
- DICIO. **Coerência - Dicio, Dicionário Online de Português**. Brasil, 2022. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/coerencia/>>. Acesso em: 25 ago. 2022.
- COSTA, C. W. et al. MONITORAMENTO DA EXPANSÃO URBANA, CENÁRIOS FUTUROS DE CRESCIMENTO POPULACIONAL E O CONSUMO DE RECURSOS HÍDRICOS NO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS, SP. **Geosciences = Geociências**, v. 32, n. 1, p. 63–80, 17 out. 2013.
- DE CARVALHO, J. W. L. T.; IENSEN, I. R. R.; DOS SANTOS, I. Resilience of Hydrologic Similarity Areas to extreme climate change scenarios in an urban watershed. **Urban Water Journal**, v. 18, n. 10, p. 817–828, 26 nov. 2021.
- DI MATTEO, L. et al. Climate change, water supply and environmental problems of headwaters: The paradigmatic case of the Tiber, Savio and Marecchia rivers (Central Italy). **Science of The Total Environment**, v. 598, p. 733–748, 15 nov. 2017.
- DUAN, K. et al. Understanding the role of regional water connectivity in mitigating climate change impacts on surface water supply stress in the United States. **Journal of Hydrology**, v. 570, p. 80–95, 1 mar. 2019.
- FALCÃO, E. C. **Análise de riscos à degradação ambiental utilizando avaliação multicritério espacial, no município de Boa Vista-PB, 2013, 126f.** [s.l.] tese de doutorado). Universidade Federal de Campina Grande–PB, 2013.
- HIRATA, R.; CONICELLI, B. P. Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84, p. 297–312, jun. 2012.
- HOWARD, K. W. F. Sustainable cities and the groundwater governance challenge.

Environmental Earth Sciences, v. 73, n. 6, p. 2543–2554, mar. 2015.

HUND, S. V. et al. Groundwater recharge indicator as tool for decision makers to increase socio-hydrological resilience to seasonal drought. **Journal of Hydrology**, v. 563, p. 1119–1134, 1 ago. 2018.

Hydrology Analyst > Flow Accumulation. In: SuperGeo Technologies Inc.. 2016
Disponível em:
<https://www.supergeotek.com/SpatialAnalyst_ENG_HTML/flow_accumulation.htm>.
Acesso em: 10 jul. 2022.

INSITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Panorama. In: IBGE@Cidades. Brasil, 2017. Disponível em:
<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos/panorama>>. Acesso em: 2022.

KIKER, G. A. et al. Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 1, n. 2, p. 95–108, 2005.

KITCHENHAM, B. Procedures for Performing Systematic Reviews. **Keele, UK, Keele Univ.**, v. 33, 1 ago. 2004.

LIMA, A. P.; AMORIM, M. C. DE C. T. ANÁLISE DE EPISÓDIOS DE ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES URBANAS NA CIDADE DE SÃO CARLOS A PARTIR DE NOTÍCIAS DE JORNAL. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, n. 0, 15 abr. 2015.

MALMIR, M. et al. Integrated groundwater management using a comprehensive conceptual framework. **Journal of Hydrology**, v. 605, p. 127363, 1 fev. 2022.

Mapbiomas Brasil | Coleções MapBiomas. Coleção 5. In: Mapbiomas. Brasil, 2019. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR>.
Acesso em: 10 jul. 2022.

MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. DE. APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) PARA ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO AMBIENTAL DA MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DOS CAVALOS, CRATEÚS-CE. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 23, n. 0, 3 nov. 2011.

Module Flow Accumulation (Top-Down) / SAGA-GIS Module Library Documentation (v2.3.0). In: SAGA. 2016 Disponível em:
<https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.3.0/ta_hydrology_0.html>. Acesso em: 21 jul. 2022.

MOGHADAS, M. et al. A Framework for Scaling Urban Transformative Resilience through Utilizing Volunteered Geographic Information. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 11, n. 2, p. 114, fev. 2022.

MORELLI, J. Environmental Sustainability: A Definition for Environmental Professionals. **Journal of Environmental Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 1–10, 1 nov. 2011.

MRÓWCZYŃSKA, M. et al. Scenarios as a tool supporting decisions in urban energy policy: The analysis using fuzzy logic, multi-criteria analysis and GIS tools. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, p. 110598, 1 mar. 2021.

NOORI, A. et al. A reliable GIS-based FAHP-FTOPSIS model to prioritize urban water supply management scenarios: A case study in semi-arid climate. **Sustainable Cities and Society**, v. 81, p. 103846, 1 jun. 2022.

PONS, N. A. D.; PEJON, O. J.; ZUQUETTE, L. V. Use of geoprocessing in the study of land degradation in urban environments: the case of the city of São Carlos, state of São Paulo, Brazil. **Environmental Geology**, v. 53, n. 4, p. 727–739, 1 dez. 2007.

ROSS, J. L. S. ANÁLISE EMPÍRICA DA FRAGILIDADE DOS AMBIENTES NATURAIS ANTROPIZADOS. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 8, p. 63–74, 1994.

ROSSI, M. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. v. 1, p. 118, 2017.

SAATY, T. L. Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, v. 13, n. 1, p. 1–35, 1 mar. 2004.

SANCHES, R. G. et al. As chuvas na região de São Carlos/SP: análise dos valores máximos diários na série histórica, 1993-2014. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 2280–2292, 2017.

SÃO CARLOS (SP). Lei 13.944/2006, de 12 de dezembro de 2006. Dispões sobre a criação das Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais do Município - APREM e dá outras providências. 2006.

SÃO CARLOS (SP). Lei 18.053, de 19 de Dezembro de 2016. Estabelece o Plano Diretor do Município de São Carlos, e dá outras providências. Dez. 2016.

SARTORI, A. A. DA C.; SILVA, R. F. B. DA; ZIMBACK, C. R. L. Combinação linear ponderada na definição de áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais em ambiente SIG. **Revista Árvore**, v. 36, p. 1079–1090, dez. 2012.

SMITH, S.; FESSEY, M.; WHITE, A. Generating Reasonable Alternatives: Lessons from UK Spatial Planning Practice. p. 7, 2011.

STANGANINI, F. N.; LOLLO, J. A. DE. O crescimento da área urbana da cidade de São Carlos/SP entre os anos de 2010 e 2015: o avanço da degradação ambiental. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 10, p. 118–128, 8 out. 2018.

TEKNOMO, K. Analytic hierarchy process (AHP) tutorial. **Revoledu. com**, v. 6, n. 4, p. 1–20, 2006.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY; U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. Hydrologic Cycle and Interactions. *In*: Natural processes of Ground-Water and surface-water interaction.

Estados Unidos da América, 2016. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/htdocs/natural_processes_of_ground.htm>. Acesso em: 14 maio. 2022.

VALLADARES, G. S. **Caracterização dos solos e classes de terra para irrigação do Oeste da Bahia.** [s.l.] Embrapa Territorial., 21 ago. 2003. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/linguaeliteratura/article/view/114570>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

VAN SCHMIDT, N. D.; WILSON, T. S.; LANGRIDGE, R. Linkages between land-use change and groundwater management foster long-term resilience of water supply in California. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 40, p. 101056, 1 abr. 2022.

WALLACE, S. et al. Tracing sources of stormflow and groundwater recharge in an urban, semi-arid watershed using stable isotopes. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 34, p. 100806, 1 abr. 2021.

ZHANG, H. et al. An integrated algorithm to evaluate flow direction and flow accumulation in flat regions of hydrologically corrected DEMs. **CATENA**, v. 151, p. 174–181, 1 abr. 2017.

ZHAO, G. et al. A modeling framework for evaluating the drought resilience of a surface water supply system under non-stationarity. **Journal of Hydrology**, v. 563, p. 22–32, 1 ago. 2018.