



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL -PPGECA

GUSTAVO MARQUES CALAZANS DUARTE

**MODELO CONCEITUAL ESTRATÉGICO DE PLANEJAMENTO DE
SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM MUNICÍPIOS DE
PEQUENO PORTE DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: APLICAÇÃO AO ESTADO DA
PARAÍBA**

CAMPINA GRANDE - PB
2024

GUSTAVO MARQUES CALAZANS DUARTE

**MODELO CONCEITUAL ESTRATÉGICO DE PLANEJAMENTO DE
SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM MUNICÍPIOS DE
PEQUENO PORTE DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: APLICAÇÃO AO ESTADO DA
PARAÍBA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, como requisito para obtenção do título de doutor.

Orientadores:
Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura.
Prof. Dr. Rui de Oliveira

CAMPINA GRANDE – PB
2024

D812m Duarte, Gustavo Marques Calazans.
Modelo conceitual estratégico de planejamento de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto em municípios de pequeno porte do semiárido brasileiro : aplicação ao Estado da Paraíba / Gustavo Marques Calazans Duarte. – Campina Grande, 2024.
122 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.
"Orientação: Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura, Prof. Dr. Rui de Oliveira".
Referências.

1. Estação de Tratamento de Esgoto Sustentável – Análise Bibliométrica. 2. Consórcio Intermunicipal para Tratamento de Esgoto - Paraíba. 3. Planejamento Urbano. 4. Eficiência Energética. 5. Desenvolvimento Regional. 6. Políticas Públicas. 7. Saneamento Inclusivo. I. Coura, Mônica de Amorim Coura. II. Oliveira, Rui de. Título.

CDU 628.32(813.3)(043)

GUSTAVO MARQUES CALAZANS DUARTE

**MODELO CONCEITUAL ESTRATÉGICO DE PLANEJAMENTO DE
SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM MUNICÍPIOS DE
PEQUENO PORTE DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: APLICAÇÃO AO ESTADO DA
PARAÍBA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, como requisito para obtenção do título de doutor.

BANCA EXAMINADORA

DR.^a MÔNICA DE AMORIM COURA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) – ORIENTADORA

DR. RUI DE OLIVEIRA – UEPB – COORIENTADOR

DR.^a ANDREA CARLA LIMA RODRIGUES – PPGECA/UFCG – EXAMINADORA INTERNA

DR. ANDRÉ LUIS CALADO ARAÚJO – IFRN – EXAMINADOR EXTERNO

DR.^a RUTH SILVEIRA DO NASCIMENTO - UEPB - EXAMINADORA EXTERNA

DR.^a ANDRÉA MARIA BRANDÃO MENDES DE OLIVEIRA - UACTA/CCTA - EXAMINADORA EXTERNA

Campina Grande - PB, setembro de 2024.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): GUSTAVO MARQUES CALAZANS DUARTE / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.ª MÔNICA DE AMORIM COURA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. RUI DE OLIVEIRA – UEPB – COORIENTADOR, DR.ª ANDREA CARLA LIMA RODRIGUES – PPGECA/UFCG – EXAMINADORA INTERNA, DR. ANDRÉ LUIS CALADO ARAÚJO – IFRN – EXAMINADOR EXTERNO, DR.ª RUTH SILVEIRA DO NASCIMENTO - UEPB - EXAMINADORA EXTERNA, DR.ª ANDRÉA MARIA BRANDÃO MENDES DE OLIVEIRA - UACTA/CCTA - EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 45/2024). / TITULO DA TESE: “MODELO CONCEITUAL ESTRATÉGICO DE PLANEJAMENTO DE SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: APLICAÇÃO AO ESTADO DA PARAÍBA/BR” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL / HORA DE INICIO: 14:00 HORAS / NO LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA I, BLOCO CR, , CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA DE FORMA HÍBRIDA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA, CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE TESE, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 19 DE NOVEMBRO DE 2024**



Documento assinado eletronicamente por **ANDRE LUIS CALADO ARAUJO, Usuário Externo**, em 26/11/2024, às 09:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rui de Oliveira, Usuário Externo**, em 26/11/2024, às 09:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MONICA DE AMORIM COURA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/11/2024, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 26/11/2024, às 10:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANDREA CARLA LIMA RODRIGUES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/11/2024, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Marques Calazans Duarte, Usuário Externo**, em 26/11/2024, às 16:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANDREA MARIA BRANDAO MENDES DE OLIVEIRA, COORDENADOR DE POS-GRADUACAO**, em 27/11/2024, às 11:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **RUTH SILVEIRA DO NASCIMENTO, Usuário Externo**, em 27/11/2024, às 15:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4992071** e o código CRC **A786CFD1**.

MODELO CONCEITUAL ESTRATÉGICO DE PLANEJAMENTO DE SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: APLICAÇÃO AO ESTADO DA PARAÍBA

GUSTAVO MARQUES CALAZANS DUARTE

Orientadores: Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura
Prof. Dr. Rui de Oliveira

RESUMO

Após dezessete anos da promulgação da Lei Federal nº 11.445/2007, que trata do saneamento básico brasileiro, muitos municípios ainda não alcançaram a universalização dos serviços de saneamento, especialmente no que se refere ao esgotamento sanitário e os processos decisórios institucionalizados. O escopo desta pesquisa consiste em examinar a progressão e tendências dos estudos acadêmicos acerca das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) sustentáveis no âmbito global e adequação delas para aplicação em climas semiáridos. Ademais, visa propor a formulação de um modelo de planejamento baseado na constituição de um consórcio regional entre municípios de pequeno porte, situados no estado da Paraíba, cujas sedes urbanas são próximas e compartilham situações semelhantes no que tange ao tratamento de esgoto, com o propósito de conceber estratégias para a universalização deste serviço. Na primeira fase, realizou-se uma revisão bibliométrica integrativa, empregando a base de dados da Web of Science. Utilizou-se o software VosViewer para visualizar e mapear a produção científica, identificando os principais clusters de pesquisa em relação às diversas tecnologias de tratamento de esgoto e sua relação com a sustentabilidade. Adicionalmente, efetuou-se uma revisão sistemática com o intuito de validar os resultados da revisão integrativa. Na segunda etapa, procedeu-se ao agrupamento dos municípios geograficamente próximos, definindo os municípios centrais e adjacentes de cada grupo. Subsequentemente, agruparam-se os municípios paraibanos com população inferior a 20.000 habitantes e que não possuem 100% de sua população urbana atendida por tratamento de esgoto, utilizando como critério o atributo da população urbana sem atendimento a tratamento de esgoto. Como resultado, obteve-se informações sobre tendências tecnológicas de tratamento de esgoto sustentável aplicáveis ao clima semiárido, tais como: alagados construídos, sistema de lagoas e filtros de areia. Foi possível também estabelecer agrupamentos de municípios aptos a consorciar-se, elaborando quatro cenários distintos para a implementação do consórcio, o cenário de abrangência média se mostrou o mais promissor. Para a sociedade, em especial para os gestores públicos e planejadores urbanos, os resultados fornecem uma base sólida para a formação de consórcios intermunicipais, otimizando recursos e aprimorando a eficiência no tratamento de esgoto em municípios de pequeno porte. Para a academia, os métodos e análises empregados no estudo servem como referência para pesquisas futuras e para o desenvolvimento de novas abordagens na gestão do saneamento básico.

Palavras-chave: Estação de tratamento de esgoto sustentável, Consórcios para tratamento de esgoto, Gestão sustentável do esgotamento, Análise bibliométrica das Estações de Tratamento de Esgoto sustentáveis, gestão consorciada, planejamento urbano, eficiência energética, desenvolvimento regional, políticas públicas, saneamento inclusivo.

**STRATEGIC CONCEPTUAL MODEL FOR PLANNING SUSTAINABLE
SEWAGE TREATMENT SOLUTIONS IN SMALL MUNICIPALITIES IN THE
BRAZILIAN SEMI-ARID REGION: APPLICATION TO THE STATE OF PARAÍBA**

GUSTAVO MARQUES CALAZANS DUARTE

Mentors: Profa. Dr. Mônica de Amorim Coura
Prof. Dr. Rui de Oliveira

ABSTRACT

Seventeen years after the enactment of Federal Law No. 11,445/2007, which deals with Brazilian basic sanitation, many municipalities have not yet achieved the universalization of sanitation services, especially with regard to sanitary sewage and institutionalized decision-making processes. The scope of this research is to examine the progression and trends of academic studies on sustainable Sewage Treatment Plants (ETEs) at the global level and their suitability for application in semi-arid climates. In addition, it aims to propose the formulation of a planning model based on the constitution of a regional consortium between small municipalities, located in the state of Paraíba, whose urban headquarters are close and share similar situations regarding sewage treatment, with the purpose of designing strategies for the universalization of this service. In the first phase, an integrative bibliometric review was carried out, using the Web of Science database. The VosViewer software was used to visualize and map the scientific production, identifying the main research clusters in relation to the various sewage treatment technologies and their relationship with sustainability. In addition, a systematic review was carried out in order to validate the results of the integrative review. In the second stage, the geographically close municipalities were grouped, defining the central and adjacent municipalities of each group. Subsequently, municipalities in Paraíba with a population of less than 20,000 inhabitants and that do not have 100% of their population served by sewage treatment were grouped, using as a criterion the attribute of the population without sewage treatment service. As a result, information was obtained on technological trends in sustainable sewage treatment applicable to the semi-arid climate, such as: constructed wetlands, pond system and sand filters. It was also possible to establish groups of municipalities able to consortium, elaborating four different scenarios for the implementation of the consortium, the scenario of medium coverage proved to be the most promising. For society, especially for public managers and urban planners, the results provide a solid basis for the formation of intermunicipal consortia, optimizing resources and improving efficiency in sewage treatment in small municipalities. For the academy, the methods and analyses used in the study serve as a reference for future research and for the development of new approaches in the management of basic sanitation.

Keywords: Sustainable sewage treatment plant, consortia for sewage treatment, sustainable sewage management, bibliometric analysis of sustainable sewage treatment plants, consortium management, urban planning, energy efficiency, regional development, public policies, inclusive sanitation.

DEDICATÓRIA

À minha querida esposa Italla, cujo amor, apoio e compreensão foram inabaláveis durante toda essa jornada. Você é minha fonte de inspiração diária e minha maior motivação. Esta conquista é tanto minha quanto sua.

Aos meus queridos pets, Bud e Simba, por estarem sempre ao meu lado, proporcionando momentos de alegria e tranquilidade.

À minha mãe, Conceição, por todo o amor, carinho e suporte emocional ao longo de minha vida. Sem você, nada disso seria possível.

Ao meu pai, Marco, engenheiro civil, doutor em engenharia e professor, por ser meu primeiro e maior exemplo de dedicação, excelência e paixão pela ciência. Sua trajetória profissional sempre me guiou e incentivou a buscar a realização dos meus sonhos.

À minha madrastra, Juliana, por seu carinho, compreensão e apoio incondicional. Sua presença na minha vida foi fundamental durante essa caminhada.

Às minhas queridas avós, Helena Marques e Jória Calazans, cuja sabedoria e ensinamentos moldaram quem eu sou hoje. Vocês são pilares de força e inspiração.

Aos meus irmãos, Mateo e Rafael, por estarem sempre ao meu lado, compartilhando alegrias e desafios. Suas presenças são um conforto inestimável.

Aos meus orientadores, Mônica Coura e Rui de Oliveira, por todo o conhecimento compartilhado, pela paciência e pela orientação imprescindível. Vocês foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos mentores da ciência de dados, André Calado e Gabriel Motta, pela orientação e pelos valiosos ensinamentos que enriqueceram esta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFCG, pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional.

À FAPESQ-PB, pela confiança e pelo financiamento do pesquisador, sem o qual esta pesquisa não seria possível.

Aos meus amigos Felipe e Jéssica, e Marcelo Queiroz, pela amizade, pelas palavras de incentivo e pelo apoio em momentos cruciais.

Por fim, aos pesquisadores da minha família, Ana Júlia Calazans e Ricardo Duarte, por contribuírem para um ambiente de conhecimento e pesquisa que tanto me inspira. E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu mais sincero agradecimento.

Com amor e gratidão,

Gustavo Marques Calazans Duarte

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Os três pilares da sustentabilidade.	17
Figura 2.2 - Aspectos importantes para a seleção de alternativas de tratamento de esgoto e comparação entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento.	19
Figura 2.3 - Fluxograma de pilares estratégicos para a implantação de ETE sustentáveis no Brasil.	20
Figura 2.4 – Avaliação da saúde dos metadados pesquisados.	23
Figura 2.5 - Principais informações dos metadados pesquisados.	24
Figura 2.6 – Número de documentos produzidos anualmente sobre ETEs sustentáveis.	25
Figura 2.7 – Número de documentos produzidos sobre ETEs sustentáveis por autor.	26
Figura 2.8 - Produção científica dos dez maiores produtores sobre ETEs sustentáveis.	27
Figura 2.9 - Número de documentos produzidos sobre ETEs sustentáveis por periódico.	28
Figura 2.10 - Municípios consorciados no Brasil e sedes dos consórcios.	30
Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia identificação de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto doméstico e aplicabilidade no clima semiárido.	39
Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia para a aplicação de modelo conceitual de planejamento estratégico com base em consórcio de municípios de pequeno porte da Paraíba.	48
Figura 4.1 - Mapa de sustentabilidade das tecnologias de tratamento de esgoto – WoS -1987 a 2023.	58
Figura 4.2 - Mapa de sustentabilidade das tecnologias de tratamento de esgoto – WoS -2018 a 2023.	60
Figura 4.3 - Métodos para definição de número ótimo de grupos: <i>Gap Statistic Method</i> e <i>WSS Method</i>	74
Figura 4.4 - Métodos para definição de número ótimo de grupos: <i>Gap Statistic Method</i> e <i>WSS Method</i>	77
Figura 4.5 – Mapa geográfico da Paraíba destacando os grupos de municípios consorciáveis elaborados.	80
Figura 4.6 - Gráfico tridimensional do grupo de proximidade Grupo1.	83
Figura 4.7 - Gráfico tridimensional do grupo de proximidade Grupo2.	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Fases da revisão integrativa e aplicação nesta pesquisa.	38
Quadro 3.2 - Descritores aplicados nas buscas da plataforma WoS.	41
Quadro 3.3 - Fases da análise sistemática e aplicações neste estudo.	44
Quadro 3.4 - Passos procedimentais para constatação da saturação teórica.	44
Quadro 4.1 - Termos relacionados à sustentabilidade econômica.	54
Quadro 4.2 - Termos relacionados à sustentabilidade ambiental.	55
Quadro 4.3 - Termos relevantes nos documentos pesquisados no período de 1987 a 2023.	57
Quadro 4.4 - Termos relevantes nos documentos pesquisados no período de 2018 a 2023.	59
Quadro 4.5 - Análise sistemática de documentos (período de publicação: 2018-2023) referentes às tecnologias sustentáveis definidas na análise integrativa.	61
Quadro 4.6 - Aspectos qualitativos das estações de tratamento de esgoto do Século XXI.	68
Quadro 4.7 - Análise das tecnologias sustentáveis de tratamento de esgoto aplicáveis às regiões semiáridas à luz dos aspectos qualitativos das estações de tratamento de esgoto do Século XXI.	68
Quadro 4.8 – Dez primeiros municípios elegidos para o estudo de caso.	72
Quadro 4.9 - Matriz de distâncias entre as sedes dos municípios eleitos, em quilômetros.	73
Quadro 4.10 – Cinco grupos de municípios próximas e as distâncias entre os municípios centrais e os adjacentes de cada grupo.	75
Quadro 4.11 - Municípios agrupados mediante o atributo de similaridade da população urbana sem tratamento de esgoto.	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 OBJETIVO GERAL	13
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.4 HIPÓTESES	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 MARCO TEÓRICO.....	15
2.1.1 <i>Panorama do tratamento de esgoto doméstico no Brasil</i>	15
2.2 SUSTENTABILIDADE E TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	16
2.2.1 <i>Seleção de tecnologias sustentáveis de tratamento de esgoto doméstico</i>	18
2.3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	20
2.3.1 <i>Estudos de análises bibliométricas sobre o tema deste trabalho</i>	21
2.3.2 <i>Análise bibliométrica descritiva sobre ETs sustentáveis: panorama das pesquisas científicas</i>	22
2.4 CONSÓRCIO PÚBLICO: UMA ALIANÇA FEDERATIVA PARA A EFICIÊNCIA E A SUSTENTABILIDADE	28
2.4.1 <i>Consequências de um modelo de gestão consorciado</i>	30
2.5 MODELO CONCEITUAL ESTRATÉGICO DE PLANEJAMENTO DE SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	33
2.6 ESCOLHA DE TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE ESGOTO SUSTENTÁVEL PARA MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE.....	35
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 IDENTIFICAÇÃO DE SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO (ETAPA 1).....	38
3.1.1 <i>Revisão bibliométrica integrativa</i>	38
3.1.2 <i>Análise estatística e gráfica - análise integrativa</i>	42
3.1.3 <i>Análise sistemática - validação dos resultados integrativos</i>	42
3.2 FORMULAÇÃO DE MODELO CONCEITUAL DE PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO COM BASE EM CONSÓRCIO DE MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE (ETAPA 2).....	45
3.2.1 <i>Análise do modelo de gestão baseada em consórcios municipais</i>	45
3.2.2 <i>Definição de estratégia de agrupamento de municípios</i>	45
3.2.3 <i>Definição dos critérios de consórcio</i>	46
3.2.4 <i>Desenvolvimento do modelo conceitual</i>	47
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE PLANEJAMENTO AOS MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE DO ESTADO DA PARAÍBA (ETAPA 3)	47
3.3.1 <i>Seleção dos municípios consorciáveis</i>	48
• <i>Análise dos municípios do estado da Paraíba com população menor que 20.000 habitantes</i>	48
3.3.2 <i>Análise da proximidade geográfica dos municípios com população menor que 20.000 habitantes</i>	50
3.3.3 <i>Implementação do modelo</i>	50
3.3.4 <i>Avaliação do modelo</i>	51
• <i>Limitações metodológica, vieses de resultados e desafios da identificação de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto doméstico</i>	51
• <i>LIMITAÇÕES METODOLÓGICA, VIESES DE RESULTADOS E DESAFIOS DA ELABORAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL</i>	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 IDENTIFICAÇÃO DE SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO	54
4.1.1 <i>Descritores da dimensão econômica</i>	54
4.1.2 <i>Descritores da dimensão ambiental</i>	54
4.1.3 <i>Descritores da dimensão social</i>	55
4.1.4 <i>Mapa de relação e agrupamentos de termos relevantes</i>	56
4.1.5 <i>Mapa de sustentabilidade das tecnologias de tratamento de esgoto mais pesquisadas entre 1987 e 2023</i>	57
4.1.6 <i>Mapa de sustentabilidade das tecnologias de tratamento de esgoto mais investigadas entre 2018 e 2023</i>	59
4.2 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DA SEÇÃO 4.1	60
4.2.1 <i>Análise da aplicabilidade das tecnologias de tratamento de esgoto ao clima semiárido</i>	62
4.3 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DAS INVESTIGAÇÕES DA PRIMEIRA ETAPA.....	67
4.3.1 <i>Comparação com a literatura clássica brasileira</i>	67

4.4 APLICAÇÃO DO MODELO FORMULADO EM MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE DO ESTADO DA PARAÍBA	71
4.4.1 <i>Municípios elegíveis para a aplicação do modelo formulado</i>	71
4.4.2 <i>Agrupamento de municípios próximas geograficamente</i>	72
4.4.3 <i>Agrupamento de municípios em situação semelhante quanto ao atendimento de tratamento de esgoto</i>	75
4.4.4 <i>Análise em mapa dos grupos de municípios consorciáveis</i>	79
4.4.5 <i>Análise dos municípios consorciáveis</i>	81
4.5 DISCUSSÃO DOS FATORES AMBIENTAIS, ECONÔMICOS E SOCIAIS DO CONSORCIAMENTO DE MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE.....	87
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	90
REFERÊNCIAS	92
APÊNDICE A	98
APÊNDICE B	104
APÊNDICE C	108

1 INTRODUÇÃO

As obras de engenharia desempenham papel fundamental na proteção do meio ambiente e na promoção da saúde pública de forma econômica e socialmente viáveis. São exemplos parques urbanos e áreas verdes, sistemas de transporte sustentável, parques de geração de energia eólica e solar, bem como diversos componentes do saneamento básico urbano: estações de tratamento de água, sistemas de gestão de resíduos sólidos, sistemas de águas pluviais e sistemas de esgotamento sanitário, inclusive as estações de tratamento de esgoto.

O saneamento básico, particularmente o tratamento de esgoto, tem o potencial de gerar benefícios econômicos e sociais significativos. A redução dos gastos governamentais com saúde, decorrente da diminuição das internações por doenças de veiculação hídrica, é um exemplo claro dessa relação (Brasil, 2020). Além disso, a melhoria do ambiente pode aumentar a produtividade dos trabalhadores, diminuir os gastos com medicamentos e fomentar a inclusão social em áreas carentes (United Nations Development Programme (UNDP), 2006). Segundo a Organização Mundial da Saúde, cada dólar investido em esgotamento sanitário e acesso a água potável em países em desenvolvimento pode gerar um retorno econômico de 4,3 dólares (Hutton e Haller, 2004)

Assim, é imperativo direcionar especial atenção ao esgotamento sanitário, o qual desempenha papel fundamental na salubridade ambiental. Esse cenário se mostra particularmente crítico nas regiões norte e nordeste do Brasil, onde as taxas de cobertura de esgotamento sanitário estão entre as mais baixas do país (ANA, 2017).

Apesar dos benefícios evidentes e das diretrizes estabelecidas pela Lei n.º 11.445/2007, que estabelece as bases para a política federal de saneamento básico, esse setor ainda recebe prioridade inadequada na agenda de desenvolvimento nacional. Em 2019, apenas 54% dos municípios brasileiros contavam com serviço de esgotamento sanitário por rede coletora de esgoto, e somente 79% do esgoto coletado era submetido a tratamento (BRASIL, 2019).

A gestão sustentável de efluentes é essencial para a preservação ambiental e a saúde pública, constituindo-se um tema de elevada relevância científica e social. Contudo, há uma lacuna expressiva na literatura sobre Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) sustentáveis, particularmente no tocante a revisões abrangentes que consolidem o conhecimento adquirido e identifiquem as tendências e inovações tecnológicas mais promissoras.

A carência de estudos de revisão bibliométrica sobre ETEs sustentáveis revela a necessidade de aprofundar a compreensão de métodos e tecnologias que promovam eficiência e

reutilização de recursos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em 2024, em busca na base de dados da *Web of Science*, observou-se diferença significativa na quantidade de estudos sobre ETEs sustentáveis, ou seja, ETEs com foco em economia circular e ETEs sem o enfoque na economia circular. Foram encontrados 92.416 documentos que abordam ETEs sem um foco explícito na economia circular, sugerindo que uma ampla gama de pesquisas ainda não incorpora conceitos de recuperação de recursos. Em contraste, apenas 14.324 (15,5% do total) documentos discutem ETEs com uma ênfase na economia circular, refletindo uma menor quantidade de estudos que integram práticas de sustentabilidade que priorizam a recuperação e reutilização de recursos.

Essa lacuna é ainda mais acentuada em regiões de clima semiárido, que enfrentam desafios singulares relacionados ao abastecimento de água e ao esgotamento sanitário. Dos 14.324 documentos que discutem ETEs sustentáveis, apenas 519 (3,6% de 14.324) documentos focam esses tipos de ETEs para o clima semiárido, no ano de 2024. As especificidades dessas regiões demandam soluções adaptadas às suas condições ambientais, o que torna o tratamento sustentável de efluentes uma questão de extrema complexidade e relevância.

Ademais, a dificuldade das administrações municipais em cumprir as metas estabelecidas pela Lei nº 11.445/2007, especialmente no que concerne à universalização dos serviços de esgotamento sanitário, destaca a necessidade de estratégias inovadoras e colaborativas. Nesse contexto, a formação de consórcios regionais entre municípios de pequeno porte emerge como uma solução promissora. A criação de consórcios representa uma abordagem estratégica que pode otimizar recursos, expertise e esforços conjuntos para enfrentar os desafios complexos do tratamento sustentável de efluentes.

O estabelecimento de parcerias intermunicipais permite compartilhar responsabilidades e conhecimentos, potencializando a eficiência e a eficácia das ações de saneamento. Essa abordagem colaborativa não apenas maximiza a utilização de recursos financeiros e técnicos, mas também fortalece a capacidade institucional dos municípios, promovendo a resiliência e a sustentabilidade das iniciativas de esgotamento sanitário.

Portanto, a presente pesquisa se justifica pela necessidade de preencher essas lacunas teóricas e práticas, fornecendo uma base científica robusta e uma estratégia aplicável para a implementação de soluções sustentáveis de tratamento de efluentes em regiões semiáridas, com

foco na formação de consórcios intermunicipais.

1.2 Objetivo geral

Desenvolver um modelo conceitual estratégico para a implementação de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto em municípios de pequeno porte do semiárido brasileiro, com foco na aplicação prática em consórcios intermunicipais no estado da Paraíba.

1.3 Objetivos específicos

- a) Identificar as soluções sustentáveis de tratamento de esgoto domésticos, por meio de análise bibliométrica.
- b) Avaliar a aplicabilidade de tecnologias sustentáveis de tratamento de esgoto a realidade do semiárido.
- c) Formular modelo conceitual de planejamento estratégico de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto com base em consórcio de municípios de pequeno porte, a partir da distância geográfica entre municípios, população urbana sem atendimento de esgoto dos municípios e com algoritmo de agrupamento k-média.
- d) Aplicar o modelo de planejamento aos municípios com até 20.000 habitantes do estado da Paraíba.

1.4 Hipóteses

Hipótese 1: A análise bibliométrica das produções científicas permitirá a identificação das tecnologias mais sustentáveis para o tratamento de esgoto.

Hipótese 2: As tecnologias de tratamento de esgoto frequentemente estudadas na literatura como sustentáveis adaptadas a climas semiáridos podem ser definidas por meio de análise de correlação de termos em documentos científicos.

Hipótese 3: A formação de consórcios regionais entre municípios de pequeno porte representa estratégia relevante para a otimização de recursos a no tratamento de esgoto.

Hipótese 4: A aplicação do modelo de planejamento estratégico aos municípios de

pequeno porte do estado da Paraíba resultará em agrupamentos consorciáveis factíveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Marco teórico

2.1.1 Panorama do tratamento de esgoto doméstico no Brasil

No Brasil, apenas 43% da população tem esgoto coletado e tratado e 12% utilizam fossa séptica, 18% têm esgoto coletado e não tratado, e 27% não possuem coleta nem tratamento, isto é, sem atendimento por serviço de coleta de esgoto sanitário. Esses dados demonstram que boa parte da população ainda não tem acesso a direitos constitucionais básicos (ANA, 2017). Corroborando com a ANA (2017), o SNIS-AE (2020), hoje SINISA, torna público dados: 2.807 municípios (59,2% da amostra) contavam com sistemas públicos de esgotamento sanitário e em 1.937 (40,8%) municípios eram utilizadas soluções alternativas individuais como fossa séptica, fossa rudimentar, vala a céu aberto e lançamento em cursos d'água. Dessas alternativas, apenas a fossa séptica é considerada como adequada pelo Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab).

Noyola et al (2012) em trabalho de cooperação internacional verificaram em levantamento sobre ETE na América Latina e Caribe que os tipos mais utilizados nesses países são: lagoas de estabilização (38% ou 1.106 unidades), lodos ativados (26% ou 760 unidades) e reatores UASB (493 unidades ou 17% da amostra), perfazendo, esses três tipos, 80% dos sistemas de tratamento em funcionamento na região, segundo essa amostra.

Ao comparar-se o Brasil com outros países da América Latina, como Bolívia, México, Peru e Chile, percebe-se que, em 2020, segundo esse autor, o Brasil contava com 37,6% da população com esgoto tratado (porém, ao se comparar com dados do SNIS (2020, possuía 55,0%), ao passo que os outros países referidos têm 32,9%, 49,7%, 49,8% e 72,8%, respectivamente. É perceptível, considerando o dado do SNIS, que o Brasil está melhor em relação aos outros países, exceto Chile, no avanço à universalização do tratamento de esgoto (Fuchs *et al.*, 2022)

Segundo a ANA (2017), há a expectativa de que a implementação das soluções de esgotamento e os investimentos serão feitos de forma gradual. Para o horizonte de 2035 foi estimado o valor de R\$ 149,5 bilhões em obras de coleta e tratamento dos esgotos, com foco na universalização do esgotamento sanitário e na proteção dos recursos hídricos e no seu uso sustentável

De acordo com Von Sperling (2014), as tecnologias de tratamento de esgoto mais comumente utilizadas no Brasil são as lagoas de estabilização, disposição no solo, sistemas

alagados construídos (do inglês wetlands ou a sigla em português SAC), sistemas anaeróbios, lodos ativados e reatores anaeróbios com biofiltros.

2.2 Sustentabilidade e tecnologia de tratamento de esgoto

A escolha da tecnologia de tratamento de esgoto adequada depende de muitas variáveis multidisciplinares e se torna mais complexa ao passo que as populações crescem de forma concentrada nos centros urbanos, impondo limites cada vez mais difíceis de serem atingidos para a manutenção da salubridade dos corpos hídricos receptores.

As ETEs do presente, se bem projetadas, construídas e operadas, podem obter elevadas eficiências de remoção (matéria orgânica e nutrientes), cumprindo papel primordial no controle da poluição da água.

Independentemente do nível de tratamento, os requisitos a serem atendidos para o efluente são definidos em função da legislação ambiental específica (CONAMA nº 430/2011 e nº 357/05), que prevê padrões de qualidade para o efluente em função do enquadramento do corpo receptor. Tal premissa é destacada por Von Sperling e Cernicharo (2000) que reforçam a tese de que os padrões de lançamento devem ser associados também a tecnologias de tratamento apropriadas e economicamente viáveis.

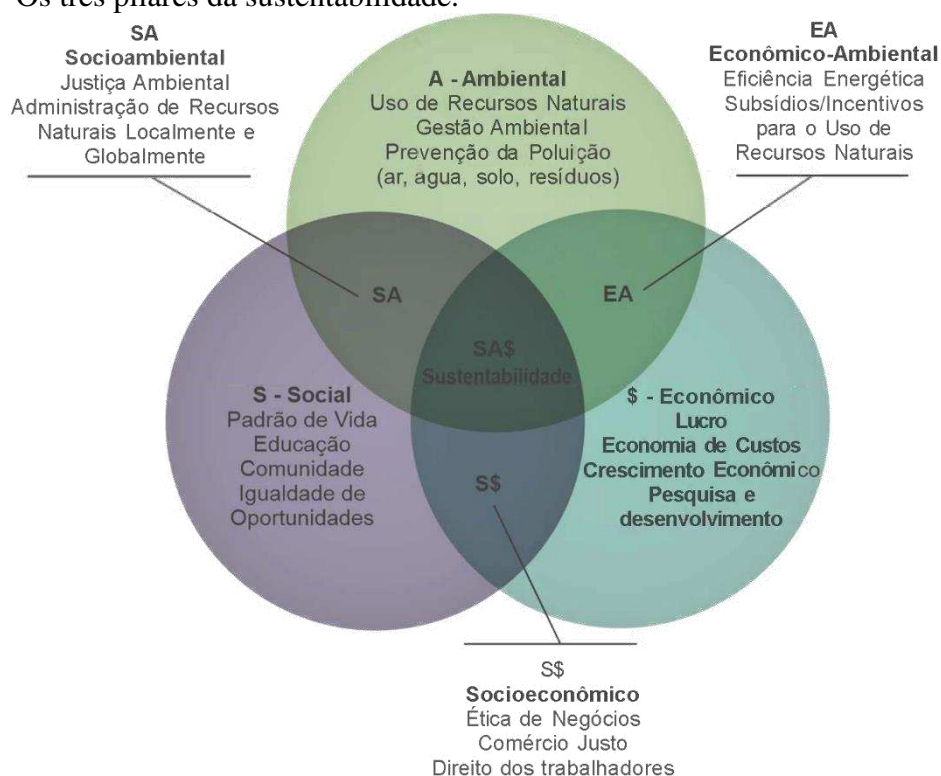
A Lei Federal nº. 11.445/2007, que estabelece a Política de Saneamento Básico no Brasil, em seu Artigo 48, destaca estas questões quando baseia as diretrizes dessa nova política em torno dos seguintes pontos: desenvolvimento sustentável, eficiência, eficácia e adequada regulação; adoção de critérios de renda e cobertura, urbanização, concentração populacional, disponibilidade hídrica, riscos sanitários, epidemiológicos e ambientais; articulação com as políticas para o desenvolvimento urbano e regional, habitação, combate e erradicação da pobreza, proteção ambiental, promoção da saúde e outras de interesse social e desenvolvimento científico. Similarmente, o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) aduz que se deve “adotar estratégias e formular instrumentos de integração que considerem os impactos e efeitos diretos e indiretos em relação às políticas de saúde, desenvolvimento urbano e regional, recursos hídricos e meio ambiente”.

Como base importante para este trabalho, o projeto *LAC - cities adapting to climate change by making better use of their available bioenergy resource*, ou em português: adaptação de municípios às mudanças climáticas, fazendo melhor uso de seus recursos de bioenergia disponíveis, identificaram que na América Latina são as lagoas de estabilização que são mais

adotadas como ETEs. A Análise do Ciclo de Vida mostrou que as lagoas de estabilização representam o maior potencial de mitigação de gases do efeito estufa (GEE) se forem cobertas e o biogás capturado, enquanto os reatores anaeróbicos seguidos de pós-tratamento têm a menor pegada de carbono (Noyola Robles *et al.*, 2013).

Segundo Paulo *et al.*, (2019), a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) considera o uso de indicadores de sustentabilidade, essencial na abordagem de sistemas integrados, auxiliando nos processos decisórios (USEPA, 1998). A Figura 2.1 ilustra graficamente esses pilares da sustentabilidade como auxiliares para decisões.

Figura 2.1 - Os três pilares da sustentabilidade.



Fonte: Adaptado de Paulo e colaboradores (2019).

Portanto, nessa nova perspectiva, uma ETE sustentável baseia seu gerenciamento integrando todos os subprodutos gerados no processo de forma a reutilizá-los ou reprocessá-los, seja como fonte alternativa de água, aproveitamento do potencial de geração de energia ou recuperação de nutrientes (Cheng *et al.*, 2019).

Percebe-se o alinhamento da Lei nº. 11.445/2007, ao conceito “berço ao berço” (que é a oposição da ideia “berço ao túmulo”), ou economia circular, inspirando a criação de sistema produtivo circular, com capacidade de transformar o efluente tratado em recursos com valor agregado, e rompendo com o modelo atual, cujo objetivo se assenta no simples atendimento a padrões legais de lançamento em corpo receptor (Chrispim, Scholz e Nolasco, 2019).

As estações de tratamento de esgoto registraram, ao longo do tempo, a adoção de novas tendências de desenvolvimento tecnológico mais sustentáveis (Lenart-Boroń et al., 2019; Makisha e Georgina, 2017; Morihama, 2018), das quais se destacam:

- a) Eficiência: atendimento a padrões de qualidade cada vez mais restritivos, tratando esgoto a taxas cada vez maiores.
- b) Compacidade: ocupar o menor espaço necessário para o desenvolvimento dos processos.
- c) Automação: redução da incidência de falhas causadas pela atividade humana.
- d) Economia de energia: tecnologias que demandam baixo consumo energético.
- e) Produção e processamento de lodo: minimizar a geração de lodo de excesso, assegurando sua higienização e mineralização avançada.
- f) Diminuição na produção de lodo.
- g) Controle de odores: coberturas e processos de desodorização dos gases provenientes do processamento do esgoto.
- h) Confiabilidade: adoção de tecnologias que equilibrem operação e manutenção, oferecendo estabilidade à estação.
- i) Novos materiais e métodos construtivos: minimizar custos de implantação e aumentar a vida útil das instalações.

Essas tendências indicam a necessidade de mudanças no setor de saneamento para que maiores ganhos sejam incorporados aos processos de tratamento de esgoto doméstico, dada a ampliação da discussão no momento de tomada de decisão por parte dos gestores do serviço, guiadas por estudos e ferramentas comprovadamente adequadas a esse setor.

Como gargalo para implantação de ETEs sustentáveis no Brasil, Chernicharo e Mota (2020) elencam o pouco conhecimento disponibilizado para tomadores de decisão (e empresas de projeto e consultoria) e a falta de visão dos tomadores de decisão acerca dos benefícios das ETEs sustentáveis.

2.2.1 Seleção de tecnologias sustentáveis de tratamento de esgoto doméstico

Segundo Chernicharo e Mota (2020), no panorama atual as ETEs são constituídas sem a intenção de reaproveitamento de matéria e energia. As ETEs não sustentáveis têm a destinação de lodo em aterros, lixões ou rios, com gastos com transporte de lodo, geração de gases de efeito estufa, os efluentes líquidos são lançados em cursos de água, há a perda de nutrientes e poluição

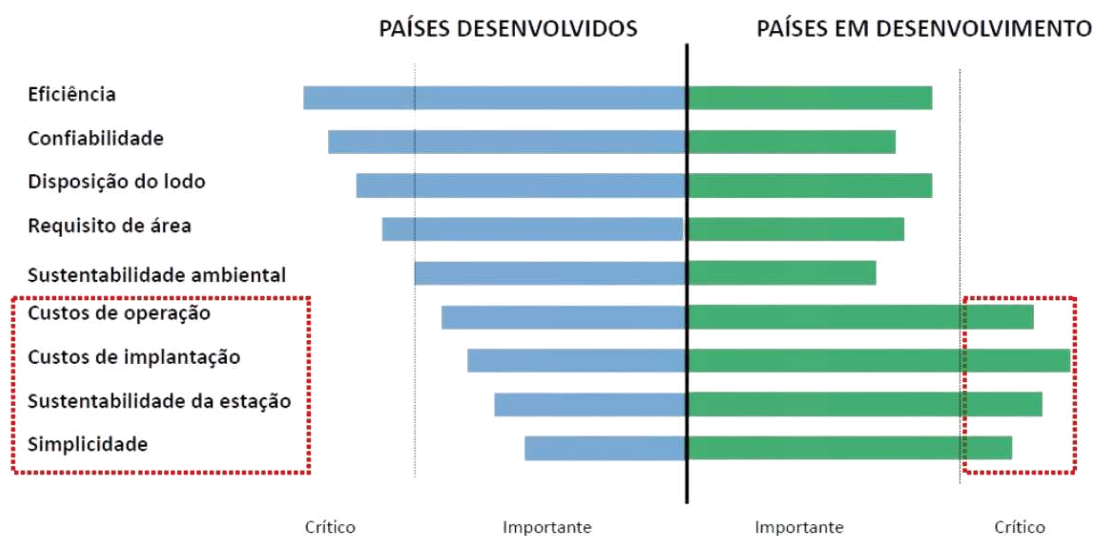
das águas. Na etapa gasosa, têm o biogás simplesmente queimado, com queimadores ineficientes, há emissões odorantes e de metano e perda de potencial energético. Esses pesquisadores ainda comentam que há esforços descentralizados, desarticulados e incipientes que, na maioria das vezes, abordam apenas uma das possibilidades de reutilização de matéria e energia nas ETEs.

Uma das principais formas de tornar as ETEs mais sustentáveis é focar na economia circular. A economia circular é um modelo de produção e consumo que busca reduzir o desperdício e maximizar o reaproveitamento dos recursos. Isso pode ser feito através de uma série de medidas, como a reciclagem de materiais, a produção de energia a partir de fontes renováveis e a utilização de subprodutos de ETEs.

A região semiárida brasileira caracteriza-se por condições climáticas adversas, marcadas pela escassez hídrica. Essa particularidade ambiental torna o tratamento de esgoto uma ótima ferramenta de mitigação dessa condição quando é concebido como um pilar fundamental dentro dos princípios da economia circular.

Na Figura 2.2 são apresentados graficamente aspectos importantes os quais devem ser avaliados na decisão da tecnologia de tratamento de esgoto. Observa-se a diferença de interesse entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento. Para aqueles, a eficiência, confiabilidade, disposição adequada de lodo e requisito de área são itens fundamentais e críticos, já para países em desenvolvimento nota-se que os custos de operação e implantação, a sustentabilidade financeira e a simplicidade de operação são as óticas mais relevantes.

Figura 2.2 - Aspectos importantes para a seleção de alternativas de tratamento de esgoto e comparação entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento.



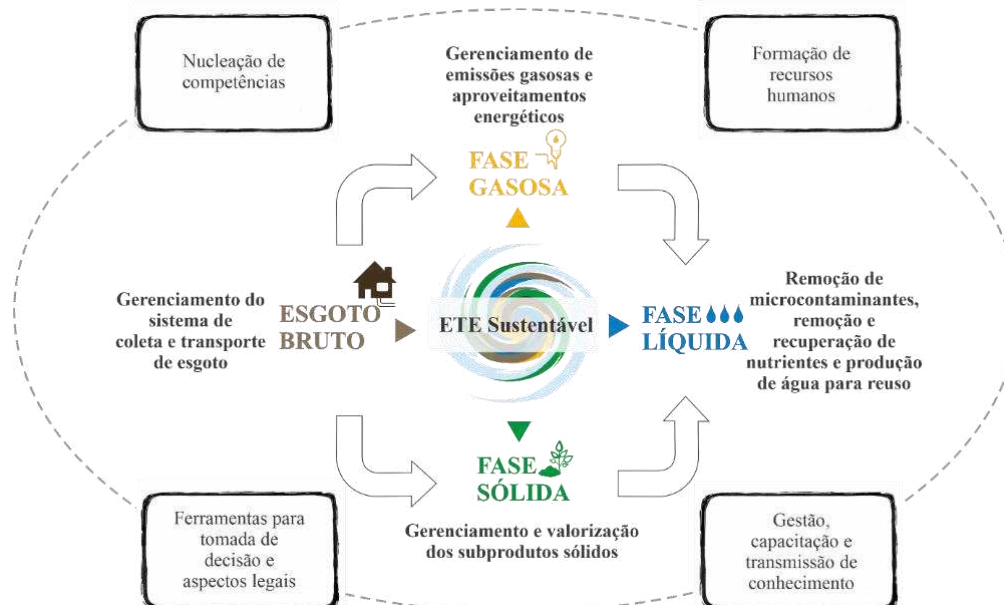
Fonte: Von Sperling (2014).

Chernicharo e Mota (2020) mostram na Figura 2.3 os pilares estratégicos para a

Gustavo Marques Calazans Duarte *Tese de Doutorado – PPGECA – UFCG*

implantação de ETEs sustentáveis no Brasil, dentre eles destaca-se o pilar de tomada de decisão mostrando a relevância desta tese no processo de tornar de ETEs como plantas de aproveitamento de subprodutos mais comuns.

Figura 2.3 - Fluxograma de pilares estratégicos para a implantação de ETE sustentáveis no Brasil.



Fonte: Adaptado de Von Sperling (2014).

Para fins de especificação neste trabalho, serão consideradas ETEs sustentáveis as que tiverem foco na economia circular e apresentarem pelo menos um aproveitamento de subproduto.

2.3 Análise bibliométrica

Os dados estatísticos elaborados por meio dos estudos bibliométricos mensuram a contribuição do conhecimento científico derivado das publicações em determinadas áreas. Esses dados podem ser utilizados na representação das atuais tendências de pesquisa e na identificação de temas para novas pesquisas.

A bibliometria pode ser aplicada em diferentes campos do conhecimento, tais como a medicina, a psicologia, a educação, entre outros. Uma análise bibliométrica reúne percepções de diferentes fluxos de pesquisa, contribui para a categorização da literatura sobre o tema e fornece direções de pesquisas futuras promissoras em termos de áreas e estratégias de pesquisa (Veloutsou e Ruiz Mafe, 2020).

Ferramentas como o VOSViewer e o Bibliometrix têm sido amplamente utilizadas para realizar análises bibliométricas, permitindo visualizar a rede de colaborações entre autores e

instituições, identificar tendências e direcionar pesquisas futuras. Neste contexto, a temática de sustentabilidade em tratamento de esgoto tem recebido cada vez mais atenção por parte da comunidade científica, e o VOSViewer e o Bibliometrix têm sido utilizados para analisar a produção científica nessa área.

O VOSViewer é uma ferramenta que permite a elaboração de mapas para esse fim e ainda tem a vantagem de tornar as revisões de literatura mais compreensíveis (Jin, Yuan e Chen, 2019). Na literatura sobre metrologia, por exemplo, a atenção tem sido dada principalmente à criação de mapas de literatura de metrologia, com estudos investigando diferentes medidas de similaridade e técnicas de mapeamento. Essa ferramenta é importante para a elaboração de revisões bibliométricas (Eck, van e Waltman, 2010) e ainda para complementar as revisões bibliométricas tradicionais com o uso de metodologia capaz de relacionar trabalhos e palavras (Zupic e Čater, 2015).

O Bibliometrix é ferramenta criada para realizar análises abrangentes de mapeamento científico. Como está programada em ambiente R, a ferramenta proposta é flexível e pode ser rapidamente atualizada e integrada com outros pacotes R estatísticos. É, portanto, útil em uma ciência em contínua mudança, como a bibliometria (Aria e Cuccurullo, 2017). Essa ferramenta se baseia em várias técnicas estatísticas e gráficas (Oliveira, Guerra e McDonnell, 2018).

Em suma, a análise bibliométrica é uma metodologia amplamente utilizada na pesquisa científica, que permite a avaliação quantitativa da produção e do impacto das publicações científicas. Essa metodologia é aplicável em diferentes áreas do conhecimento, permitindo a identificação de tendências e padrões de produção, colaboração e impacto das publicações. A utilização da bibliometria na gestão da informação científica pode auxiliar na tomada de decisões importantes, contribuindo para o avanço do conhecimento em diferentes áreas do saber (Pinto *et al.*, 2021).

2.3.1 Estudos de análises bibliométricas sobre o tema deste trabalho

Um exemplo de estudo sobre análise bibliométrica na temática de sustentabilidade em tratamento de esgotos foi realizado por Freire e colaboradores (2023), que identificaram crescente quantidade de publicações sobre o tema e algumas metodologias importantes como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e a Análise Multicritério. Além disso, concluiu-se que, embora existam várias publicações sobre o tema, em alguns artigos e metodologias não são abordados todos os pilares da sustentabilidade.

Outro estudo relevante foi conduzido por Mesaca e colaboradores (2022), que buscaram mapear a produção científica sobre Alagados construídos como tecnologia limpa, utilizando a plataforma Scopus para pesquisa de periódicos. Os resultados destacam temas como Alagados construídos, sistemas híbridos, reuso de efluentes, tecnologia limpa, remoção de poluentes agrícolas e geração de gases de efeito estufa. Observou-se um crescimento nas publicações relacionadas ao tema nos últimos anos, indicando novas oportunidades para futuras pesquisas em tecnologias limpas.

Além disso, alguns estudos têm se concentrado em analisar a colaboração entre autores e instituições na produção científica sobre a temática de sustentabilidade em tratamento de esgotos. A pesquisa de Netto (2019) analisou publicações científicas sobre sistemas descentralizados de esgoto no Brasil no período de 2000 a 2018. O estudo evidenciou o crescimento da exploração do tema, a colaboração com pesquisadores europeus e a escassez de publicações em regiões brasileiras com deficiência no saneamento, tal como as regiões semiáridas brasileiras.

Marques e colaboradores (2022), realizaram estudo que teve como objetivo conhecer a produção científica relacionada ao uso de águas residuais na agricultura, sua evolução, áreas de concentração e possíveis lacunas. O estudo identificou redes colaborativas no desenvolvimento da produção científica, bem como lacunas temporais para a produção de novos estudos e discussões sobre o uso de águas residuais na agricultura.

Outros autores têm estudado temas relacionados à sustentabilidade no tratamento de esgoto e aplicado métodos de análise bibliométrica e definido importantes marcos na pesquisa científica dessa área (Freire et al., 2023; Marques et al., 2022; Netto, 2019; Pinto et al., 2021; Velousou; Ruiz Mafe, 2020). Ainda, na literatura há disponíveis estudos que objetivavam o auxílio na decisão de tecnologia de tratamento de esgoto (Chhipi-Shrestha, Hewage e Sadiq, 2017; Jajac *et al.*, 2019; Kalbar, Karmakar e Asolekar, 2012; Leoneti, 2012; Makropoulos *et al.*, 2008; Notaro *et al.*, 2015; Oliveira, 2004; Ullah *et al.*, 2020).

2.3.2 Análise bibliométrica descritiva sobre ETEs sustentáveis: panorama das pesquisas científicas

Com o objetivo de identificar a evolução da produção científica ao longo do tempo, foram elaborados gráficos e tabelas para mostrar a distribuição dos estudos por ano de publicação, identificar períodos de maior produção, identificar principais autores do tema, identificar as

revistas que mais publicam o assunto.

A saúde dos metadados coletados na WoS e analisados neste trabalho foi avaliada de acordo com a

Figura 2.4. Nela são mostradas as quantidades das variáveis faltantes nos documentos. Os termos que podem produzir algum tipo dúvida são definidos: TC é o número de vezes que o manuscrito foi citado; NR é número de referências citadas no documento; CR é a contagem dos manuscritos citados por outros manuscritos da base de metadados analisada.

Figura 2.4 – Avaliação da saúde dos metadados pesquisados.

Metadata	Description	Missing Counts	Missing %	Status
AU	Author	0	0.00	Excellent
DT	Document Type	0	0.00	Excellent
SO	Journal	0	0.00	Excellent
LA	Language	0	0.00	Excellent
NR	Number of Cited References	0	0.00	Excellent
TI	Title	0	0.00	Excellent
TC	Total Citation	0	0.00	Excellent
C1	Affiliation	8	0.34	Good
RP	Corresponding Author	8	0.34	Good
CR	Cited References	19	0.81	Good
AB	Abstract	23	0.98	Good
PY	Publication Year	28	1.19	Good
DE	Keywords	149	6.34	Good
DI	DOI	179	7.61	Good
ID	Keywords Plus	240	10.20	Acceptable
WC	Science Categories	2352	100.00	Completely missing

Nota: Da figura grafada em inglês, foi realizada a tradução livre para português; onde: Metadata = metadados; description = descrição; missing counts = contagem dos faltantes; missing % = faltantes %; status = estado; author = autor; document type = tipo de documento; jornal = periódico; language = linguagem; number of cited references = número de referências citadas; title = título; total citation = citação total; affiliation = afiliação; corresponding author = autor para correspondência; cited references = referencias citadas; abstract = resumo; publication year = ano de publicação; Keywords = palavras-chave; DOI = DOI; keyword plus = palavras-chave mais; science categories = categoria científica; excelente = excelente; good = bom; acceptable = aceitável e complete missig = faltantado completamente.

Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

Pode-se perceber que 14 dos 16 dados analisados receberam categorização excelente e bom, o que indica que número de manuscritos com os respectivos dados faltantes não afetaram negativamente as análises do Bibliometrix. A variável “palavras-chave mais” recebeu a categoria de aceitável. As “palavras-chave mais” são palavras chaves definidas pela base indexadora do documento, o que pode ser considerado menos importante do que a palavra-chave produzida pelo autor. Não foi encontrado nenhum dado de categoria científica, entretanto essa variável não se mostrou útil para o trabalho em tela.

Portanto, é notória a boa qualidade dos dados adquiridos e por consequência, os resultados

das análises dos dados também podem ser considerados fidedignos.

A Figura 2.5 apresenta as principais informações dos 2.352 documentos pesquisados.

Figura 2.5 - Principais informações dos metadados pesquisados.



Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

Quanto ao período, foram encontrados documentos entre os anos de 1987 e 2023: Os dados cobrem um período de 36 anos, mostrando uma longa trajetória de pesquisa na área de tratamento de esgoto e recuperação de recursos.

Em relação às fontes, foram 439, o que indica uma variedade de fontes, incluindo revistas, livros e outros tipos de publicações, mostrando a diversidade e a abrangência das contribuições no campo. O número de documentos analisados foi de 2.352, o que indica uma quantidade substancial de pesquisas realizadas no período.

A taxa de crescimento anual indicou aumento contínuo no interesse e nas publicações sobre o tema, com taxa de 9,7%. A idade média dos documentos foi de 8,73 anos, o que sugere que a maioria das pesquisas ainda é relativamente recente. 23,4 foram o número de citações médias dos documentos analisados, isso indica que os documentos têm uma boa visibilidade e impacto na comunidade científica.

Como quantitativo de referências, 73.781 referências contidas nos documentos analisados mostram a profundidade da pesquisa e a extensa revisão da literatura. Isso também pode indicar indiretamente o número de documentos analisados. Quanto aos tipos de documentos, representando a maioria das publicações foram os artigos científicos, com número de 1.745, seguidos por artigos em anais de conferências: 215, capítulos de livros: 96 e artigos de revisão: 296. Outros tipos como relatórios, editoriais, erratas, e revisões mostram a variedade dos formatos de publicação.

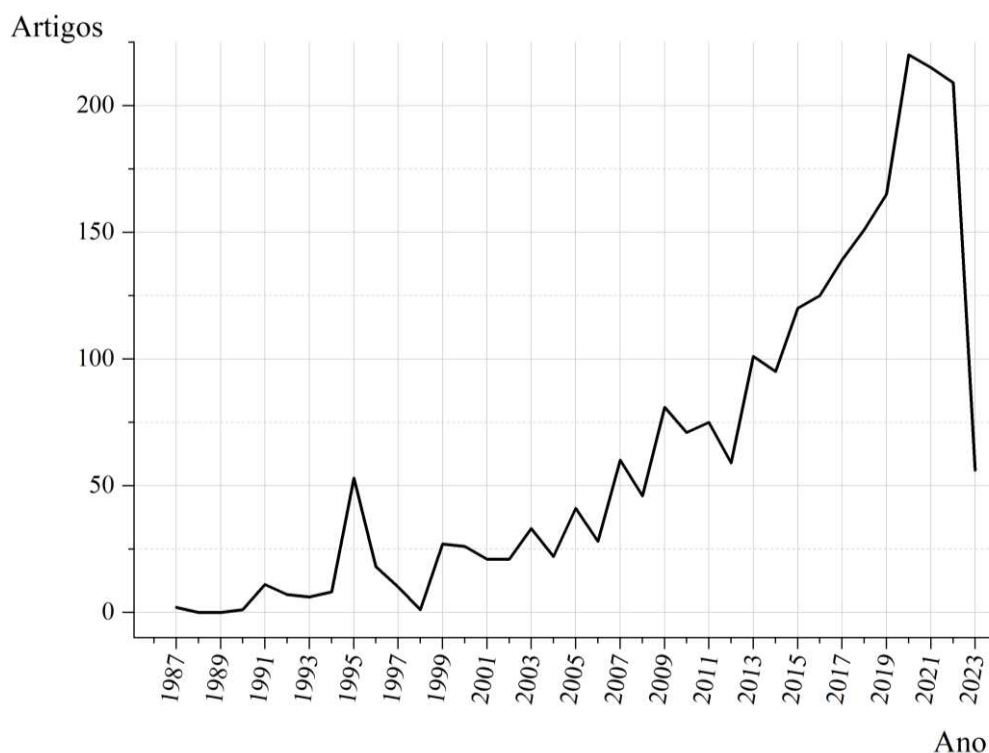
Na seara de conteúdo dos documentos, houve 12.706 palavras-chave fornecidas pelas bases indexadoras, úteis para a recuperação de informações, tal qual essa pesquisa. Também, os

documentos apresentaram 7.347 palavras-chave atribuídas pelos autores, refletindo os temas principais e as tendências da pesquisa.

Sobre os autores, pode-se apurar que 8.742 deles contribuíram para as publicações, com 14.629 aparições de autores, indicando colaboração intensa. Apenas 138 documentos apresentavam apenas um autor, o que indica que a maioria das pesquisas é colaborativa. Os metadados dos documentos analisados demonstram alto nível de colaboração entre os pesquisadores, com o número de 4,43 coautores por documento analisado. As coautorias internacionais resultaram em 9,5%, nível significativo de colaboração internacional, refletindo a importância global do tema.

Para investigar a relevância da temática de ETEs sustentáveis hodiernamente, foi elaborado um gráfico da produção científica anual sobre o tema. Nota-se evolução crescente de documentos publicados, com pico de 220 trabalhos publicados no ano 2020, evidenciando a relevância da temática da tese. A queda observada no ano 2023, pode ser devido a aquisição dos dados ter sido no início do ano, mês de março. A Figura 2.6 demonstra as publicações anuais sobre o tema.

Figura 2.6 – Número de documentos produzidos anualmente sobre ETEs sustentáveis.



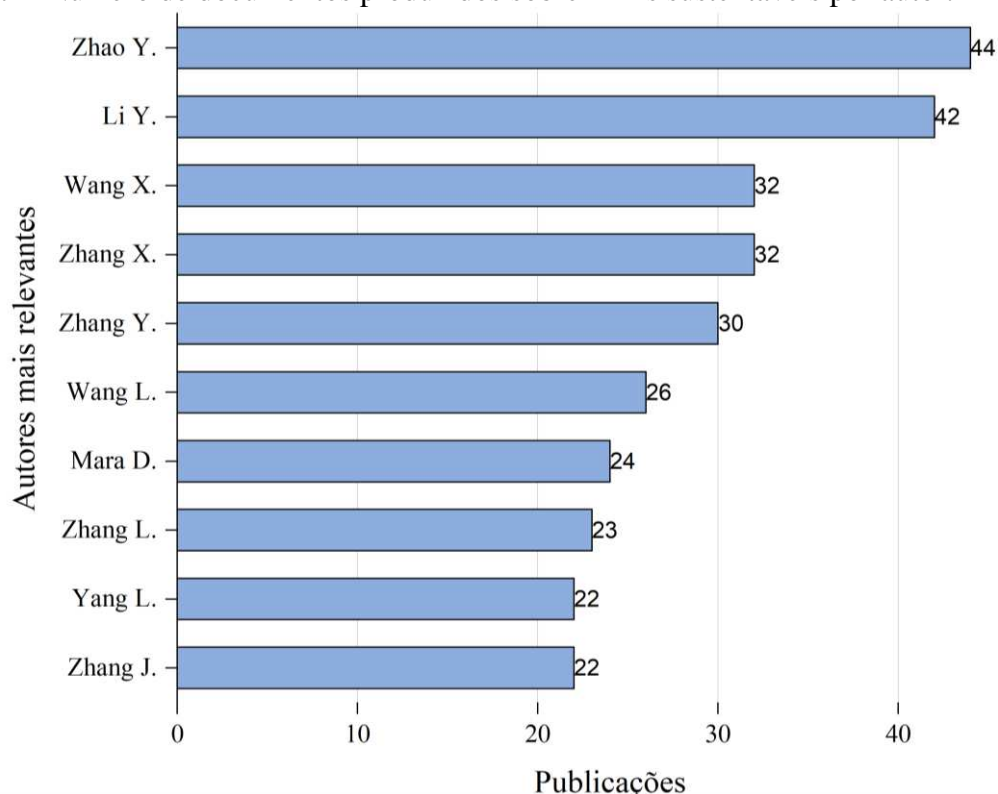
Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

Foram elaborados tabelas e gráficos para destacar os principais autores e países que

contribuíram para a produção científica na área, e também para identificar possíveis colaborações entre autores e instituições. A Figura 2.7 classifica os pesquisadores mais relevantes. Dentre eles, destacam-se: ZHAO Y, LI Y e WANG X, com 44, 42 e 32 publicações sobre o tema

O manuscrito mais citado é MICHAEL, I., 2013, da revista *Water Research*, com título “*Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment: a review*”, com 1.308 citações, indicando grande influência desse manuscrito no campo.

Figura 2.7 – Número de documentos produzidos sobre ETEs sustentáveis por autor.

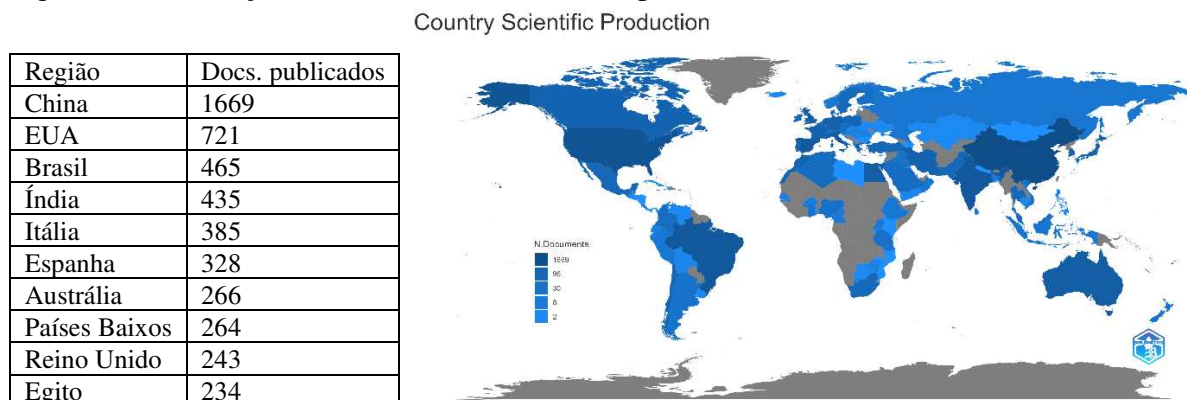


Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

O Brasil estava dentre os países que mais publicam pesquisa sobre o tema, a Figura 2.8 mostra a produção científica sobre o tema no mundo. O país com mais pesquisas é a China, seguida dos EUA e em terceiro lugar o Brasil. O Reino Unido foi o país que apresentou a maior taxa de colaboração internacional.

Quanto às citações, a China liderava com 12.755 citações totais, seguida pelos EUA (7.162) e Austrália (4.513), mostrando a importância dessas nações na pesquisa global.

Figura 2.8 - Produção científica dos dez maiores produtores sobre ETEs sustentáveis.

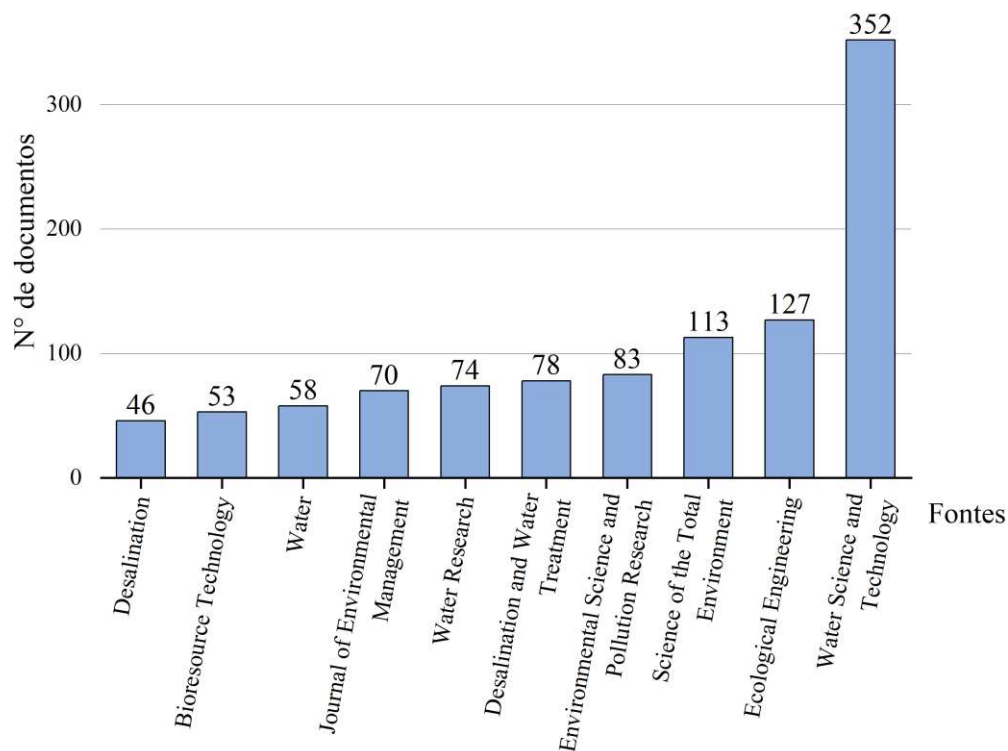


Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

Quando se trata de pesquisa científica, a identificação dos periódicos mais relevantes sobre o tema pode elevar o nível da base de dados das pesquisas futuras, por isso, foi elaborado gráfico que classifica os periódicos que mais publicam documentos relacionados ao tema da tese. A Figura 2.9 mostra o número de documentos publicados por revista acerca do tema. Destacam-se a revista científica *Water Science and Technology* na liderança da produção científica, com 352 publicações no tema, seguida por *Science of the Total Environment* (134) e *Ecological Engineering* (132).

As palavras-chave definidas pelos autores mais relevantes foram *Wastewater Treatment* (tratamento de esgoto em português) (318 artigos) e *Constructed Wetlands* (alagados construídos em português) (249). Já as palavras chaves definidas pelos periódicos foram *Wastewater Treatment* (1275 artigos) e *Sewage* (esgoto em português) (797).

Figura 2.9 - Número de documentos produzidos sobre ETEs sustentáveis por periódico.



Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

As conclusões desta seção destacam a contribuição da análise bibliométrica para a compreensão da produção científica relacionada ao tema da tese, evidenciando os principais autores, revistas e países mais relevantes em pesquisas sobre o tema.

Também são dados importantíssimos para a confirmação que os descritores de pesquisa retornaram boa acurácia nos temas dos trabalhos analisados.

2.4 Consórcio público: uma aliança federativa para a eficiência e a sustentabilidade

As informações contidas nos itens 2.4 e 2.4.1, são baseadas no documento oficial publicado com título Estruturação e Implementação de Consórcios Públicos de Saneamento (Brasil, 2014; 2021).

Um consórcio público é uma entidade jurídica formada exclusivamente por entes da Federação, conforme estabelecido pela Lei nº 11.107 de 2005, com o propósito de promover relações de cooperação federativa, incluindo a realização de objetivos de interesse comum. Esse modelo de cooperação pode ser constituído como uma associação pública, com personalidade jurídica de direito público e natureza autárquica, ou ainda como uma pessoa jurídica de direito

privado, sem fins econômicos. União, estados, Distrito Federal e municípios podem adotar essa forma de colaboração para atuar de maneira integrada e cooperativa. Isso facilita a sustentabilidade técnica, econômica, operacional, ambiental e social dos serviços oferecidos à população.

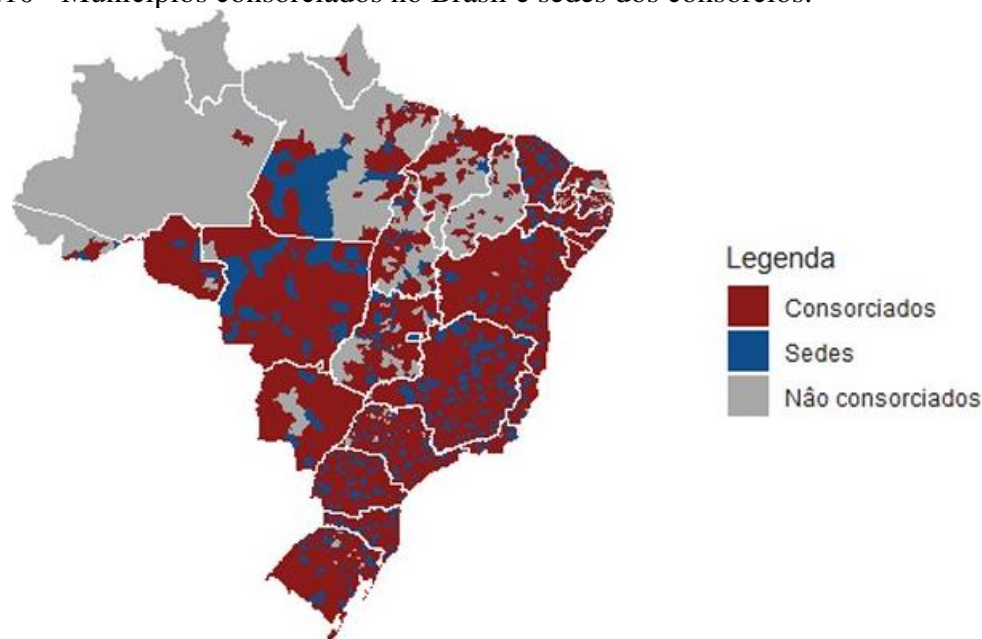
Ao promover uma atuação conjunta, os consórcios públicos possibilitam que esforços, profissionais e custos sejam racionalizados, especialmente quando a atividade beneficia um maior número de pessoas como exemplificado pelo CISGA, um consórcio multifinalitário que opera no estado do Rio Grande do Sul. Além disso, o consórcio público favorece a elaboração de estudos e projetos, a busca por recursos e a contratação, operação e manutenção de serviços, potencializando a eficiência e a eficácia das ações.

Para viabilizar o sucesso do consórcio, é fundamental equilibrar as necessidades e possibilidades compartilhadas entre os entes federados envolvidos. A confiança mútua entre os consorciados também desempenha um papel crucial, garantindo a prestação de serviços com qualidade, regularidade e otimização dos custos.

No que diz respeito às formas de consorciar, existem dois tipos básicos de consórcios: os unifinalitários e os multifinalitários. Cada um possui suas características e peculiaridades. A escolha entre eles requer uma análise criteriosa dos desafios, oportunidades e necessidades comuns, bem como dos tipos de atividades que podem ser melhor realizadas de forma integrada ou complementar entre os municípios envolvidos. Segundo o mapeamento dos consórcios públicos brasileiros de 2018, existiam 491 consórcios públicos registrados no Brasil, dos quais 56% são unifinalitários, atuando em uma única área, enquanto 44% são multifinalitários, abrangendo mais de uma área de atuação e encontrando vantagens na multiplicidade de objetivos ao se consorciar.

No Brasil, em 2023, existiam 723 consórcios públicos ativos e que mais de 85%, ou 4.783, dos Municípios participam de pelo menos um consórcio público, evidenciando a força da união na busca por soluções conjuntas para desafios compartilhados, como mostrado na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Municípios consorciados no Brasil e sedes dos consórcios.



Fonte: Brasil (2023)

Quanto ao porte dos Municípios consorciados, a pesquisa revelou que os menores Municípios, historicamente carentes de receita, veem na constituição de consórcios públicos uma alternativa para implementar determinadas políticas públicas. Dos 4.785 Municípios que participam de algum consórcio, 4.169 (87,2%) são de pequeno porte, contrastando com 527 (11,0%) de médio porte e 87 (1,8%) de grande porte. Esses dados evidenciam a crescente busca pelo consorciamento entre municípios de pequeno porte.

No que concerne à área de atuação, a opção era de múltipla escolha justamente pelo fato de ser notório que muitos consórcios atuam em mais de uma área. Desse modo, foi possível identificar que 313 consórcios declararam ser finalitários, ou seja, atuam em apenas uma área, enquanto 347 são multifinalitários, atuam em mais de uma área.

Entre as áreas com mais atuação destacam-se: saúde (337), saneamento (271) e meio ambiente (225).

Sob a lupa dos consórcios unifinalitários e multifinalitários de saneamento, apresentam-se 128 consórcios para abastecimento de água, 125 para esgotamento sanitário, 83 para drenagem pluvial e 252 para resíduos sólidos e 54 para regulação.

Observou-se a incompatibilidade dos números totais de consórcios de saneamento e a soma dos consórcios das micro divisões do saneamento.

2.4.1 Consequências de um modelo de gestão consorciado

A gestão associada por meio de consórcios públicos no Brasil apresenta-se como uma solução promissora para enfrentar problemas comuns e otimizar a prestação de serviços. A ampliação da escala proporcionada por essa abordagem pode facilitar diversas atividades e minimizar os custos de implantação e operação de serviços, se comparados com a prestação isolada, município o município. No entanto, adotar esse modelo de gestão demanda a constituição de um consórcio público, requerendo acompanhamento dedicado e contínuo por parte dos municípios envolvidos.

Os municípios interessados em aderir a essa forma de cooperação devem ponderar cuidadosamente sobre as oportunidades e desafios associados à criação de um consórcio público, considerando que se trata da formação de uma entidade com todas as responsabilidades que lhe são inerentes. Para isso, torna-se necessário realizar estudos e levantamentos de informações preliminares antes mesmo do início da estruturação do consórcio.

Na análise preliminar é fundamental a avaliação da viabilidade técnica, econômica e financeira da proposta de consórcio público. Uma vez tomada a decisão de implantar o consórcio, inicia-se a primeira fase do processo: o planejamento. Para esta etapa de planejamento, esta tese propõe um modelo conceitual estratégico de planejamento de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto em municípios de pequeno porte do semiárido brasileiro, o qual tem como principal objetivo auxiliar a formação de grupos de municípios próximos geograficamente e com índice de tratamento de esgoto semelhantes a darem os passos necessários rumo à gestão consorciada de serviços de esgotamento sanitário.

Ao adotar a gestão associada por meio de consórcios públicos, os municípios podem usufruir de diversas oportunidades. A escala ampliada possibilita a obtenção de economias de escala, o que contribui para a redução dos custos dos serviços e facilita a concessão. Ademais, essa forma de cooperação favorece a melhoria da interação com órgãos de controle e instituições estaduais e federais, além de viabilizar a implementação de taxas ou tarifas para os serviços especialmente quando adotadas para toda a região.

A gestão associada também promove a modernização dos serviços e a adoção de tecnologias de baixas emissões. Vale ressaltar que a implantação da prestação de serviços de saneamento de forma consorciada é um requisito para acessar recursos da União na área de resíduos sólidos e seguindo essa tendência, isso pode ser extrapolado para outras áreas do saneamento básico. Além disso, a gestão associada permite que as exigências de regularidade sejam direcionadas ao consórcio como um todo, não a cada ente consorciado, o que facilita o cumprimento de normas.

Hophmayer-Tokich e Kliot, (2008), analisaram a implementação de consórcios

intermunicipais no país de Israel e definiu as três principais vantagens do modelo de gestão.

1. Economias de escala: A cooperação intermunicipal é uma opção viável para criar economias de escala na prestação de serviços públicos.

2. Equilíbrio das disparidades entre as autoridades locais: Há uma disparidade fiscal entre municípios. Essas disparidades, juntamente com outros fatores, influenciam a capacidade dessas autoridades de fornecer serviços. Em termos de força fiscal, as autoridades locais variam conforme vários fatores, como as características socioeconômicas dos residentes—residentes com melhores características socioeconômicas pagam impostos mais altos e necessitam de menos serviços assistenciais; o tamanho da população — municípios menores são afetados pela fraqueza fiscal devido ao alto custo per capita e baixa taxa de receita própria; e a localização — municípios no centro de Israel são mais fortes, entre outros motivos, devido à capacidade de arrecadar impostos de usos não residenciais de terras, que contribuem significativamente para a receita municipal. Municípios pequenos, fracos, periféricos e de minorias podem ser afetados por fraqueza política. Além disso, municípios muito pequenos não dispõem dos recursos humanos, técnicos e administrativos necessários para a gestão de projetos complexos.

3. Redução dos efeitos de transbordamento: Devido à proximidade geográfica de autoridades locais vizinhas e à mobilidade populacional, serviços e instalações fornecidos e pagos pelos residentes de um município podem ser utilizados por residentes de municípios próximos. Atividades específicas podem gerar efeitos colaterais negativos em unidades governamentais vizinhas, como no caso da poluição do ar de uma área industrial que se dissemina para áreas vizinhas. Nesses casos, a cooperação regional pode reduzir os efeitos de transbordamento, distribuindo os custos de maneira equitativa e minimizando os efeitos colaterais negativos.

Entretanto, a adoção da gestão associada por meio de consórcios públicos também apresenta desafios. O município precisará lidar com a responsabilidade adicional de gerir mais uma entidade. A colaboração regional integrada deve ser fortalecida, e uma liderança ativa, com visão das necessidades da região, se faz essencial. Os recursos humanos devem estar preparados, com uma visão regional e específica dos municípios envolvidos, para garantir o sucesso da iniciativa. A negociação política em torno dos objetivos comuns da gestão compartilhada também requer habilidade e alinhamento entre os municípios.

Em síntese, a gestão associada por meio de consórcios públicos apresenta-se como uma alternativa promissora para os municípios enfrentarem desafios conjuntos e promoverem a otimização dos serviços públicos. Contudo, é fundamental realizar estudos preliminares detalhados para verificar a viabilidade e os aspectos práticos da constituição do consórcio, a fim de garantir sua efetividade e sucesso na promoção do bem-estar da população envolvida.

2.5 Modelo conceitual estratégico de planejamento de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto

Um modelo conceitual é uma representação abstrata que organiza e estrutura o conhecimento sobre um domínio ou fenômeno específico, sendo amplamente utilizado para facilitar a comunicação, o entendimento e a análise de sistemas complexos. Ele funciona como uma referência comum entre diferentes partes interessadas, permitindo identificar e representar aspectos relevantes da realidade de maneira clara e acessível. Segundo Kung, (1989), o modelo conceitual reflete o domínio de aplicação conforme percebido pela comunidade de usuários e pela equipe de desenvolvimento, servindo como uma estrutura para comunicação e entendimento mútuo. Além disso, sua aplicação vai além da mera representação, contribuindo para o design, a prototipagem, a implementação e a manutenção de sistemas, conforme destacado por Kung, (1989) e Storey, Lukyanenko e Castellanos, (2023).

Assim, o modelo conceitual não apenas organiza o conhecimento, mas também facilita a escolha de cenários adequados às condições regionais, promovendo a cooperação entre municípios para otimizar recursos e melhorar as negociações para implantação e manutenção de ETEs.

A fim de atingir a simplificação do processo de escolha de cenário mais viável é importante a análise da região onde a comunidade está inserida. Ora, se é possível replicar o método escolhido para um grupo de municípios, as possibilidades de negociação para aquisição de projeto, equipamentos e manutenção de ETE são melhoradas, já que há a possibilidade de união dos gestores municipais para pleito de melhores condições de pagamento na concepção, construção e manutenção das ETE, já que apresentam a mesma tecnologia.

Outra possibilidade do modelo conceitual a ser proposto é da exportação de esgoto pelos municípios adjacentes e importação do município central para o tratamento centralizado de esgoto. Essa forma, pode ser atrativa para os operadores do sistema de esgoto por centralizar esforços de operação, licenciamento ambiental, centralização do aproveitamento de subprodutos das ETEs, dentre outros fatores. Entretanto, nesse modelo há o aumento dos custos de transporte do esgoto entre os municípios, fato que deve ser bem estudado para viabilidade financeira do negócio.

A formação de regiões, ou grupos de municípios próximos e com índices de tratamento de esgoto semelhantes pode ser realizadas como base na técnica estatística de Análise de Agrupamentos (*cluster*). Segundo Afonso e colaboradores (2016), para a formação dos grupos de

municípios similares, por semelhança de indicadores, pode ser utilizada a análise de agrupamento. Esse termo é usado para descrever técnicas numéricas cujo propósito fundamental é classificar os valores de uma matriz de dados sob estudo em grupos discretos.

Análise de agrupamento, ou *clustering*, é o nome dado para o grupo de técnicas cujo propósito consiste em separar objetos em grupos, baseando-se nas características que esses apresentam. A ideia básica é agrupar objetos similares de acordo com critérios adotados pelo analista.

Uma das técnicas mais conhecida é o k-means (Lloyd, 1982), que trata de um algoritmo de aprendizagem não supervisionada que tem a função de agrupar dados em k clusters, sendo k um número pré-definido pelo usuário. O processo de clusterização ocorre de forma iterativa, em que cada iteração envolve duas etapas principais: a atribuição de cada ponto de dados ao cluster mais próximo e o recálculo do centroide de cada cluster com base nos pontos de dados que foram atribuídos a ele (Hair *et al.*, 2009)

O k-médias permite a classificação dos municípios de acordo com os indicadores levantados. “O método de k-médias é responsável por alocar cada um dos elementos existentes em um dos k grupos pré-definidos, objetivando minimizar a soma dos quadrados residuais dentro de cada grupo com a finalidade de aumentar a homogeneidade do mesmo” (Fávero *et al.*, 2009).

Nesse método, inicialmente, os centros dos clusters são definidos de forma aleatória ou por meio de uma estratégia específica. Em seguida, os pontos de dados são associados ao cluster cujo centroide está mais próximo, comumente por meio do cálculo da distância euclidiana ou de outra métrica de similaridade. Após a atribuição dos pontos, os centros dos clusters são atualizados com base nas novas associações, recalculando-se a posição média dos pontos que pertencem a cada cluster. Esse procedimento é repetido em cada iteração do algoritmo.

O processo de atualização dos centros dos clusters e a reatribuição dos pontos aos clusters prossegue até que os centros dos clusters não apresentem mais mudanças significativas ou até que o número máximo de iterações seja atingido. Nesse ponto, o algoritmo é considerado convergido, e os clusters resultantes são considerados representativos dos grupos de dados identificados.

O algoritmo de k-means é amplamente utilizado em várias aplicações, como análise de dados, segmentação de clientes, agrupamento de informações e reconhecimento de padrões. No entanto, é importante ressaltar que a definição adequada do valor de k é crucial para o sucesso do algoritmo, e diferentes valores de k podem levar a agrupamentos diferentes e interpretações diversas dos dados. Portanto, a seleção criteriosa de k é uma etapa importante no processo de aplicação do algoritmo de k-means.

Ao utilizar esse método de formação de grupos, é possível agrupar os municípios

próximos geograficamente e ainda formar cluster de municípios que apresentem populações sem tratamento de esgoto semelhantes, a partir daí, pode-se classificar os municípios que devem ser priorizados para atuarem como sede de um consórcio e quais os municípios próximos à sede que poderão ter implementadas as mesmas soluções de tratamento de esgoto.

2.6 Escolha de tecnologia de tratamento de esgoto sustentável para municípios de pequeno porte

A escolha da tecnologia de tratamento de esgoto sustentável para municípios de pequeno porte, com até 20.000 habitantes, é um desafio que envolve diversos fatores técnicos, econômicos, políticos e ambientais. Nesse sentido, é importante considerar tecnologias que apresentem eficiência na remoção de poluentes, baixo custo de implantação e operação, além de serem ambientalmente sustentáveis.

Para Castro (2007), a análise e avaliação de alternativas não devem se basear em critérios somente econômicos. Esse autor ressalta que aspectos sociais, ambientais, políticos, tecnológicos devem ser considerados, bem como outros que demonstrem relevância para a comparação de um conjunto de alternativas. Conflitos de interesse e diferentes pontos de vista devem ser considerados. Portanto, para realizar uma análise global, são necessários métodos baseados na otimização dos resultados de um conjunto de funções, ou seja, um conjunto de soluções ótimas para a tomada de decisão.

Corroborando com esse autor, Von Sperling (2014) afirma que a decisão sobre o processo a ser adotado deve partir de um equilíbrio de critérios técnicos, econômicos e financeiros. Os pontos técnicos são em sua maioria intangíveis e, em muitos casos, a decisão final pode ser subjetiva. Para que o processo decisório realmente traga as alternativas mais adequadas à configuração em análise, devem ser atribuídos critérios ou pesos aos diversos aspectos, essencialmente atrelados à realidade em questão.

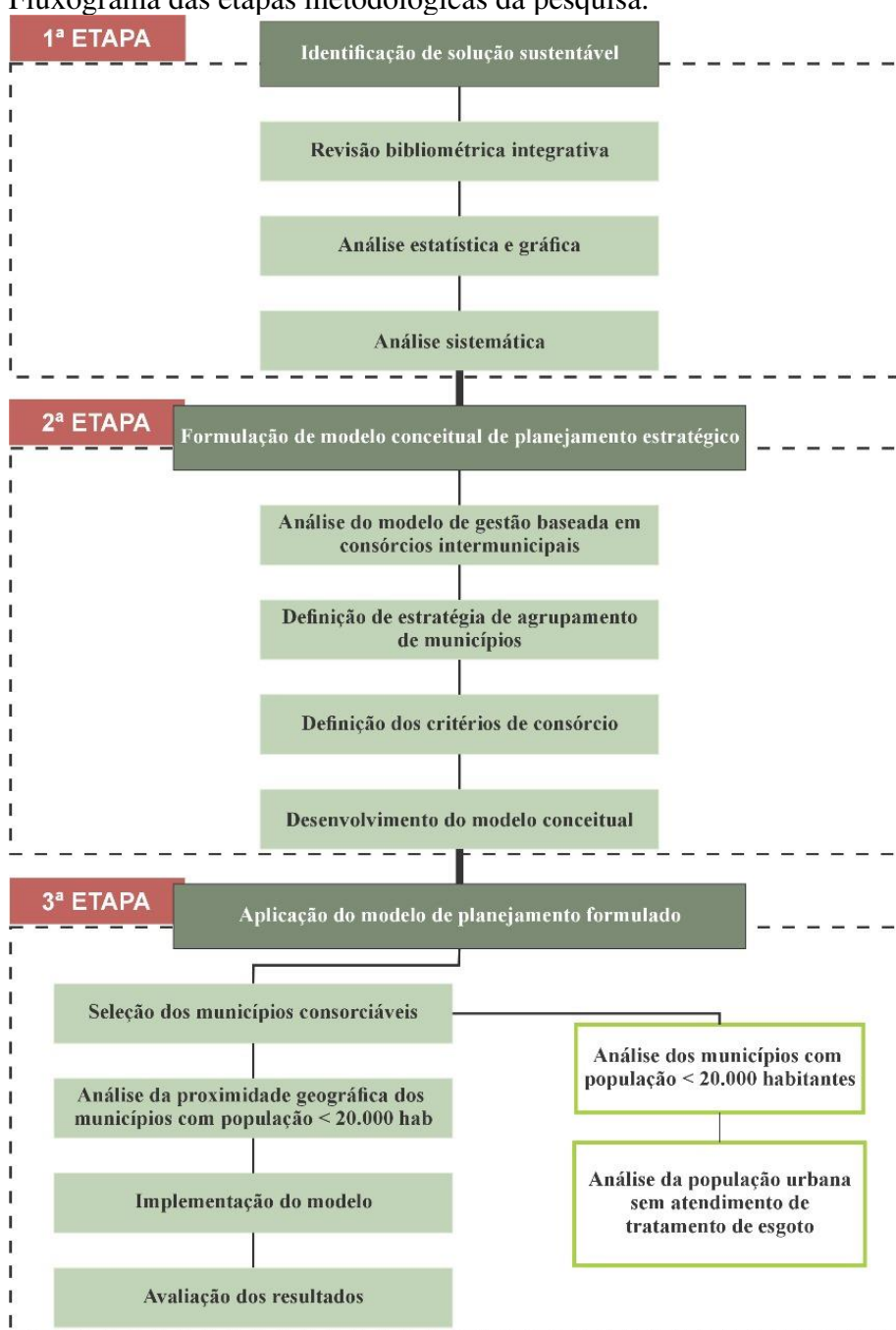
Para Metcalf e Eddy (2016), alguns fatores importantes devem ser considerados na avaliação e seleção dos processos de tratamento de esgoto: aplicabilidade do processo, faixa de vazões e variação aplicáveis, características do esgoto afluente, constituintes inibitórios ao processo de tratamento e constituintes que não são afetadas durante o tratamento, restrições climáticas, critérios de cinética de reação e de carga de massa, taxas de transferência de massa ou de carga de massa, desempenho, tratamento de residuais, processamento de lodo, restrições ambientais, requerimentos químicos, requerimentos de energia, requerimento de outros recursos,

requerimento de pessoal, operação e manutenção, processos complementares, confiabilidade, complexidade, compatibilidade, adaptabilidade, avaliação de ciclo de vida e disponibilidade de área.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho foi realizada em três etapas de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.1. A primeira etapa identifica as soluções sustentáveis de tratamento de esgoto mais investigadas na literatura mundial; a segunda realiza a formulação de um modelo conceitual de planejamento estratégico e a terceira etapa faz a aplicação do planejamento formulado.

Figura 3.1 - Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.1 Identificação de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto doméstico (etapa 1)

3.1.1 Revisão bibliométrica integrativa

Com o intuito de identificar as soluções sustentáveis de tratamento de esgoto domésticos e aplicabilidade delas no clima semiárido, foi feita revisão integrativa e seleção das tecnologias sustentáveis mais citadas em estudos publicados no período de 1987 a 2023 – 2.352 documentos pesquisados - e também dos últimos seis anos: 2018 a 2023 – 1.023 documentos pesquisados.

A pesquisa para o levantamento e análise das publicações sobre ETEs sustentáveis foi baseada no método de revisão integrativa e sistemática de literatura, ou seja, a revisão das tendências evidentes sobre um tema, identificação das lacunas/falhas existentes na pesquisa, e a proposta de estrutura de modo a orientar novas investigações (Kitchnhan, 2004).

Foi empregado o método de revisão proposto por Sampaio e Mancini (2007), que adaptaram o método proposto por Domholdt (2005) e Law e Philip (2002), a qual, neste trabalho, foi estruturada em cinco fases distintas para identificar e analisar as tecnologias de tratamento de esgoto mais relacionadas à sustentabilidade na literatura.

O Quadro 3.1 apresenta as etapas que compõem a pesquisa exploratória integrativa do método utilizado.

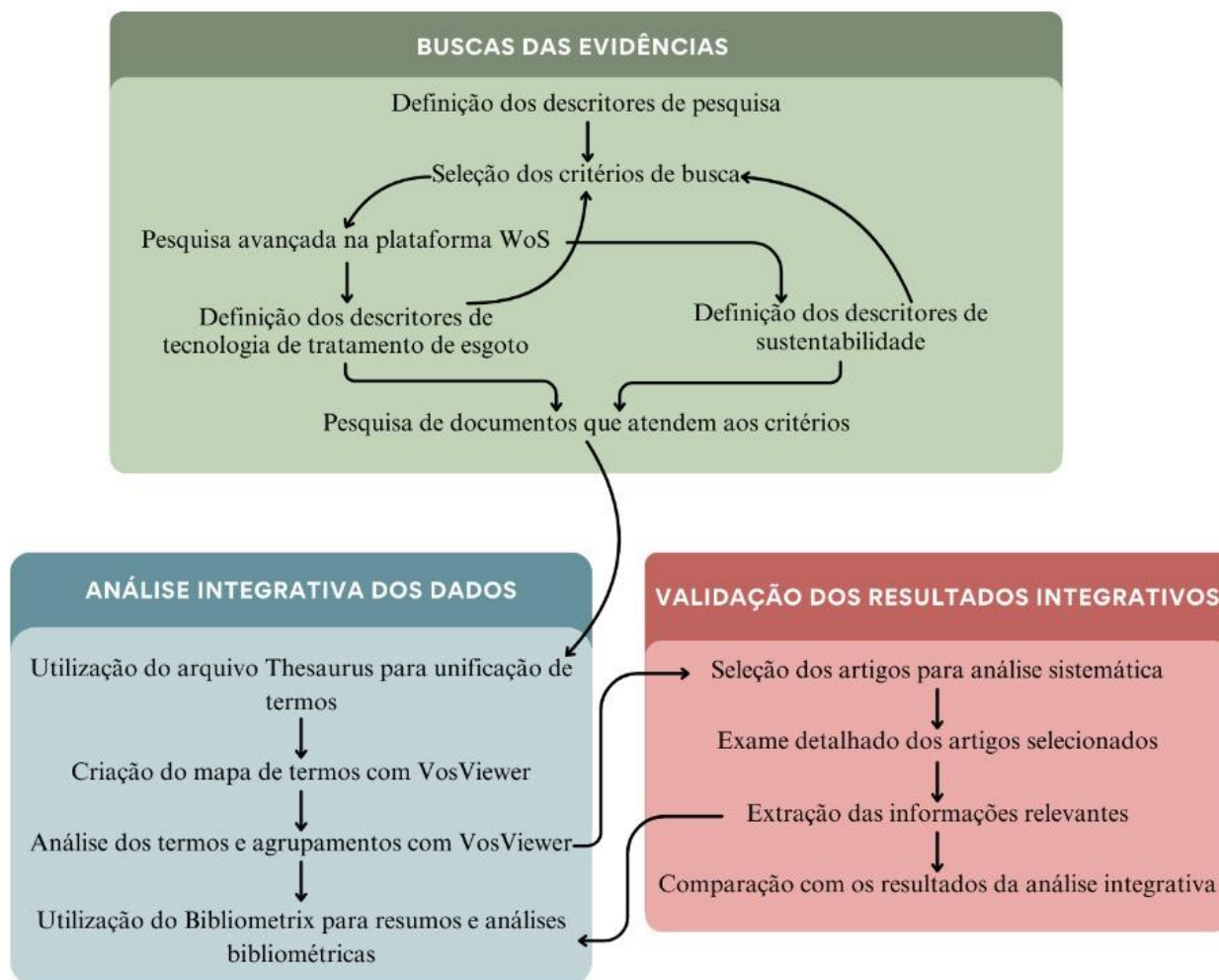
Quadro 3.1 - Fases da revisão integrativa e aplicação nesta pesquisa.

Fase	Nesse estudo
1. Definir pergunta científica	Quais tecnologias de tratamento de esgoto que aparecem na literatura mais relacionadas à sustentabilidade?
2. Busca das evidências	Base de dados renomada: WoS. Disponibilidade de consulta por meio eletrônico, presença de mecanismos de busca avançada por meio de palavras-chave, título e resumo.
3. Seleção de termos relevantes para a pesquisa	Levantar termos relevantes para essa pesquisa presentes nos títulos, resumo e palavras-chave. Adequação de sinônimos. Idioma: Inglês. Tipo de trabalho: Artigo de revista, revisão, revisão integrativa, metanálise, estudos de avaliação, resumo...
4. Análise integrativa dos dados coletados	Objetivo principal: Conhecer as tecnologias de tratamento de esgoto que aparecem na literatura mais relacionadas à sustentabilidade e ao clima semiárido. Objetivos Secundários: Autores mais relevantes. Países com mais publicações no tema. Evolução das publicações sobre o tema. Revistas mais relevantes. Elaboração de gráficos de correlação de termos.
5. Resultados	Elaboração de seção com as soluções de tratamento mais ligadas à sustentabilidade e o clima semiárido.

Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 3.1 resume, em forma de fluxograma, o delineamento da pesquisa para atingir os objetivos propostos referentes à primeira etapa desta tese.

Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia identificação de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto doméstico e aplicabilidade no clima semiárido.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.1.1.1 Buscas das evidências de tratamento de esgoto sustentável

Descreve-se cada item para atender os objetivos da busca de evidências, conforme Figura 3.1:

Esta fase inicial envolve a busca por documentos científicos relevantes que atendam aos critérios definidos. O processo é dividido em:

1. **Definição dos descritores de pesquisa:** São estabelecidas palavras-chave ou termos que guiarão as buscas.
2. **Seleção dos critérios de busca:** Determina-se como a busca será filtrada, para garantir a relevância dos resultados.

3. **Pesquisa avançada na plataforma WoS (Web of Science):** Utilização da plataforma WoS para encontrar os artigos científicos.
4. **Definição dos descritores de sustentabilidade e tecnologia de tratamento de esgoto:** Termos específicos relacionados à sustentabilidade e ao tratamento de esgoto são usados para refinar a pesquisa.
5. **Pesquisa de documentos que atendem aos critérios:** Filtragem final dos documentos que se encaixam nas definições anteriores.

Este estudo empregou pesquisa avançada na plataforma *Web of Science* (WoS) para realizar análise da literatura científica sobre o tema de ETEs sustentáveis. Para isso, foram definidos descritores relacionados ao estudo em questão, combinando as técnicas tradicionais de tratamento de esgoto com termos equivalentes frequentemente encontrados em artigos acadêmicos nacionais e internacionais, utilizando o operador booleano OU (OR) e E (AND). Descritores são os termos-chave inseridos na pesquisa avançada da plataforma, ou seja, as palavras contidas no título, no resumo ou nas palavras-chaves dos documentos. A seleção dos termos-chave foi feita de forma estratégica, considerando sinônimos e variações, enquanto palavras comuns e genéricas que poderiam gerar resultados irrelevantes foram excluídas.

A estratégia usada para a definição dos descritores foi: inicialmente, foram adotadas as principais tecnologias de tratamento de esgoto indicadas por Von Sperling (2014) no Brasil, tais como ciclo completo, lodos ativados, reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), sistema de lagoas, filtros biológicos percoladores, alagados construídos, ultrafiltração, osmose reversa e MBR (Reator de membrana), como descritores de ETEs nas pesquisas avançadas. No entanto, ao longo das pesquisas, outras tecnologias relevantes surgiram e foram incorporadas aos descritores de ETEs, como por exemplo *hydroponic cultivation* (em português, cultivo hidropônico). Tal prática resultou no aumento do número de documentos analisados e na ampliação das ETEs a serem pesquisadas em relação aos termos de sustentabilidade.

Para relacionar as tecnologias de tratamento de esgoto mais adotadas no Brasil à sustentabilidade, foram definidos descritores de sustentabilidade, tais como reuso, instalação com recuperação de recurso, recuperação de nutrientes, tratamento de esgoto sustentável, planta sustentável, processo sustentável e instalação de recuperação de água, também, ao decorrer das pesquisas, se definidos novos termos relevantes, esses eram acrescentados nos descritores das buscas.

Portanto, foram pesquisados documentos no WoS que continham no título, resumo, palavras-chave um descritor de tecnologia de tratamento de esgoto e um descritor de

sustentabilidade. Dessa forma, todos os artigos analisados abordavam uma tecnologia de tratamento de esgoto e um aspecto relacionado à sustentabilidade.

Após as buscas, foram baixados os metadados de todos os documentos resultados da busca no WoS em formato de texto (.txt), para, posteriormente, realizar análises por meio do software VosViewer.

O Quadro 3.2 resume os descritores aplicados nas buscas avançadas na base de dados *Web of Science*.

Quadro 3.2 - Descritores aplicados nas buscas da plataforma WoS.

Descritores		
Tecnologias convencionais		Sustentabilidade
<i>UASB</i>	<i>OR "root zone treatment" (alagados construídos)</i>	<i>resource recovery facility (instalação de recuperação de recurso)</i>
<i>OR "Upflow Anaerobic Sludge Blanket" (UASB)</i>	<i>OR "hyacinth pond" (lagoa de macrófitas)</i>	<i>OR "resource recovery" (recuperação de recurso)</i>
<i>OR "Upflow Anaerobic Sludge Bed" (UASB)</i>	<i>OR "slow-rate overland flow" (lagoa de macrófitas)</i>	<i>OR "nutrient recovery" (recuperação de nutriente)</i>
<i>OR "stabilization lagoon" (sistema de lagoas)</i>	<i>OR "slow-rate subsurface infiltration" (alagados construídos)</i>	<i>OR "sustainable wastewater treatment" (tratamento de esgoto sustentável)</i>
<i>OR "stabilization lagoons" (sistema de lagoas)</i>	<i>OR "rapid infiltration methods" (infiltração rápida)</i>	<i>OR "sustainable treatment" (tratamento sustentável)</i>
<i>OR "stabilization pond" (sistema de lagoas)</i>	<i>OR "activated sludge process" (lodo ativado)</i>	<i>OR "sustainable plant" (planta sustentável)</i>
<i>OR "stabilization ponds" (sistema de lagoas)</i>	<i>OR "activated sludge treatment" (lodo ativado)</i>	<i>OR "sustainable process" (processo sustentável)</i>
<i>OR "pond systems" (sistema de lagoas)</i>	<i>OR "oxidation ditch" (valo de oxidação)</i>	<i>OR "water resource recovery facilities" (instalação de recuperação de água)</i>
<i>OR "lagoon systems" (sistema de lagoas)</i>	<i>OR "constructed wetland" (alagados construídos)</i>	<i>OR "reuse" (reuso)</i>
<i>OR "aerated pond" (lagoa aerada)</i>	<i>OR "constructed wetlands" (alagados construídos)</i>	<i>OR water resource recovery facilities (WRRF) (instalação de recuperação de água)</i>
<i>OR "aerated ponds" (lagoa aerada)</i>	<i>OR "sand filters" (filtro de areia)</i>	<i>OR WRRFs</i>
<i>OR "macrophytes pond" (lagoa de macrófitas)</i>	<i>OR "imhoff tank" (tanque Imhoff)</i>	
<i>OR "anaerobic pond" (lagoa anaeróbia)</i>	<i>OR "septic tank" (tanque séptico)</i>	
<i>OR "anaerobic ponds" (lagoa anaeróbia)</i>	<i>OR "biologic rotary discs" (disco biológico)</i>	
<i>OR "raceway pond" (valo de oxidação)</i>	<i>OR "hydroponic cultivation" (cultivo hidropônico)</i>	
<i>OR "open pond" (sistema de lagoas)</i>	<i>OR "aerobic biofilm reactor" (reator de biofilme aeróbico)</i>	

Nota: Os termos estão grafados da maneira as quais foram pesquisados na plataforma de busca, por isso, estão na língua inglesa. Porém, a tradução livre para língua portuguesa encontra-se entre parêntesis após cada termo.

Fonte: Autoria Própria (2023).

3.1.2 Análise estatística e gráfica - análise integrativa

Descreve-se cada item para atender os objetivos da análise integrativa, , conforme Figura 3.1:

Nesta etapa os dados coletados na etapa anterior são organizados e analisados:

1. **Utilização do arquivo Thesaurus para unificação de termos:** As palavras-chave são harmonizadas para evitar duplicações ou diferenças semânticas.
2. **Criação do mapa de termos com VosViewer:** O software VosViewer é utilizado para criar visualizações dos termos mais recorrentes.
3. **Análise dos termos e agrupamentos com VosViewer:** Os dados são agrupados e analisados de forma visual.
4. **Utilização do Bibliometrix para resumos e análises bibliométricas:** O Bibliometrix é utilizado para gerar análises estatísticas e resumos dos dados coletados.

Com uso da ferramenta Bibliometrix, foram realizadas análises estatísticas e gráficas (Oliveira, Guerra e McDonnell, 2018) para identificar os autores, países e instituições mais produtivos na área de tratamento de esgoto sustentável. Foram elaborados tabelas e gráficos que destacavam os principais atores, países que mais publicaram, colaborações na pesquisa científica sobre o tema, dentre outras informações já apresentadas na seção 2.3.1.

O software VosViewer foi empregado neste estudo para visualizar e mapear a produção científica, permitindo uma análise detalhada das tendências de pesquisa relacionadas às tecnologias de tratamento de esgoto. Através de sua capacidade de criar mapas bibliométricos, o software possibilitou a identificação de clusters que representam grupos de estudos com temas semelhantes, evidenciando as tecnologias de maior concentração de estudos. Esses clusters foram organizados com base em co-ocorrências de palavras-chave, destacando as tecnologias de tratamento de esgoto mais frequentemente associadas à sustentabilidade, ou seja, associadas à aos descritores de sustentabilidade definidos neste trabalho.

3.1.3 Análise sistemática - validação dos resultados integrativos

Descreve-se cada item para atender os objetivos da validação dos resultados da análise integrativa, , conforme Figura 3.1:

Na última fase, os resultados são validados e comparados:

1. **Seleção dos artigos para análise sistemática:** A partir dos resultados anteriores, escolhem-se artigos específicos para análise detalhada.
2. **Exame detalhado dos artigos selecionados:** Os artigos escolhidos são analisados profundamente para extrair as informações mais relevantes.
3. **Extração das informações relevantes:** As informações chave são retiradas dos artigos.
4. **Comparação com os resultados da análise integrativa:** Os resultados extraídos são comparados com a análise anterior para verificar consistência e relevância.

Com o fito de garantir a confiabilidade e robustez dos resultados obtidos por meio da análise bibliométrica integrativa conduzida neste estudo, foi realizada uma validação adicional das informações coletadas. Para isso, foi conduzida uma análise sistemática de artigos selecionados, com o objetivo de validar e aprofundar as informações obtidas por meio da revisão sistemática. Essa análise permitiu uma abordagem mais detalhada e crítica dos estudos selecionados, contribuindo para a validação dos resultados bibliométricos.

Os artigos utilizados nesta análise sistemática foram selecionados com base nos resultados da análise integrativa, ou seja, aqueles que abordavam tecnologias de tratamento de esgoto mais relacionadas à sustentabilidade. Foram selecionados aleatoriamente 25 documentos – essa quantidade de documentos satisfaz o critério de saturação teórica -, sendo cinco de cada tecnologia que apresentou maior relação com a sustentabilidade e o clima semiárido. Esses documentos constituíram a amostra estudada neste trabalho e abordavam especificamente as tecnologias de tratamento de esgoto sustentáveis definidas na fase da análise integrativa.

A análise sistemática foi conduzida de forma rigorosa e estruturada. Os resumos, títulos e palavras-chave dos artigos selecionados foram minuciosamente examinados, levando em consideração os objetivos do estudo, a metodologia utilizada, os resultados apresentados e as conclusões obtidas. As informações relevantes foram extraídas e comparadas com os resultados obtidos na análise bibliométrica integrativa. A estrutura adotada para o reconhecimento de aspectos sustentáveis nas tecnologias de tratamento de esgoto definidas na análise integrativa é apresentada no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Fases da análise sistemática e aplicações neste estudo.

Fase	Neste estudo
1. Definir pergunta científica	As tecnologias de tratamento de esgoto definidas a partir da análise integrativa realmente são sustentáveis?
2. Busca das evidências	Base de documentos levantados por este estudo.
4. Análise sistemática dos dados coletados	Busca em documentos que tratam sobre tecnologia de tratamento de esgoto a ser analisada de evidências, trechos, frases que assertem a sustentabilidade dessa tecnologia.
5. Resultados	Elaboração de quadro com as tecnologias de tratamento de esgoto, publicações referentes a elas e trecho do artigo que aponta claramente a sustentabilidade da tecnologia.

Fonte: Autoria própria (2023).

3.1.3.1 Fechamento da amostra por saturação teórica

O fechamento da amostra consiste em determinar o conjunto de dados que será utilizado para a análise e interpretação. Nas amostras não-probabilísticas (intencionais), essa determinação é baseada na experiência do pesquisador no campo de estudo, utilizando raciocínios embasados em conhecimentos teóricos sobre a relação entre o objeto de estudo e o corpus a ser analisado (Fontanella *et al.*, 2011).

Uma forma de fazer isso é por meio da técnica de amostragem por saturação teórica, na qual a coleta de dados é encerrada quando não há mais elementos que contribuam para a teorização desejada (ou possível nas circunstâncias) a serem obtidos a partir da observação do campo de estudo (Fontanella *et al.*, 2011).

Destarte, para a validação dos resultados obtidos na análise sistemática, foi utilizada metodologia adaptada proposta por Fontanella e colaboradores (2011), detalhada no Quadro 3.4

Quadro 3.4 - Passos procedimentais para constatação da saturação teórica.

Passos	Descrição
Passo 1: “imersão” em cada registro	São feitas leituras em documentos do banco de dados de forma aleatória, visando identificar núcleos das manifestações de cunho sustentável.
Passo 2: alocar (numa tabela) os registros encontrados	Ao se verificar qual o aspecto sustentável do trabalho, foi copiado trecho da evidência, realizada a tradução para a língua portuguesa e compilado em quadro resumo.
Passo 3: constatar a saturação teórica sobre a sustentabilidade da tecnologia	Isso ocorre quando novos temas ou tipos de enunciados não são, de maneira consistente, acrescentados após novas investigações.
Passo 4: “visualizar” a saturação	Para cada tecnologia analisada, foram analisadas as condições de sustentabilidade a fim de uma constatação visual da “saturação”.

Fonte: Adaptado de Fontanella et al. (2011).

3.2 Formulação de modelo conceitual de planejamento estratégico com base em consórcio de municípios de pequeno porte (etapa 2)

3.2.1 Análise do modelo de gestão baseada em consórcios municipais

A elaboração do modelo conceitual para o planejamento de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto nos municípios de pequeno porte do semiárido brasileiro objetiva ser ferramenta para nortear etapas iniciais do planejamento de formação de consórcios.

Diferente do modelo mais comum atualmente, o consórcio de tratamento de esgoto entre municípios funciona como uma aliança estratégica, que podem ser de duas formas: a) permitindo a exportação e importação de esgoto por meio de sistema de tubulações, estações elevatórias e o tratamento e disposição final centralizados no município central; b) as estações de tratamento são executadas nos municípios que geram o esgoto, porém, a gestão do sistema de esgotamento é feita por entidade jurídica que poderá ser estabelecida no município central.

No modelo “a”, municípios próximos se uniriam para construir uma rede de infraestrutura que conectaria os municípios, facilitando o transporte dos efluentes de áreas com menor capacidade de tratamento para uma estação central. O município central, responsável pela coordenação, operaria uma estação de tratamento de esgoto eficiente, beneficiando todos os consorciados.

No modelo "b" as estações de tratamento de esgoto são construídas em cada um dos municípios geradores. Contudo, a gestão e operação do sistema de esgotamento sanitário são centralizadas e realizadas por uma entidade jurídica estabelecida no município central do consórcio. Esse modelo oferece flexibilidade ao permitir que cada município trate seu próprio esgoto, enquanto se beneficia de uma administração unificada, responsável pela manutenção, fiscalização, financiamento e otimização do sistema.

Os municípios participantes contribuiriam financeiramente para a infraestrutura, mas também poderiam contar com a importação de esgoto, o que garantiria uma gestão mais equilibrada e otimizada dos recursos hídricos. Essa abordagem promoveria uma melhor saúde pública e qualidade ambiental na região, ao possibilitar o tratamento adequado dos efluentes antes da disposição final.

3.2.2 Definição de estratégia de agrupamento de municípios

Uma das principais decisões no planejamento desse tipo de consórcio é a escolha do município central, ou polo, que será responsável pela coordenação e, muitas vezes, pela instalação das principais infraestruturas de tratamento. Além de critérios técnicos, como proximidade geográfica e disponibilidade de recursos, essa escolha deve também cumprir um importante papel social. O município central deve atuar como um catalisador para o desenvolvimento de municípios menos desenvolvidas no entorno. Isso não apenas beneficia as localidades mais carentes, mas também ajuda a distribuir de maneira mais equitativa os benefícios do consórcio, promovendo o crescimento regional integrado. Esse tipo de planejamento pode reduzir as desigualdades regionais, levando infraestrutura e desenvolvimento para áreas mais isoladas ou com menor capacidade de investimento.

Em que pese a tendência de o município com sede administrativa do consórcio ser a cidade com maior porte – maior número de habitantes - , pelo descrito no parágrafo anterior, o autor deste modelo priorizou a eficiência logística na escolha do município central.

Portanto, como parte da estratégia de agrupamento dos municípios, entendeu-se como prioridade para a definição do município central, ou seja, município com sede administrativa do consórcio aquele que tivesse posição geográfica mais favorável dentro do grupo, a fim de dispor de melhor eficiência logística.

3.2.3 Definição dos critérios de consórcio

Dada essa complexidade da formação de consórcios, é oportuno apresentar alguns pressupostos essenciais que serviram de base para sua formulação:

- Os municípios de pequeno porte (até 20.000 habitantes) enfrentam desafios de financiamento e infraestrutura para implementar sistemas de esgotamento sanitário individualmente.
- A colaboração intermunicipal via consórcios oferece possibilidade de solução a qual permite a otimização de recursos e infraestrutura compartilhada.
- A proximidade geográfica e o déficit de tratamento de esgoto são variáveis centrais na definição dos consórcios.
- O modelo é ajustável às variações de porte populacional, distâncias geográficas e características da população urbana sem tratamento de esgoto dos municípios, conforme o contexto de cada grupo.

Para que o modelo possa ser aplicado, algumas variáveis críticas devem ser definidas e organizadas de maneira padronizada. Essas variáveis incluem:

- **População urbana sem tratamento de esgoto (PSTE):** Um indicador fundamental que define a prioridade dos municípios no consórcio.
- **Distâncias geográficas:** A proximidade entre municípios é um fator determinante para a definição dos agrupamentos. A formação ótima de consórcios se dá pela minimização dessas distâncias.

3.2.4 Desenvolvimento do modelo conceitual

A formulação do modelo de planejamento estratégico segue uma série de etapas sistematizadas:

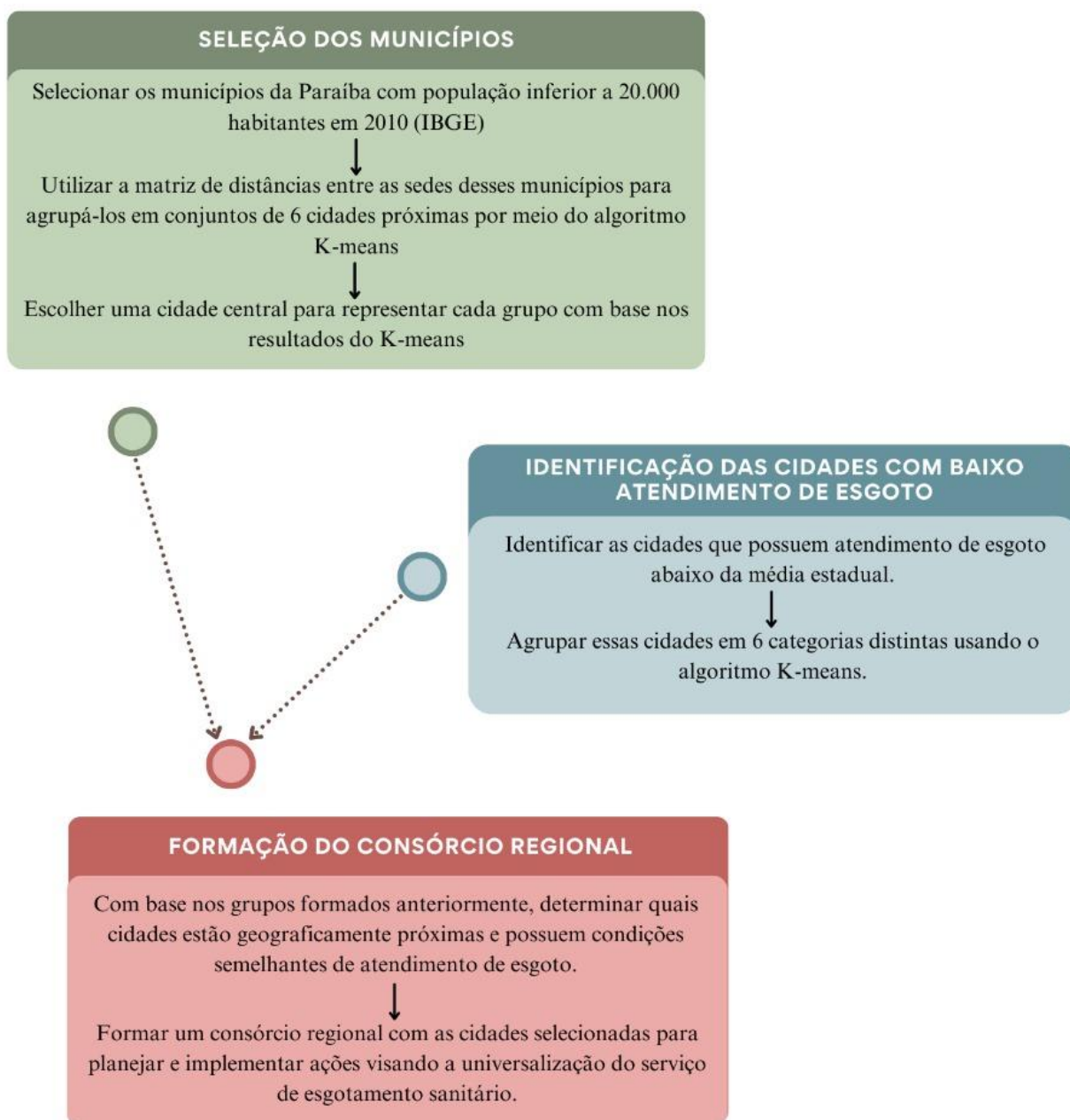
1. **Identificação dos municípios elegíveis:** Filtragem inicial dos municípios com base na população urbana inferior a 20.000 habitantes e no percentual de população sem atendimento por rede de esgoto.
2. **Análise das distâncias entre municípios:** Utilização de uma matriz de distâncias para identificar os agrupamentos mais próximos. Esse processo visa minimizar os custos logísticos e operacionais para o compartilhamento de infraestrutura de tratamento.
3. **Formação de grupos consorciáveis:** Aplicação de métodos de agrupamento (k-means) para agrupar municípios com características semelhantes, considerando a proximidade geográfica e a PSTE.
4. **Definição dos municípios centrais:** Dentro de cada grupo formado, os municípios com maior população e localização central assumem o papel de “município central”, responsáveis pela infraestrutura principal de tratamento de esgoto.
5. **Critérios adicionais:** Avaliação de variáveis complementares como a capacidade de tratamento existente, acesso a recursos financeiros e potencial para parcerias público-privadas.

3.3 Implementação do modelo de planejamento aos municípios de pequeno porte do estado da Paraíba (etapa 3)

A Figura 3.2 destaca as subetapas para que sejam alcançados os objetivos para a aplicação

do modelo conceitual de planejamento estratégico com base em consórcio de municípios de pequeno porte da Paraíba. Essas subetapas são discutidas ao decorrer dessa seção e da seção resultados.

Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia para a aplicação de modelo conceitual de planejamento estratégico com base em consórcio de municípios de pequeno porte da Paraíba.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.3.1 Seleção dos municípios consorciáveis

- Análise dos municípios do estado da Paraíba com população menor que 20.000

habitantes

O governo brasileiro disponibiliza planilha em formato Excel (e alternativamente em formato CSV) com a lista completa de municípios e estados brasileiros incluindo informações gerais de cada um deles como o código IBGE (código identificador do município padronizado pelo IBGE) o porte populacional e população IBGE 2010 (Brasil, 2018).

Esse documento divide os municípios em quatro portes, classificados da seguinte maneira:

Pequeno 1 – Até 20.000 habitantes;	Médio – de 50.001 a 100.000 habitantes;
Pequeno 2 – de 20.001 a 50.000 habitantes;	Grande – acima de 100.001 habitantes.

Neste trabalho, os municípios de pequeno porte são considerados os que possuem até 20.000 habitantes de população urbana.

Para a definição dos dados de população urbana, o IBGE disponibiliza a planilha eletrônica por meio do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), na “Tabela 202 - População residente, por sexo e situação do domicílio”, a população urbana e rural de qualquer município brasileiro. Essa foi a fonte de aquisição de dados populacionais dos municípios estudados.

Como recorte espacial para a formação de consórcios, foram definidos os municípios de pequeno porte no estado da Paraíba, o qual possui 223 municípios. Após filtrados, de acordo com a premissa do modelo, foram definidos 165 municípios para estudo.

- Análise da população urbana sem atendimento de tratamento de esgoto

Para definir os municípios que possuíam déficit de tratamento de esgoto – os municípios que atendiam toda a população com tratamento foram descartados – procedeu-se a aplicação de filtros nas planilhas de dados do IBGE para selecionar apenas os municípios com população urbana total de até 20.000 habitantes e que não apresentassem 100% da população atendida por tratamento de esgoto. Esses critérios foram estabelecidos com o objetivo de focar nos municípios de menor porte e que apresentassem desafios em relação ao esgotamento sanitário, em especial o tratamento de esgoto.

Posteriormente, os municípios da Paraíba que possuem menos que 20.000 hab. e que não têm 100% da população atendida por tratamento de esgoto, foram agrupados com atributo da população sem atendimento a tratamento de esgoto (PSTE). Esses grupos, chamados de grupo PSTE, foram utilizados para a análise de similaridades nas condições de tratamento de esgoto de

cada município.

Para o tratamento de todas as variáveis utilizadas, foi necessário o desenvolvimento de códigos em VBA para organizar os dados da planilha em Excel, permitindo a formatação adequada dos vetores de distâncias, população total, população sem tratamento de esgoto, grupo PSTE e nome dos municípios para o processamento das informações.

3.3.2 Análise da proximidade geográfica dos municípios com população menor que 20.000 habitantes

O diagnóstico da área de estudo envolveu a análise da População Urbana Sem Atendimento de Tratamento de Esgoto (PSTE) e as distâncias entre os municípios do estado da Paraíba. A PSTE foi um indicador-chave para identificar as necessidades de tratamento de esgoto em cada município, fornecendo informações sobre o déficit de tratamento do esgoto doméstico na região. Além disso, foram consideradas as distâncias entre os municípios para agrupá-las de acordo com sua proximidade geográfica.

Para isso, foi criada uma matriz de distâncias entre as sedes dos municípios, a qual permitiu identificar os municípios que devem assumir o papel de município central e os municípios adjacentes que serão integradas ao consórcio. Os municípios centrais foram definidos com base no arranjo município central e municípios adjacentes que as distâncias entre a central e as demais somadas fossem as menores possíveis. Essa seleção visa promover o melhor arranjo possível entre os municípios, otimizando a logística e a viabilidade das ações conjuntas. Desse modo, foram definidas, nessa etapa, os municípios centrais, as quais representam os pontos centrais de cada grupo de municípios próximos, e os municípios adjacentes, que são aquelas que estão mais próximas dos municípios centrais em cada grupo.

Foi desenvolvido script em R, utilizando o RStudio, para realizar o agrupamento dos municípios próximos geograficamente e definidas os municípios centrais e adjacentes de cada grupo. O algoritmo de agrupamento utilizado foi o k-means, e o número de grupos foi definido através dos métodos do cotovelo (elbow method - WSS) (Umargono, Suseno e Vincensius Gunawan, 2020) e do Gap Statistic Method (El-Mandouh *et al.*, 2019). Os códigos elaborados, por serem parte dos resultados deste trabalho, estão descritos nas seções 4.4.2.

3.3.3 Implementação do modelo

Ao final da análise foi possível determinar dois agrupamentos: a) grupos de municípios geograficamente próximas; b) grupos dos municípios com PSTE semelhantes. A partir desses agrupamentos, foi pensando em forma de apresentação e interpretação dos resultados, e uma das maneiras mais democráticas – tecnicamente falando -, é em forma de gráfico, que com as devidas instruções prévias podem ser identificadas por leigos.

Então, procedeu-se a elaboração de gráficos por grupos de municípios geograficamente próximas, com o fio de graficamente serem definidos cenários de formação de consórcios. A interpretação do gráfico é exemplificada na seção 4.4.5.

Com base nessas considerações, foi escolhido número de clusters que resultasse em aproximadamente seis municípios por grupo, sendo uma central e cinco adjacentes. O autor desta tese acredita que a formação de consórcios com mais de 6 municípios poderia ser excessivamente difícil devido à diversidade política e logística entre os municípios. Com isso em mente, foi definida a formação de 27 grupos de municípios próximas, considerando a divisão de 165 municípios pelo número desejado de municípios por grupo ($165/6 \approx 27$). Apesar dessa definição inicial, a quantidade de municípios por grupo foi definida pelo algoritmo ao agrupar os municípios mais próximos uns dos outros.

Encontrar o número ideal de clusters não é uma tarefa trivial. Em geral, tarefas de aprendizagem não-supervisionada são complicadas de resolver justamente porque não se sabe a resposta do problema. Para isso, foi usado o método do cotovelo (*elbow method* - WSS) (Umargono, Suseno e Vincensius Gunawan, 2020) e o *Gap Statistic Method* (El-Mandouh *et al.*, 2019) para definir o número mínimo de grupos a serem formados para que não haja perda de informação.

3.3.4 Avaliação do modelo

- **Limitações metodológica, vieses de resultados e desafios da identificação de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto doméstico**

É importante mencionar, também, que esses resultados estão encapsulados pelos os limites impostos pela metodologia da pesquisa. Na condição de se reservar a realizar análise de estudos publicados em periódicos, alguns vieses são passíveis de compor os resultados. Como por exemplo, a possibilidade de alagado construído aparecer relacionado com sustentabilidade por que a grande parte dos artigos versam sobre a incompatibilidade com a economia circular.

Por exemplo, outro viés que pode ocorrer é que o clima semiárido se relacione negativamente com as tecnologias de tratamento de esgoto apontadas.

Embora existam essas possibilidades, houve a tentativa de minimizar essas ocorrências. Desde as escolhas dos descritores, dos termos relevantes, da análise cuidadosa dos mapas, da revisão sistemática e ainda da consonância com a literatura clássica, todos esses itens formam barreiras contra os vieses, porém, sempre há a possibilidade de todas as barreiras falharem, ou de existir alguma possibilidade ainda não vislumbrada por este autor.

- **Limitações metodológica, vieses de resultados e desafios da elaboração do modelo conceitual**

A análise dos municípios consorciáveis, realizada mediante a metodologia proposta, revelou restrições que necessitam de consideração para uma implementação em situação real.

Em primeiro lugar, a formação de alguns agrupamentos consorciáveis com até 19 municípios representa um desafio substancial em termos de viabilidade política e social, uma vez que a administração de consórcios com um número tão elevado de participantes pode se tornar complexa e ineficaz.

Além disso, a escolha das variáveis empregadas na análise – população urbana sem tratamento de esgoto e proximidade geográfica entre os municípios – embora pertinente, não abrange a totalidade dos fatores que podem influenciar a formação e o êxito dos consórcios intermunicipais.

Variáveis socioeconômicas, como o índice de desenvolvimento humano (IDH), renda per capita e a capacidade fiscal dos municípios, não foram incluídas na análise, o que pode restringir a representatividade e a aplicabilidade dos grupos formados. Ademais, aspectos técnicos e infraestruturais específicos de cada município, tais como a capacidade e a condição atual das redes de esgotamento sanitário, também não foram considerados, o que pode afetar a eficiência e a viabilidade técnica dos consórcios propostos.

Também, é importante considerar que a variação de cota topográfica entre os municípios pode impactar significativamente a viabilidade financeira do consórcio de tratamento de esgoto. As diferenças nas altitudes e na configuração do terreno influenciam diretamente os custos de instalação e operação das tubulações e estações elevatórias necessárias para o transporte de efluentes. Municípios adjacentes situados em áreas mais baixas podem demandar investimentos mais altos em infraestrutura para garantir que o esgoto seja eficientemente direcionado até a

estação de tratamento, enquanto aqueles em áreas mais altas podem se beneficiar de um fluxo gravitacional, reduzindo a necessidade de bombas e elevatórias para o transporte do esgoto do município central.

Outra limitação metodológica significativa é a utilização de dados estáticos que não contemplam a dinâmica populacional e as mudanças nas condições de esgotamento sanitário ao longo do tempo. A ausência de uma análise temporal pode conduzir a conclusões que não se sustentam a médio e longo prazo, especialmente em contextos de rápido crescimento populacional ou de implementação de políticas públicas de saneamento.

Apesar da definição das limitações, há pesquisas que demonstram como modelos de aprendizado de máquina e inteligência artificial podem auxiliar no processo de composição de consórcios municipais, como Zancan, Passador e Passador, (2023). Também, Ferreira e Jucá, (2017), elaboraram pesquisa sobre metodologia para consórcios de gestão de resíduos sólidos e afirma que o uso da variável população urbana atendida é crítica. Com apenas variáveis quantitativas de potencial de geração de energia a partir de recuperação de biogás, Dalmo et al., (2019) alegam que a caracterização do potencial de energia pode servir como para estimular futuros projetos de consórcios.

Como se vê, a abordagem quantitativa adotada, embora robusta, carece de uma complementação quantitativa e qualitativa que elevaria a dificuldade de obtenção e tratamento de dados e que fugiria do escopo desta pesquisa, porém proporcionaria uma visão mais abrangente e contextualizada dos desafios e oportunidades para a formação de consórcios de esgotamento sanitário.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Identificação de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto doméstico

4.1.1 Descritores da dimensão econômica

Na seara da sustentabilidade econômica, os termos mais relevantes e que ocorriam com frequência nas publicações foram os apresentados no

Quadro 4.1. Esses termos foram substituídos pela palavra “custo” – escolhida palavra em língua portuguesa -, de tal forma que, no mapa gerado e apresentado adiante nesta seção, o termo custo representa a soma das relevâncias dos termos do

Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Termos relacionados à sustentabilidade econômica.

Termo relevante e ocorrente	Termo substituído por:
<i>operational cost</i>	Custo
<i>energy cost</i>	
<i>high cost</i>	
<i>maintenance cost</i>	

NOTA: No quadro, os termos que estão grafados em inglês foram traduzidos livremente: "operational cost" = "custo operacional", "energy cost" = "custo energético", "high cost" = "alto custo", "maintenance cost" = "custo de manutenção".

Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

4.1.2 Descritores da dimensão ambiental

No âmbito da sustentabilidade ambiental, os termos mais relevantes e que ocorreram com frequência nas publicações foram os apresentados no Quadro 4.2. Esses termos foram substituídos pela palavra “sustentabilidade” ou “remoção” – palavras definidas em português -, de tal forma que, no mapa gerado e apresentado adiante nesta seção, as palavras “sustentabilidade” e “remoção” representam somas das relevâncias dos termos do Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Termos relacionados à sustentabilidade ambiental.

Termo relevante e ocorrente		Substituído por:
<i>circular economy</i>	<i>sustainable wastewater treatment</i>	sustentabilidade
<i>life cycle assessment</i>	<i>reuse application</i>	
<i>energy recovery</i>	<i>agricultural reuse</i>	
<i>environmental sustainability</i>	<i>unrestricted reuse</i>	
<i>irrigation reuse</i>	<i>wastewater reuse</i>	
<i>potential reuse</i>	<i>water resource recovery facility</i>	
<i>phosphorus recovery</i>	<i>resource recovery</i>	
<i>nutrient recovery</i>	<i>water recovery</i>	
<i>sustainable development</i>	<i>reuse</i>	
<i>sustainable water treatment</i>	<i>water reuse</i>	
<i>sustainable solution</i>	<i>effluent reuse</i>	
<i>sustainable technology</i>	<i>greywater reuse</i>	
<i>sustainable treatment</i>		
<i>sustainable wastewater treatment system</i>		
<i>cod removal</i>	<i>p removal</i>	remoção
<i>ammonia removal</i>	<i>phosphorus removal</i>	
<i>e. coli removal</i>	<i>tp removal</i>	
<i>faecal coliform removal</i>	<i>total nitrogen removal</i>	
<i>nitrogen removal</i>	<i>tn removal</i>	
<i>nutrient removal</i>	<i>pathogen removal</i>	
<i>nutrients removal</i>		
<i>organic matter removal</i>		

NOTA: No quadro, os termos que estão grafados em inglês foram traduzidos livremente: "circular economy" = "economia circular", "sustainable wastewater treatment" = "tratamento de esgoto sustentável", "life cycle assessment" = "avaliação do ciclo de vida", "reuse application" = "aplicação de reúso", "energy recovery" = "recuperação de energia", "agricultural reuse" = "reúso agrícola", "environmental sustainability" = "sustentabilidade ambiental", "unrestricted reuse" = "reúso irrestrito", "irrigation reuse" = "reúso para irrigação", "wastewater reuse" = "reúso de águas residuais", "potential reuse" = "reúso potencial", "water resource recovery facility" = "instalação de recuperação de recursos hídricos", "phosphorus recovery" = "recuperação de fósforo", "resource recovery" = "recuperação de recursos", "nutrient recovery" = "recuperação de nutrientes", "water recovery" = "recuperação de água", "sustainable development" = "desenvolvimento sustentável", "sustainable water treatment" = "tratamento de água sustentável", "sustainable solution" = "solução sustentável", "sustainable technology" = "tecnologia sustentável", "sustainable treatment" = "tratamento sustentável", "sustainable wastewater treatment system" = "sistema de tratamento de esgoto sustentável", "cod removal" = "remoção de DQO", "p removal" = "remoção de P", "ammonia removal" = "remoção de amônia", "phosphorus removal" = "remoção de fósforo", "e. coli removal" = "remoção de E. coli", "tp removal" = "remoção de fósforo total", "faecal coliform removal" = "remoção de coliformes fecais", "total nitrogen removal" = "remoção de nitrogênio total", "nitrogen removal" = "remoção de nitrogênio", "tn removal" = "remoção de nitrogênio total", "nutrient removal" = "remoção de nutrientes", "pathogen removal" = "remoção de patógenos", "nutrients removal" = "remoção de nutrientes", "organic matter removal" = "remoção de matéria orgânica".

Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

4.1.3 Descritores da dimensão social

Embora a sustentabilidade social seja uma dimensão crucial, a análise realizada com o VosViewer não revelou termos significativos ou recorrentes nessa área. Isso indica que as pesquisas sobre ETEs sustentáveis têm dado maior ênfase às dimensões ambiental e financeira, resultando em um volume maior de publicações nessas áreas. Por exemplo, termos relacionados a tecnologias de tratamento de esgoto ou custos operacionais aparecem frequentemente, enquanto

palavras que abordem inclusão social, participação comunitária ou impactos na qualidade de vida local foram menos frequentes ou inexistentes nos clusters mapeados.

4.1.4 Mapa de relação e agrupamentos de termos relevantes

Como resultado das análises de 2.352 documentos que continham um descritor de tecnologia de tratamento de esgoto e um descritor de sustentabilidade, foram encontrados 32 termos relevantes selecionados pelo VosViewer. Foram selecionados para análise os termos que apresentaram uma frequência mínima de 15 ocorrências no conjunto de documentos avaliados. Esse limiar foi estabelecido pelo autor com o objetivo de otimizar a construção do dicionário de sinônimos e a identificação de termos relevantes. Caso fosse adotada uma frequência mínima menor, como 2 ocorrências, haveria um aumento significativo no número de palavras incluídas, o que resultaria em uma lista excessivamente extensa e pouco eficiente para a análise. Nos testes realizados, o critério de 15 ocorrências gerou um relatório contendo aproximadamente 2.200 palavras, que foram revisadas individualmente para a criação do dicionário de sinônimos. Detalhes adicionais podem ser consultados no Apêndice A. O método de ocorrência foi o binário, ou seja, o termo conta se aparece uma vez no texto. As repetições no mesmo texto não são contabilizadas.

O Quadro 4.3 elenca os termos relevantes relacionados a tratamento de esgoto, localidades geográficas e o número de ocorrências de cada palavra na análise da série história de documentos publicados na WoS – 1987 a 2023.

Quadro 4.3 - Termos relevantes nos documentos pesquisados no período de 1987 a 2023.

Ordem	Termo relevante	Ocorrência
1	<i>Activated sludge system</i>	256
2	<i>Advanced oxidation process</i>	23
3	<i>Anaerobic pond</i>	33
4	<i>Anaerobic treatment</i>	68
5	<i>Arid climate</i>	42
6	<i>Australia</i>	28
7	<i>Brazil</i>	48
8	<i>California</i>	22
9	<i>China</i>	92
10	<i>Conventional wastewater treatment plant</i>	19
11	<i>Custo</i>	56
12	<i>Duckweed pond</i>	24
13	<i>Egypt</i>	26
14	<i>India</i>	46
15	<i>Israel</i>	21
16	<i>Italy</i>	56
17	<i>Jordan</i>	21
18	<i>Membrane bioreactor</i>	165
19	<i>Morocco</i>	16
20	<i>Nanofiltration</i>	24
21	<i>Oxidation ditch</i>	67
22	<i>Remoção</i>	327
23	<i>Reverse osmosis</i>	34
24	<i>Sand filtration</i>	90
25	<i>Septic tank</i>	90
26	<i>Sequencing batch reactor</i>	24
27	<i>Spain</i>	25
28	<i>Stabilization pond</i>	239
29	<i>Sustainability</i>	1132
30	<i>Uasb</i>	195
31	<i>Ultrafiltration</i>	30
32	<i>Wetland</i>	822

NOTA: No quadro, os termos que estão grafados em inglês foram traduzidos livremente: "Activated sludge system" = "Sistema de lodo ativado", "Advanced oxidation process" = "Processo de oxidação avançada", "Anaerobic pond" = "Lagoa anaeróbia", "Anaerobic treatment" = "Tratamento anaeróbio", "Arid climate" = "Clima árido", "Australia" = "Austrália", "Brazil" = "Brasil", "California" = "Califórnia", "China" = "China", "Conventional wastewater treatment plant" = "Estação de tratamento de esgoto convencional", "Custo" = "Custo", "Duckweed pond" = "Lagoa de lentilha-d'água", "Egypt" = "Egito", "India" = "Índia", "Israel" = "Israel", "Italy" = "Itália", "Jordan" = "Jordânia", "Membrane bioreactor" = "Biorreator de membrana", "Morocco" = "Marrocos", "Nanofiltration" = "Nanofiltração", "Oxidation ditch" = "Valo de oxidação", "Remoção" = "Remoção", "Reverse osmosis" = "Osmose reversa", "Sand filtration" = "Filtração em areia", "Septic tank" = "Fossa séptica", "Sequencing batch reactor" = "Reator em batelada sequencial", "Spain" = "Espanha", "Stabilization pond" = "Lagoa de estabilização", "Sustainability" = "Sustentabilidade", "Uasb" = "UASB (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente)", "Ultrafiltration" = "Ultrafiltração", "Wetland" = "Área úmida".

Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

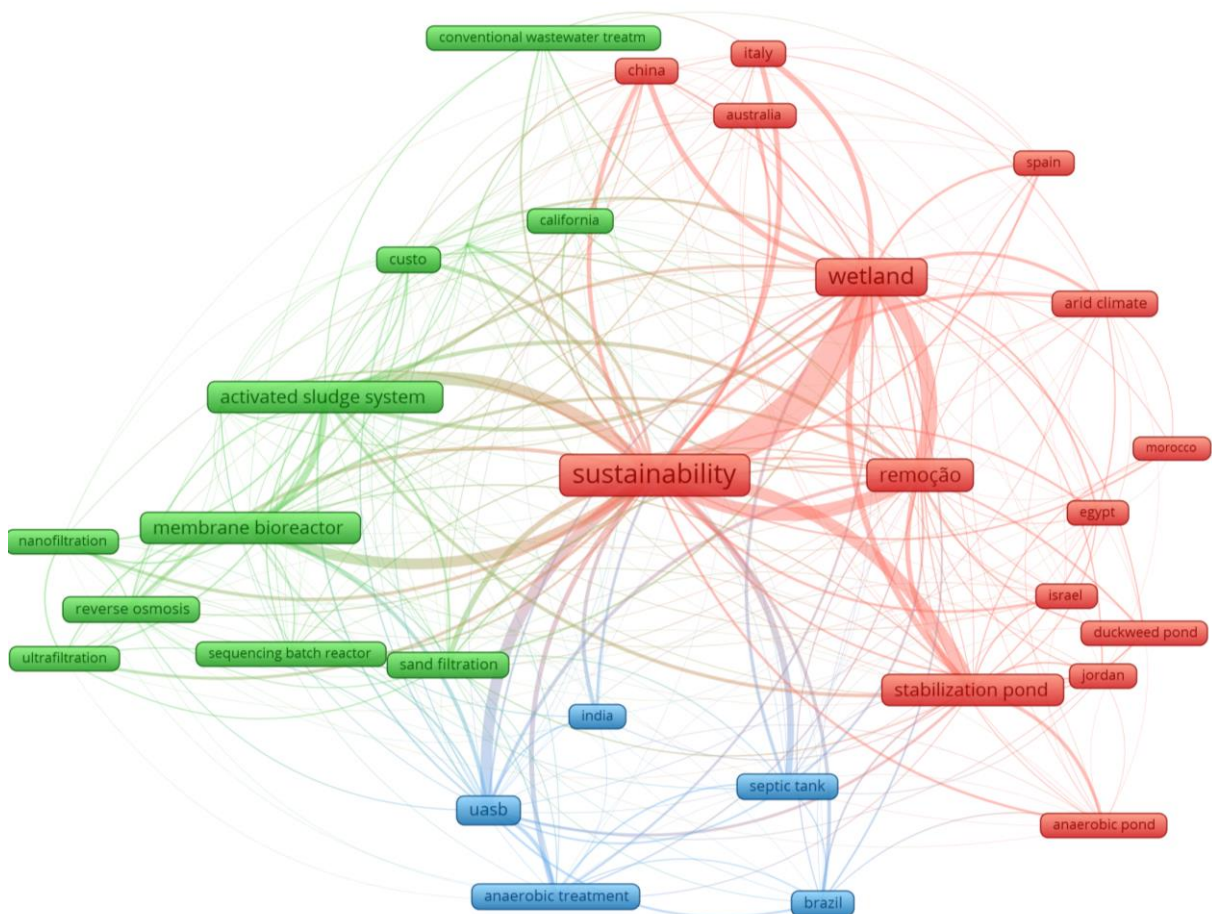
4.1.5 Mapa de sustentabilidade das tecnologias de tratamento de esgoto mais pesquisadas entre 1987 e 2023.

A partir da análise do VosViewer, foi possível elaborar Mapa de Sustentabilidade, o qual demonstra, por meio de conexões, os termos que mais apresentam relação nos textos pesquisados.

Quanto mais próximas e quanto mais largas as linhas de conexões entre as palavras, maior a correlação entre elas. Logo, infere-se que as tecnologias de tratamento de esgoto que estiverem mais próximas dos termos sustentabilidade e remoção e mais distantes de custo devem ser consideradas como mais sustentáveis em relação às demais tecnologias de tratamento. De maneira análoga, aquelas tecnologias que aparecerem mais próxima ao clima semiárido, pode indicar que são tecnologias com boa aplicação nesse clima.

A análise da Figura 4.1– Mapa de Sustentabilidade -, indica que, para a série histórica de documentos publicados na WoS – 1987 a 2023 –, existe tendência dos sistemas de alagado construído, sistemas de lagoas, UASB, lodo ativado e tanque séptico foram frequentemente associados aos termos de sustentabilidade. Portanto, pôde-se extrapolar a indicação dessas tecnologias de tratamento de esgoto como as mais sustentáveis, dentre os documentos pesquisados. Esse tipo de análise permitiu identificar tecnologias que não só são eficientes na remoção de contaminantes, mas também são economicamente viáveis e ecologicamente responsáveis.

Figura 4.1 - Mapa de sustentabilidade das tecnologias de tratamento de esgoto – WoS -1987 a 2023.



Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

4.1.6 Mapa de sustentabilidade das tecnologias de tratamento de esgoto mais investigadas entre 2018 e 2023.

Ao aplicar filtro para os trabalhos publicados nos últimos cinco anos, ou seja, no período de 2018 a 2023 (até o mês de março de 2023), obteve-se como resultado 1.023 documentos que continham um descritor de tecnologia de tratamento esgoto e um descritor de sustentabilidade. Como resultado das análises do VosViewer, foram encontrados 17 termos relevantes. Foram definidos também termos que ocorriam pelo menos 15 vezes no conjunto de documento analisados. O método de ocorrência seguiu o método binário.

O

Quadro 4.4 elenca as principais tecnologias de tratamento de esgoto, localidades geográficas e no número de ocorrência de cada palavra na análise da série história de documentos publicados na WoS – 2018 a 2023.

Quadro 4.4 - Termos relevantes nos documentos pesquisados no período de 2018 a 2023.

Ordem	Termo relevante	Ocorrência
1	<i>Activated sludge system</i>	99
2	<i>Advanced oxidation process</i>	16
3	<i>Anaerobic treatment</i>	30
4	<i>Arid climate</i>	24
5	<i>Brazil</i>	23
6	<i>China</i>	37
7	<i>Custo</i>	28
8	<i>India</i>	26
9	<i>Membrane bioreactor</i>	64
10	<i>Oxidation ditch</i>	41
11	<i>Remoção</i>	127
12	<i>Sand filtration</i>	27
13	<i>Septic tank</i>	40
14	<i>Stabilization pond</i>	58
15	<i>Sustainability</i>	529
16	<i>Uasb</i>	82
17	<i>Wetland</i>	393

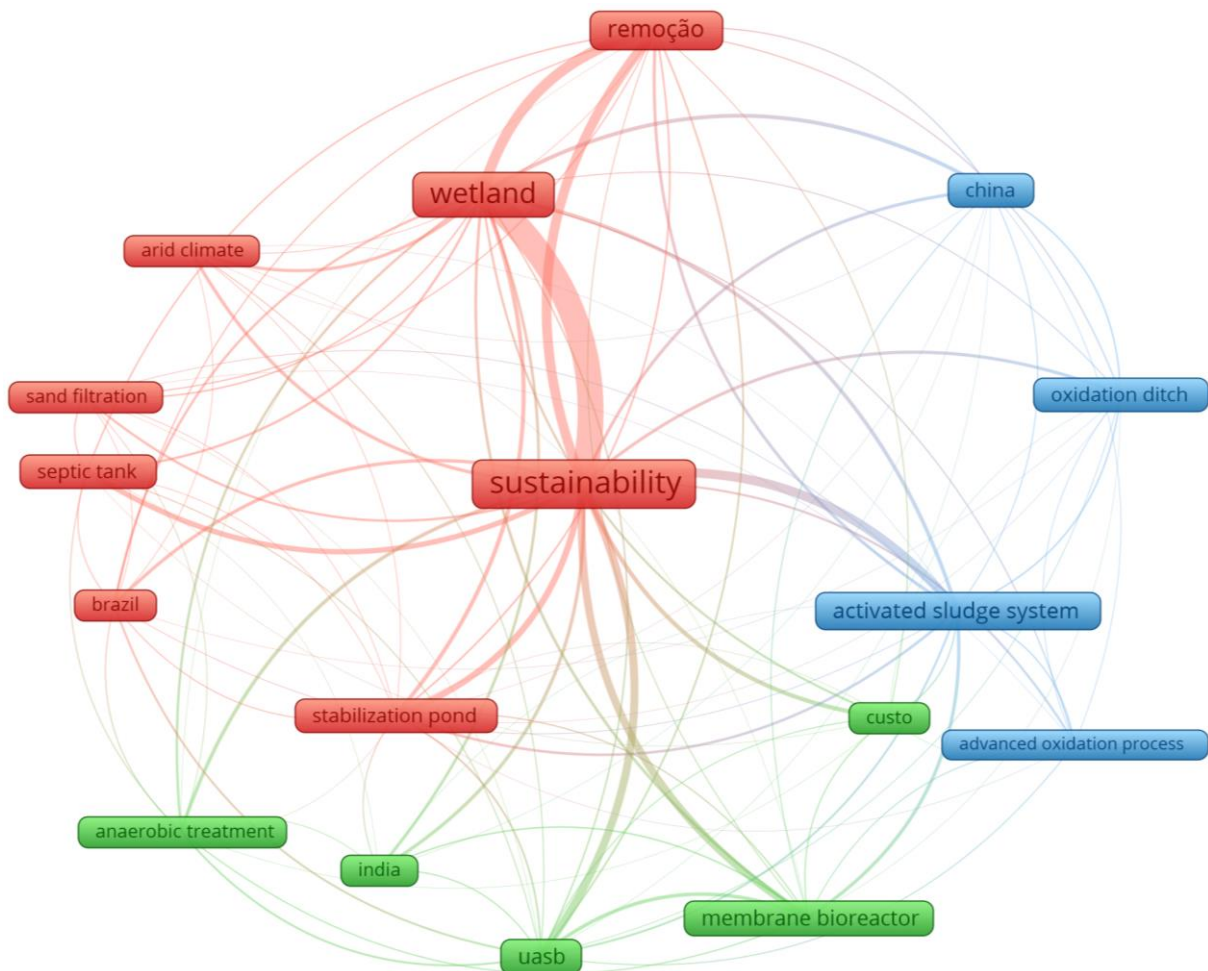
NOTA: Na tabela, os termos que estão grafados em inglês foram traduzidos livremente: "Activated sludge system" = "Sistema de lodo ativado", "Advanced oxidation process" = "Processo de oxidação avançada", "Anaerobic treatment" = "Tratamento anaeróbio", "Arid climate" = "Clima árido", "Brazil" = "Brasil", "China" = "China", "Custo" = "Custo", "India" = "Índia", "Membrane bioreactor" = "Biorreator de membrana", "Oxidation ditch" = "Valo de oxidação", "Remoção" = "Remoção", "Sand filtration" = "Filtração em areia", "Septic tank" = "Fossa séptica", "Stabilization pond" = "Lagoa de estabilização", "Sustainability" = "Sustentabilidade", "Uasb" = "UASB (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente)", "Wetland" = "Área úmida".

Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

A análise da Figura 4.2– Mapa de Sustentabilidade -, indica que, para os documentos

publicados na WoS – 2018 a 2023 –, existe tendência de UASB, lodo ativado, tanque séptico, filtração por areia, valos de oxidação e processos de oxidação avançada, com destaque para alagados construídos e sistemas de lagoas, serem mais estudados a partir do viés da sustentabilidade. Portanto, pode-se indicar essas tecnologias de tratamento de esgoto como as mais sustentáveis.

Figura 4.2 - Mapa de sustentabilidade das tecnologias de tratamento de esgoto – WoS -2018 a 2023.



Fonte: Web of Science. Processado pelo autor (2023).

Também é importante destacar a relação da tecnologia de tratamento de esgoto com o Brasil e com o clima semiárido. Nessa perspectiva, pode-se perceber boa correlação entre alagado construído, filtração em areia e tanque séptico. Essa primeira análise pode indicar que esse clima propicia boas condições de tratamento nessas tecnologias, porém, como será discutido adiante, algumas considerações podem ser feitas.

4.2 Validação dos resultados da seção 4.1

Com o fito de validar os resultados obtidos na seção 4.1, os artigos escolhidos de forma aleatória foram categorizados com base em suas principais conclusões e contribuições para a compreensão da sustentabilidade das tecnologias de tratamento de esgoto.

O Quadro 4.5 apresenta as principais tecnologias de tratamento de esgoto sustentáveis, conforme definidas na seção 4.1.4, publicações referentes a elas e trecho (sublinhado pelo autor deste trabalho) do artigo que aponta claramente a sustentabilidade da tecnologia.

Quadro 4.5 - Análise sistemática de documentos (período de publicação: 2018-2023) referentes às tecnologias sustentáveis definidas na análise integrativa.

Tecnologia de tratamento de esgoto	Referência	Trecho que evidencia a sustentabilidade
Alagado construído	(Yang <i>et al.</i> , 2023)	“Este estudo fornece orientação teórica e suporte técnico para purificação eficiente de esgoto e <u>recuperação de nutrientes</u> .”
Alagado construído	(Herrera-López <i>et al.</i> , 2021)	“Usando o sistema de wetland construído com reator anaeróbico acoplado, foi possível remover SST e coliformes em conformidade com os regulamentos europeus e mexicanos <u>para irrigação de jardinagem</u> ; no entanto, a remoção de matéria orgânica como DBO ₅ deve ser melhorada.”
Alagado construído	(Dias <i>et al.</i> , 2020)	“No geral, os CWs mostraram potencial para serem eficientes na remoção de contaminantes tóxicos, como metais, mantendo níveis moderados de nutrientes, <u>permitindo o uso de água recuperada na agricultura</u> , nomeadamente como fertilizante.”
Alagado construído	(Mlih <i>et al.</i> , 2020)	“As considerações do ciclo de vida da LECA incluem fornecimento, demanda de energia de produção, <u>reutilização e opções de reciclagem para substratos de zonas úmidas usados</u> , por exemplo, como correção de solo”
Alagado construído	(Li <i>et al.</i> , 2021)	“As wetlands (CWs) são caracterizadas por baixo custo de construção, manutenção e gerenciamento convenientes e recursos ecologicamente corretos. Eles surgiram como tecnologias promissoras para o tratamento de esgoto descentralizado em áreas rurais. A separação da fonte de água preta e água cinza pode facilitar a <u>reciclagem de esgoto e a reutilização de água recuperada, reduzir o tamanho das instalações de tratamento e diminuir o investimento em infraestrutura e o custo operacional. Isso está de acordo com o conceito de desenvolvimento sustentável</u> .”
Sistema de lagoas	(Zhang <i>et al.</i> , 2021)	“Este estudo foi concebido para compreender a eficiência das águas residuais tratadas com cianobactérias em comparação com o sistema de lagoa de estabilização convencional seguido nos tanques de peixes EKW e também para propor a <u>reutilização desses importantes nutrientes para devolvê-los ao meio ambiente</u> .”
Sistema de lagoas	(Sinn <i>et al.</i> , 2022)	“Este estudo caracterizou e avaliou nove desses sistemas WSP em termos de qualidade da água afluente e efluente e comparou-os com os requisitos para <u>reuso de água na agricultura</u> .”
Sistema de lagoas	(Achag, Mouhanni e Bendou, 2021a)	“De acordo com os resultados, WSPs bem conservados fornecem uma solução de tratamento de águas residuais viável, autossuficiente e <u>ambientalmente correta para o abastecimento de água de irrigação em áreas secas</u> .”
Sistema de lagoas	(Khajvand <i>et al.</i> , 2022)	“Além disso, são descritas as tecnologias mais apropriadas que podem ser empregadas para o tratamento descentralizado de águas cinzas, como pântanos construídos, lagoas de estabilização de resíduos, sistemas de membranas e tecnologias eletroquímicas. Finalmente, esta revisão resume a <u>recuperação de recursos e a reutilização sustentável de recursos</u> .”

Fonte: Autoria própria (2023).

Quadro 4.5 - Análise sistemática de documentos (período de publicação: 2018-2023) referentes às tecnologias sustentáveis definidas na análise integrativa. (Continuação)

Tecnologia de tratamento de esgoto	Referência	Trecho que evidencia a sustentabilidade
Filtro de areia	(Dae, Gholipour e Stefanakis, 2019)	“A modificação proposta do HRF aprovado pela OMS com 3 em vez de 4 compartimentos e com tamanhos de cascalho modificados mostrou um melhor desempenho em termos de turbidez, TSS, BOD5, COD e redução de clorofila-a, atendendo aos padrões locais para <u>reutilização de irrigação</u> , enquanto taxas de filtração mais baixas foram encontradas para aumentar ainda mais a eficiência.”
Filtro de areia associado a alagados construídos	(Sylla, 2020)	“As técnicas de filtragem vegetal têm se mostrado soluções adequadas no tratamento de águas residuais. Além disso, os efluentes podem ser <u>reutilizados em áreas com deficiência hídrica</u> , tanto em áreas urbanas quanto em áreas agrícolas rurais.”
Filtro de areia	(Spychała <i>et al.</i> , 2019)	“A filtragem de areia é um estágio primário de tratamento para <u>reutilização de águas cinzas</u> .”
Filtro de areia	(Oliveira Cruz, de, Tonetti e Gomes, 2018)	“O efluente final pode ser reaproveitado nas atividades agrícolas; no entanto, a frequência de manutenção deste sistema deve ser levada em consideração.”
Filtro de areia	(Martikainen <i>et al.</i> , 2023)	“A filtração de areia provou ser um método eficaz para o tratamento de águas residuais, mas a mudança de condições deve ser considerada ao projetar esses filtros. <u>As massas têm potencial de reaproveitamento como melhoramento do solo</u> .”
Tanque séptico	(Iribarnegaray <i>et al.</i> , 2018)	“Palavras-chave = {saneamento descentralizado; sistemas descentralizados de tratamento de águas residuais; águas residuais domésticas; áreas metropolitanas; Salta; <u>reutilização de águas residuais</u> },”
Tanque séptico	(Manfio, Tonetti e Matta, 2018)	“ <u>A reutilização do lodo foi comprovadamente possível</u> , mas exigiu grandes volumes de água e equipamentos mecânicos.”
Tanque séptico	(Beck <i>et al.</i> , 2021)	“Após a desinfecção UV, a qualidade das águas residuais atendeu aos padrões da OMS para <u>irrigação irrestrita</u> .”
Tanque séptico associado a alagados construídos	(Jorge <i>et al.</i> , 2022)	“Os objetivos do presente estudo foram caracterizar e avaliar uma unidade piloto de tratamento (UPT) de efluente bovino leiteiro (RDA) quanto a sua eficiência na redução dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos e <u>possível aplicação deste fertilizante na produção orgânica</u> .”
Tanque séptico	(Xue <i>et al.</i> , 2020)	“Os resultados sugeriram um bom potencial para a <u>recuperação de nutrientes</u> com base neste sistema FO duplo “desperdício do recurso” com gerenciamento adequado da limpeza da membrana.”

Fonte: Autoria própria (2023).

Como se vê no Quadro 4.5, as tecnologias admitidas como sustentáveis na análise integrativa, também foram validadas por saturação teórica, ou seja, os estudos revisados continuamente apontaram os aspectos sustentáveis das tecnologias de tratamento de esgoto, sem introduzir tecnologias não vislumbradas ou que não eram relacionadas a sustentabilidade, pôde-se, então, considerar que a saturação teórica foi atingida no levantamento das publicações. A validação dos resultados da análise integrativa por meio da análise sistemática dos artigos selecionados contribuiu para a corroborar informações obtidas no estudo integrativo.

4.2.1 Análise da aplicabilidade das tecnologias de tratamento de esgoto ao clima semiárido

A presente seção apresenta os resultados de uma análise fundamentada na literatura científica, que compõe parte do processo de seleção e avaliação das tecnologias mais adequadas

ao tratamento de esgoto em regiões semiáridas. A fundamentação teórica está integrada aos resultados para sustentar as conclusões e análises realizadas, conforme descrito na metodologia do estudo.

4.2.1.1 Alagados construídos e o clima semiárido

As pesquisas mostram que alagados construídos demonstraram alta eficiência na remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos e nutrientes em regiões semiáridas, com taxas de remoção de DBO, DQO e TSS variando entre 60% e 97% (Datta *et al.*, 2021; Gabr *et al.*, 2022; Ulsido, 2014; Zhang *et al.*, 2015). A remoção de metais pesados e contaminantes emergentes também foi significativa, embora a contaminação microbiana possa exigir tratamentos adicionais (Hdidou *et al.*, 2021).

Os alagados construídos são uma tecnologia simples, sustentável e de baixo custo, ideal para áreas rurais e regiões com escassez de recursos (Hdidou *et al.*, 2021; Stefanakis, 2020; Zhang *et al.*, 2015). Em regiões semiáridas, têm sido eficazes na produção de efluentes que atendem aos padrões de reutilização agrícola, contribuindo para a segurança hídrica e a produção agrícola (Datta *et al.*, 2021; Hdidou *et al.*, 2021; Stefanakis, 2020).

Estudos em climas semiáridos e áridos, como no Oriente Médio e Norte da África, mostraram que os alagados construídos podem ser adaptados para funcionar eficientemente, mesmo em condições climáticas extremas (Gholipour e Stefanakis, 2021; Stefanakis, 2020; Ulsido, 2014). A eficiência de remoção de poluentes pode variar com as estações do ano, sendo geralmente maior no verão e outono devido às temperaturas mais altas e maior incidência de luz solar (Bekkari, Amiri e Hadjoudj, 2022).

A reutilização de águas residuais tratadas em alagados construídos para irrigação agrícola pode aumentar a produtividade e gerar renda adicional para as comunidades locais (Datta *et al.*, 2021; Marangon *et al.*, 2020). Além disso, a biomassa produzida nos alagados construídos pode ser utilizada como forragem para animais, contribuindo para a economia local (Marangon *et al.*, 2020).

Como se vê, a literatura internacional corrobora com o resultado de que alagado construído para o tratamento de esgoto em climas semiáridos é uma solução viável e eficaz em climas semiáridos.

4.2.1.2 Sistema de lagoas e o clima semiárido

Veenstra, Al-Nozaily e Alaerts, (1995) avaliaram o desempenho de lagoas de estabilização no Iêmen, onde o clima semiárido e as altas temperaturas favoreceram o desenvolvimento de bactérias púrpura não-sulfurosas, impactando a remoção de matéria orgânica e causando problemas de odor. Bouhoum, Amahmid e Asmama, (2000) analisaram lagoas em Marrakech, Marrocos, e encontraram eficiência significativa na remoção de cistos de protozoários e ovos de helmintos, demonstrando a eficácia do sistema no controle de patógenos, embora houvesse acumulação de parasitas nos sedimentos.

Achag, Mouhanni e Bendou, (2021b) estudaram o desempenho de lagoas de estabilização no deserto do Saara, destacando a remoção de 75 a 85% da poluição orgânica e matéria suspensa total, mas enfrentando desafios para atender aos padrões de reuso. A pesquisa sugere melhorias através de tratamento terciário com lagoas de maturação. Outro estudo de Achag, Mouhanni e Bendou, (2023) também ressaltou a necessidade de otimização do design e gestão das lagoas para aumentar a eficiência no clima árido, confirmando que a manutenção adequada pode tornar os sistemas autossuficientes e ecologicamente viáveis.

Pesquisadores exploraram a influência das microalgas em lagoas de Marrakech e observaram que certas algas reduzem a presença de bactérias patogênicas, embora florescimentos de cianobactérias possam aumentar a concentração de *V. cholerae* durante períodos quentes. Essa dinâmica microbiana é crucial para a sustentabilidade das lagoas (Mezrioui *et al.*, 1994; Mezrioui e Oufdou, 1996).

Pastich *et al.*, (2016) no Brasil também destacaram a adequação das lagoas de estabilização em regiões semiáridas, observando que altas temperaturas favorecem o desenvolvimento microbiano, essencial para o tratamento eficaz, embora seja necessário monitorar e controlar a ocorrência de cianobactérias tóxicas.

Um estudo realizado por Chaoua *et al.*, (2018) avaliou a eficiência de dois sistemas de tratamento de esgoto na remoção de ovos de helmintos em áreas semiáridas do Marrocos, focando em lodo ativado e lagoas naturais. A remoção de ovos foi de 100% em Marrakech com lodo ativado e 94,97% em Chichaoua com sistema de lagoas. Esses resultados são cruciais para o uso seguro de águas residuais recicladas na agricultura em regiões semiáridas.

Um estudo sobre o desempenho de tratamento de esgoto em clima árido na Argélia comparou três processos: lagoa aerada (LA), lodo ativado (LA) e alagados construídos (AC). A pesquisa avaliou a eficiência na remoção de sólidos suspensos, DBO₅ e COD no período de oito

anos. Os resultados mostraram que o lodo ativado apresentou as maiores taxas de remoção, enquanto as lagoas aeradas tiveram as menores. Embora LA e AC tenham mostrado diferenças na eficiência, elas não foram estatisticamente significativas (Bachi *et al.*, 2022).

Portanto, a literatura internacional apoia a viabilidade e sustentabilidade dos sistemas de lagoas de estabilização em climas semiáridos. As condições climáticas favorecem o desempenho desses sistemas, desde que bem projetados e mantidos.

4.2.1.3 Filtração em areia e o clima semiárido

A filtração em areia é uma técnica bem adaptada para climas áridos e semiáridos devido à sua capacidade de tratar e remover poluentes de forma eficaz. Por exemplo, um estudo conduzido por Barkouch *et al.*, (2019) na região de Marrakech, Marrocos, mostrou que a filtração lenta em areia é eficaz na remoção de elementos metálicos pesados, como Cd, Cu, Pb e Zn, com eficiência variando de 68% a 100% dependendo da altura do filtro e das condições operacionais. Essa eficácia é essencial para o tratamento de águas residuais, que podem ser reutilizadas de forma segura em irrigação agrícola.

Além disso, a pesquisa realizada no município de Djibouti, localizada no país de Djibouti, na África Oriental, demonstrou que a filtração em areia pode reduzir a demanda química de oxigênio e a carga de coliformes totais em mais de 99%, destacando sua eficiência na purificação de águas residuais (Abdoulkader *et al.*, 2015). Este resultado é particularmente relevante para o uso de águas residuais tratadas na agricultura, uma prática comum em regiões áridas onde a disponibilidade de água é limitada.

A filtração em areia é uma solução viável para o tratamento de águas residuais em regiões semiáridas, melhorando a qualidade da água para irrigação e reduzindo a contaminação do solo e das plantas (Kaetzi *et al.*, 2019; Najafi e Tabatabaei, 2010).

Um estudo focado em sistemas de filtração em areia em áreas semiáridas indicou que a utilização de filtros de areia pode atender aos padrões de qualidade para reuso de águas residuais, tornando-se uma tecnologia viável e sustentável para a gestão de águas residuais (Chaabane *et al.*, 2022).

Yu *et al.*, (2015) tratam como uma tecnologia promissora para o reuso de águas residuais, a filtragem rápida direta de areia tem sido amplamente utilizada em todo o mundo, especialmente em países áridos em desenvolvimento e emergentes.

Portanto, a filtração em areia, com base nas evidências da literatura internacional, é uma

tecnologia bem aplicável e sustentável para o tratamento de esgoto em climas semiáridos. Entretanto, na maioria dos trabalhos pesquisados é uma tecnologia de tratamento de esgoto classificada como boa para o tratamento descentralizado de esgoto, ou seja, mais adequada para pequenas vazões de esgoto.

4.2.1.4 Tanque séptico e o clima semiárido

A análise dos estudos mostra que, em geral, o uso de tanques sépticos em regiões semiáridas pode apresentar desafios significativos para a sustentabilidade.

O estudo de Abderrazzaq et al., (2022) no sudeste de Marrocos indica que os tanques sépticos podem contribuir para a poluição da água subterrânea devido à alta salinidade e presença de poluentes. A pesquisa destaca a necessidade de uma gestão rigorosa para evitar a contaminação, um ponto crítico em climas onde a água subterrânea é uma fonte vital. Esse estudo sugere que, sem uma gestão adequada, os tanques sépticos podem ter um impacto negativo substancial.

Por outro lado, Field, Farrell-Poe e Walworth, (2007) demonstram que a eficácia dos sistemas sépticos em solos semiáridos depende fortemente do design e da localização. Seus resultados mostram que sistemas bem projetados podem minimizar a contaminação, o que reforça a ideia de que a sustentabilidade dos tanques sépticos está intimamente ligada ao planejamento adequado.

Em um contexto semelhante, Saidi, Bouri e Dhia, (2013) destacam que a poluição por tanques sépticos pode afetar negativamente a qualidade da água em aquíferos costeiros. Embora o estudo tenha se concentrado em regiões costeiras, as lições sobre a necessidade de uma gestão integrada são aplicáveis a regiões semiáridas, onde a proteção dos recursos hídricos é crucial.

O estudo de Alresheedi et al., (2023) aponta que a aceitação e a sustentabilidade dos sistemas sépticos dependem da conscientização e do suporte governamental. Esse fator é particularmente relevante em climas semiáridos, onde o apoio local pode ser determinante para a eficácia dos sistemas.

Além disso, Adimalla e Qian, (2022) identificam que os tanques sépticos podem ser uma fonte significativa de contaminação por nitratos e fluoretos em águas subterrâneas, afetando a saúde humana. Em regiões semiáridas, a gestão adequada e a adoção de tecnologias complementares podem ser necessárias para mitigar esses impactos negativos.

Jilali, Zarhloule e Georgiadis, (2015) ressaltam que os tanques sépticos contribuem para

a vulnerabilidade dos aquíferos, enfatizando a necessidade de monitoramento rigoroso e gestão eficaz para proteger os recursos hídricos.

Mahlknecht et al., (2018) reforçam a importância de políticas de gestão rigorosas para minimizar a poluição causada pelos tanques sépticos, destacando que a falta de uma gestão adequada pode resultar em impactos ambientais adversos.

No entanto, Kammoun et al., (2024) mostram que sistemas híbridos, incluindo tanques sépticos, podem ser eficazes na remoção de poluentes e patógenos quando bem projetados, sugerindo que a integração de tecnologias pode melhorar a eficiência dos tanques sépticos. Isso indica que, em algumas condições, é possível otimizar a sustentabilidade dos tanques sépticos por meio da combinação com outras práticas de tratamento.

Esses estudos indicam que, em climas semiáridos, os tanques sépticos podem apresentar uma correlação negativa com a sustentabilidade se não forem geridos de maneira adequada. A sustentabilidade dos tanques sépticos nestes contextos depende fortemente de um planejamento e gestão eficazes, além da integração com outras tecnologias de tratamento. Portanto, embora os tanques sépticos possam oferecer uma solução econômica e prática, é essencial implementar medidas adequadas para mitigar os riscos e garantir a proteção dos recursos hídricos.

4.3 Discussão sobre os resultados das investigações da primeira etapa

A análise bibliométrica realizada neste estudo revela que alagados construídos, sistemas de lagoas, filtração em areia e fossas sépticas são as tecnologias mais investigadas sob a ótica da sustentabilidade.

4.3.1 Comparação com a literatura clássica brasileira

É fundamental avaliar se essas tecnologias de tratamento encontram apoio na literatura clássica brasileira. Jordão e Pessoa (2005) delinearam padrões qualitativos esperados para as novas estações de tratamento de esgoto (ETEs) do Século XXI. O Quadro 4.6 elenca os aspectos a serem considerados nas construções de ETEs no Século XXI.

Quadro 4.6 - Aspectos qualitativos das estações de tratamento de esgoto do Século XXI.

Requisitos Tecnológicos	Requisitos Econômicos	Aspirações Comunitárias
Baixa produção de lodo	Baixo consumo energético	Controle de odor
Eficiência operacional	Baixo custo de construção	Aceitação pública
Eficiência na remoção de matéria orgânica	Baixo custo operacional	
Eficiência na remoção de nutrientes		
Eficiência na remoção de organismos patogênicos		
Simplicidade construtiva		
Simplicidade operacional		
Flexibilidade operacional		

Fonte: Elaboração do autor (2023) e adaptado de Jordão e Pessoa (2005).

Pode-se perceber, que o conceito de ETE do Século XXI para Jordão e Pessoa (2005), está mais próximo das ETEs convencionais do que das ETEs sustentáveis como definidas nesta tese. Apesar disso, é pertinente uma análise sobre a adequação das plantas de tratamento de esgoto sustentáveis – definidas neste trabalho -, aplicáveis às regiões semiáridas, em relação aos requisitos das estações de tratamento de esgoto do Século XXI, de forma tabular no Quadro 4.7, com critérios definidos pelo autor dessa tese.

Quadro 4.7 - Análise das tecnologias sustentáveis de tratamento de esgoto aplicáveis às regiões semiáridas à luz dos aspectos qualitativos das estações de tratamento de esgoto do Século XXI.

Aspectos qualitativos	Alagados construídos	Sistema de lagoas	Filtração em areia	Tanque séptico
<u>Requisitos tecnológicos</u>	<u>Baixo</u>	<u>Alto (se aerada)</u>	<u>Médio (controle de taxa)</u>	<u>Baixo</u>
Eficiência operacional	Variável	Bom	Intermediário	Baixo
Eficiência na remoção de matéria orgânica natural	Bom	Bom	Bom	Intermediário
Eficiência na remoção de nutriente	Bom	Bom	Intermediário	Ruim
Eficiência na remoção de patógenos	Bom	Bom	Intermediário	Intermediário
Simplicidade construtiva	Bom	Variável	Bom	Bom
Simplicidade operacional	Intermediário	Variável	Bom	Bom
Flexibilidade operacional	Bom	Variável	Bom	Bom
<u>Exigências econômicas</u>	<u>Intermediário</u>	<u>Intermediário</u>	<u>Baixo</u>	<u>Baixo</u>
<u>Custo operacional</u>	<u>Intermediário</u>	<u>Intermediário</u>	<u>Baixo</u>	<u>Baixo</u>
Controle de odor	Bom	Variável	Variável	Bom
Aceitação pública	Bom	Intermediário	Bom	Bom

Notas:

- Aspectos qualitativos são categorizados em três grupos: requisitos tecnológicos, requisitos econômicos e aspirações comunitárias.
- Aspectos qualitativos são avaliados em uma escala de três níveis: bom, intermediário e ruim.
- A avaliação baseia-se na literatura e na experiência do autor.

Fonte: Elaboração do autor (2023).

4.3.1.1 Discussão dos resultados

Conforme observado no Quadro 4.7, todas as tecnologias de tratamento de esgoto apresentadas atendem aos requisitos qualitativos esperados para as estações de tratamento de esgoto do século XXI. Contudo, existem diferenças discerníveis entre elas.

Alagados construídos exibem bom desempenho em todas as dimensões qualitativas, particularmente na remoção de matéria orgânica e nutrientes. No entanto, essa tecnologia exige uma área relativamente extensa e pode apresentar complexidades operacionais e de manutenção.

Os sistemas de lagoas apresentam desempenho geral bom, especialmente na remoção de organismos patogênicos, mas requerem tempos de detenção prolongados e podem ser suscetíveis a problemas relacionados a odores.

A filtração em areia, embora eficiente na remoção de matéria orgânica, apresenta menor eficácia na remoção de nutrientes e organismos patogênicos. Configura-se como uma opção relativamente simples para operação e manutenção.

As fossas sépticas apresentam desempenho intermediário na remoção de matéria orgânica e organismos patogênicos, mas são deficientes na remoção de nutrientes. Apesar da simplicidade na operação e manutenção, podem incorrer em vazamentos, se não mantidas adequadamente, e causar poluição das águas subterrâneas.

Nesse contexto, essa análise deve passar também pelos critérios de definição de ETEs sustentáveis estabelecidas nesta tese. O reuso do efluente líquido tratado emerge como uma prática crucial para a conservação de água e redução do consumo de água potável, uma estratégia que deve ser prioritária nas regiões semiáridas.

Alagados Construídos: produzem efluente líquido de alta qualidade, adequado para reuso em irrigação, aplicações industriais ou recarga de aquíferos;

Sistemas de Lagoas: também produzem efluente líquido de alta qualidade, adequado para reuso em irrigação, aplicações industriais ou recarga de aquíferos;

Filtração em Areia: gera efluente líquido de qualidade satisfatória, adequado para irrigação ou reuso industrial, mas é uma tecnologia que não costuma ser utilizada isoladamente;

Fossas Sépticas: produzem efluente líquido de qualidade inferior, adequado para irrigação ou reuso industrial. O reuso de lodo como fertilizante agrícola também é indicado como possível na literatura.

4.3.1.2 Outros aspectos relevantes para a decisão da tecnologia de tratamento de esgoto

Ademais, a bússola de tomada de decisão para a tecnologia de tratamento de esgoto no cenário semiárido deve ser guiada pelas considerações do uso do produto resultante do tratamento de esgoto. Kacprzak e Kupich, (2021) relatam que esta decisão, entretanto, não deve se dissociar de aspectos como:

Demandas Tecnológicas: melhoria da eficiência do processo de tratamento de esgoto através de soluções modernas que permitem uma melhor qualidade do esgoto tratado, redução dos custos operacionais através do desenvolvimento de tecnologias para a recuperação de energia e redução do consumo de energia dos processos e dispositivos tecnológicos, abordagem abrangente ao tratamento de esgoto como uma oportunidade para obter matérias-primas renováveis, por exemplo, produção de fertilizantes orgânicos;

Demandas Sociais: melhoria das condições de vida da sociedade devido ao desenvolvimento do sistema de gestão de água e esgoto, muito menos incômodo na operação das ETEs em relação aos arredores imediatos, criação de infraestrutura moderna, geração de novos empregos especializados, criação de novas matérias-primas para uso pela sociedade;

Demandas Ecológicas: redução das emissões de gases de efeito estufa, redução da quantidade de energia utilizada de fontes não renováveis, minimização da quantidade de resíduos reutilizando matérias-primas recuperadas, economia de recursos de água potável, limitação da emissão de micropoluentes para o ambiente aquático;

Potencial de Pesquisa, Desenvolvimento e Comercial: desenvolvimento de empreiteiros nacionais do setor de construção e aumento das oportunidades de exportação da tecnologia desenvolvida entendida como um produto, bem como a possível exportação de soluções econômicas relativas às instalações de tratamento de esgoto.

O autor desta tese, também acha importante mencionar como fatores norteadores da escolha da solução de tratamento de esgoto:

Avaliação da Viabilidade Técnica e Econômica: É crucial avaliar a viabilidade técnica e econômica das diferentes tecnologias disponíveis, considerando as características específicas da região.

Participação Comunitária: A participação ativa da comunidade é indispensável para a implementação bem-sucedida de qualquer tecnologia de tratamento de esgoto.

Capacitação e Educação: Iniciativas de capacitação e educação são vitais para conscientizar a população sobre a importância do saneamento e a gama de tecnologias

sustentáveis disponíveis.

Jassal et al., (2023) estudaram os desafios do reuso de águas residuais e mostraram como são variados e complexos, como a presença de microrganismos patogênicos na água de esgoto. Esses microrganismos, que incluem bactérias, vírus e protozoários, podem causar doenças transmitidas pela água e representar sérios riscos à saúde. Para minimizar esses riscos, é necessário realizar análises qualitativas e quantitativas detalhadas durante o planejamento do reuso. Apesar das medidas de tratamento, como a desinfecção, é crucial manter um monitoramento rigoroso, pois patógenos podem infiltrar-se no solo e contaminar águas subterrâneas.

Para os autores Jassal et al., (2023), outro desafio relevante é a presença de metais pesados, que frequentemente entram na água residual através de resíduos industriais. Devido à alta solubilidade desses metais, eles são facilmente absorvidos por organismos vivos e podem acumular-se na cadeia alimentar, levando a problemas de saúde graves, como distúrbios neurológicos e renais.

Abordar esses desafios é crucial para a implementação bem-sucedida de estratégias de reciclagem e reuso de águas residuais. Garantir um tratamento eficaz e monitoramento rigoroso, compreender os impactos nos ecossistemas e promover a aceitação pública por meio de educação são passos essenciais para superar esses obstáculos e avançar na reutilização segura e sustentável da água.

Portanto, alagados construídos e sistemas de lagoas emergem como soluções sustentáveis e viáveis para o tratamento de esgoto no semiárido, alinhando-se com a literatura internacional que ressalta a eficiência desses sistemas em climas áridos e semiáridos. A filtração em areia, embora eficiente, é mais adequada para aplicações descentralizadas, conforme indicado em estudos comparativos globais. Por fim, tanques sépticos, apesar de sua eficácia, requerem cuidados específicos para evitar a contaminação de águas subterrâneas, um desafio amplamente discutido em publicações internacionais. Esses achados corroboram as tendências observadas em pesquisas internacionais.

4.4 Aplicação do modelo formulado em municípios de pequeno porte do estado da

Paraíba

4.4.1 Municípios elegíveis para a aplicação do modelo formulado

Foi elaborado um rol de municípios que satisfaziam as seguintes condições: ser da Paraíba, ter uma população inferior a 20.000 habitantes em 2010 e possuir um índice de população urbana atendida por tratamento de esgoto menor que 1,00. O número de municípios que satisfaziam essas condições foi de 165.

Para esses municípios selecionados, foram adquiridas informações sobre a localização geográfica das sedes municipais, especificamente em termos de latitude e longitude. Esses dados permitiram identificar o ponto central do polígono formado pela zona urbana de cada município. Portanto, foi elaborado o Quadro 4.8 identificando os dez primeiros municípios, em ordem alfabética, elegidos para a elaboração do estudo de caso. O quadro completo pode ser analisado na seção de Apêndice B.

Quadro 4.8 – Dez primeiros municípios elegidos para o estudo de caso.

Município	População total (hab.)	População urbana (hab.)	PSTE (hab.)	Coordenadas geográficas da sede municipal (°)	
				Latitude	Longitude
Água Branca	10375	4459	4459	-7,511861	-37,636
Aguiar	5622	2746	2746	-7,092219	-38,1684
Algodão de Jandaíra	2588	1347	1347	-6,899451	-36,0113
Amparo	2264	1152	1152	-7,567368	-37,063
Araçagi	16857	6659	6659	-6,85214	-35,3793
Arara	13613	9601	9601	-6,828543	-35,7555
Areia de Baraúnas	2105	1111	1111	-7,12379	-36,945
Areial	7054	5015	5015	-7,049901	-35,9251
Aroeiras	19081	9531	9531	-7,545153	-35,7068
Assunção	4067	3286	3286	-7,07501	-36,7314

Legenda: PSTE é a população urbana sem atendimento de tratamento de esgoto.

Fonte: Brasil (2010, 2019). Processado pelo autor (2023).

4.4.2 Agrupamento de municípios próximas geograficamente

Com o objetivo de determinar a proximidade geográfica entre os municípios selecionados, foi criada uma matriz de distâncias que abrange todos os municípios elegidos. Essa matriz foi desenvolvida utilizando o método de Haversine (U. S. Census Bureau Geographic Information Systems FAQ, [s.d.]), o qual oferece uma boa precisão para medir a distância entre dois pontos considerando a curvatura da Terra.

Devido à extensão da matriz de resultados, que possui 166 colunas por 166 linhas, foi necessário implementar um procedimento em linguagem Visual Basic for Applications (VBA - Microsoft Excel®).

O Quadro 4.9 apresenta as distâncias, em quilômetros, entre as sedes dos oito primeiros municípios selecionadas, listadas em ordem alfabética. É importante destacar que a matriz é simétrica e que a diagonal principal sempre contém o valor 0,0, pois a distância entre um município e ela mesma é de 0 km. A matriz completa, abrangendo todos os 165 municípios selecionados, não pôde ser inserida como apêndice devido à sua extensão, mas está disponível como arquivo complementar a este estudo.

Quadro 4.9 - Matriz de distâncias entre as sedes dos municípios eleitos, em quilômetros.

	Água Branca	Aguiar	Algodão de Jandaíra	Amparo	Araçagi	Arara	Areia de Baraúnas
Água Branca	0,0	75,0	191,7	63,5	259,5	220,9	87,6
Aguiar	75,0	0,0	239,0	132,9	309,0	267,9	135,0
Algodão de Jandaíra	191,7	239,0	0,0	137,8	70,0	29,3	106,0
Amparo	63,5	132,9	137,8	0,0	202,0	166,0	51,0
Araçagi	259,5	309,0	70,0	202,0	0,0	41,6	175,4
Arara	220,9	267,9	29,3	166,0	41,6	0,0	135,3
Areia de Baraúnas	87,6	135,0	106,0	51,0	175,4	135,3	0,0

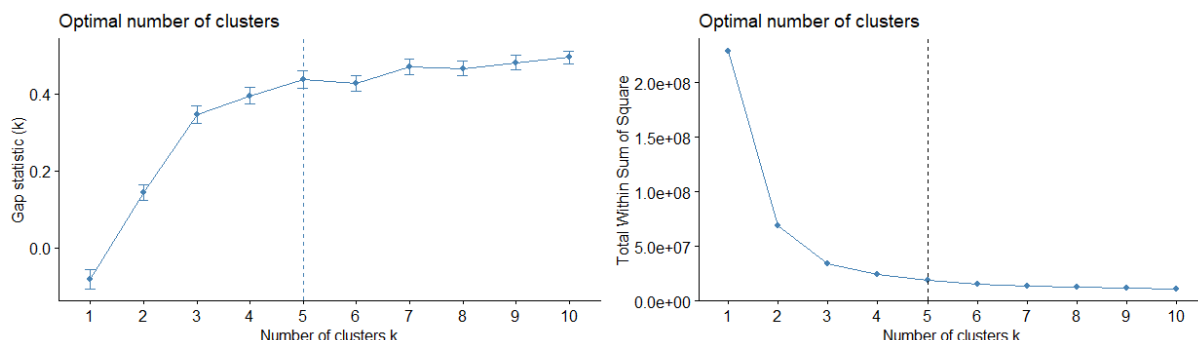
Fonte: Brasil (2010). Processado pelo autor (2023).

A partir da matriz de distância elaborada, foi necessário realizar o agrupamento dos municípios para identificar quais deles eram geograficamente próximos. Além disso, dentro de cada grupo, foi preciso determinar os municípios centrais e os municípios adjacentes. Para realizar essa definição, foi utilizado cálculo iterativo da soma das distâncias para cada município próxima a um possível município central do grupo.

O município que apresentou o menor valor no somatório das distâncias, intragrupo, foi considerada o município central. Em outras palavras, o município central foi aquele que apresentava a menor distância total em relação às demais municípios adjacentes do grupo. Essa definição do município central é de suma importância para otimizar a eficiência logística, especialmente no que diz respeito à instalação da administração central do consórcio. A escolha cuidadosa do município central em cada grupo contribui para facilitar a coordenação das ações e a tomada de decisões.

A Figura 4.3 apresenta gráficos que demonstram resultados dos métodos pelo número de grupo. A quantidade de grupos mínima é definida, subjetivamente, quando o leitor julga que a taxa entre dois números de grupos sucessivos é suficientemente pequena. Pôde-se perceber, diante da Figura 4.3 que, a partir de cinco grupos, o k means retornaria agrupamento com boa definição.

Figura 4.3 - Métodos para definição de número ótimo de grupos: *Gap Statistic Method* e *WSS Method*.



Fonte: Brasil (2010). Processado pelo autor (2023).

Apesar dessa definição inicial, ao aplicar o algoritmo k-means para agrupar os municípios com base na matriz de distâncias, foi constatado que alguns grupos tiveram uma composição de até 19 municípios próximos. Isso ocorreu devido à distribuição geográfica dos municípios e às características específicas de cada região. Por características do método, o controle de número máximo de municípios por grupo não pôde ser realizado, já que o método prevê apenas a quantidade de grupo que devem ser formados. A composição de 27 grupos gera apenas uma mera expectativa de que o número médio de municípios por grupo seja próximo a seis.

Essa variação no número de municípios em cada grupo pode apresentar desafios adicionais no processo de formação dos consórcios, exigindo uma análise mais aprofundada das condições locais e das necessidades específicas de cada grupo de municípios. É importante garantir que a estruturação dos consórcios seja flexível o suficiente para lidar com essa diversidade e que as decisões tomadas estejam alinhadas com os objetivos de desenvolvimento regional e da sustentabilidade.

O

Quadro 4.10 apresenta cinco grupos formados pelos municípios próximos, porém, para uma análise completa de todos os 27 grupos formados, é necessário consultar a seção documento Apêndice C complementar deste trabalho, no qual consta a planilha com a descrição detalhada de cada grupo.

Quadro 4.10 – Cinco grupos de municípios próximos e as distâncias entre os municípios centrais e os adjacentes de cada grupo.

Grupo1	Município	Distância (km)
Município central	Lastro	
Municípios adjacentes	Vieirópolis	15,2
	São Francisco	9,1
	Santa Cruz	13,2
Grupo3		
Município central	Conceição	
Municípios adjacentes	Santa Inês	9,5
Grupo5		
Município central	Aguiar	
Municípios adjacentes	Igaracy	17,28
	São José da Lagoa Tapada	10,09
Grupo9		
Município central	Joca Claudino	
Municípios adjacentes	Bernardino Brandão	8,8
	Poço Dantas	13,0
	Triunfo	14,2
	Brejo.dos.Santos	20,39
	São.Domingos	31,86
Grupo16		
Município central	Salgadinho	
Municípios adjacentes	Taperoá	24,2
	Assunção	29,1
	Areia de Baraúnas	28,0
	Junco do Seridó	11,3
	Santa Luzia	28,4
	São José dos Cordeiros	42,1
	Livramento	33,4
	São José do Sabugi	16,2

Fonte: Brasil (2010). Processado pelo autor (2023).

Percebe-se a heterogeneidade da quantidade de municípios por grupo, variando de uma a 18 municípios adjacentes. A distância média entre os municípios centrais e os municípios adjacentes foi de 25 km. A maior distância ocorreu no grupo 25, entre os municípios de Pitimbu e Marcação que distam entre si 84 km. Diante dessa média, pôde-se perceber que a definição dos municípios centrais foi acertada e gerou pequenas distâncias entre ela e as adjacentes, respectivamente. Ao deslocar uma equipe do município central até um município adjacente, espera-se que o tempo de deslocamento seja em média de 19 min.

4.4.3 Agrupamento de municípios em situação semelhante quanto ao atendimento de tratamento de esgoto

Após a formação dos grupos de municípios próximos geograficamente, torna-se essencial analisar as similaridades nas condições de tratamento de esgoto de cada município dentro de cada grupo. Para esse propósito, foi necessário realizar um novo agrupamento, utilizando o método k-means, dos municípios que apresentavam quantidades semelhantes de habitantes sem atendimento de tratamento de esgoto. Esse agrupamento foi chamado de Grupo PSTE.

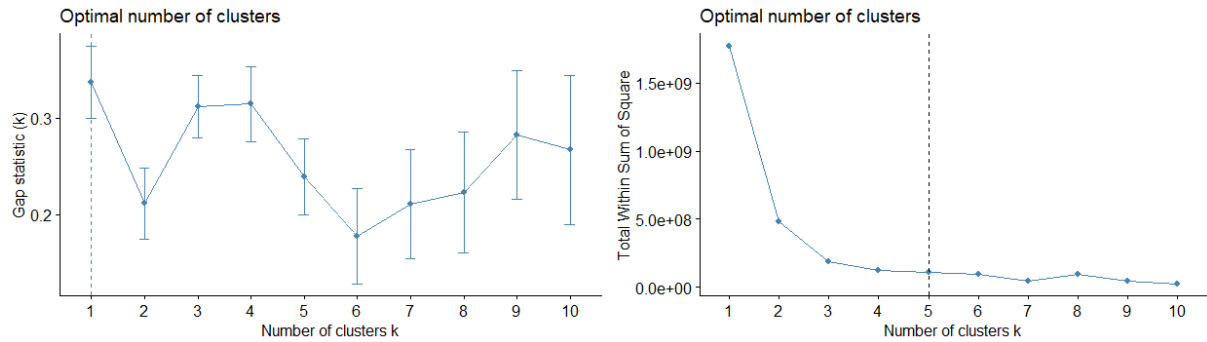
Para realizar esse procedimento, foi elaborado um *script* em R, utilizando o RStudio, que executou todos os cálculos necessários e retornou os grupos de municípios com situações semelhantes em relação ao tratamento de esgoto. O código elaborado pode ser utilizado para qualquer banco de dados, seja ele de outros estados brasileiros ou do mundo.

Para a entrada de dados no R, foi necessária a elaboração de um código em VBA para organizar os dados oriundos da planilha em Excel na seguinte formatação, para a qual o vetor *dist* representa as distâncias entre o município central e os municípios adjacentes, *pop_tot* é o vetor composto pela população total de cada município, assim como *pop_pste* é a população urbana sem atendimento de tratamento de esgoto de cada município, *grupo_pste* é o Grupo PSTE de cada município e o vetor *município* é composto pelos nomes do município de um grupo, neste caso, do grupo de proximidade Grupo1:

```
dist <- c(0,15.3,9.2,13.3)
pop_tot <- c(2698,5395,3377,6579)
pop_pste <- c(1268,1065,1368,3038)
grupo_pste <- c("F","F","F","B")
município <- c("Lastro","Vieirópolis","São Francisco","Santa Cruz")
```

A definição do número adequado de grupos foi novamente feita por meio do método do cotovelo (*elbow method* - WSS) e do *Gap Statistic Method*, e apresentado na Figura 4.4. No presente caso, foi escolhido o número de sete grupos para melhor representar as características dos municípios em relação ao tratamento de esgoto, denominados pelas letras do alfabeto de A a G.

Figura 4.4 - Métodos para definição de número ótimo de grupos: *Gap Statistic Method* e *WSS Method*.



Fonte: Brasil (2019). Processado pelo autor (2023).

Como resultado da análise dos cálculos e posterior organização em planilha eletrônica, foi elaborado o Quadro 4.11, no qual são apresentados os municípios e seus respectivos Grupos PSTE.

Quadro 4.11 - Municípios agrupados mediante o atributo de similaridade da população urbana sem tratamento de esgoto.

Município	PSTE	Cluster	Mulungu			Pilõeszinhos		
Teixeira	10434	A	Jericó	4863	C	São José do Sabugi	2671	E
Pocinhos	10643	A	Massaranduba	4892	C	Monte Horebe	27	F
Brejo do Cruz	10776	A	São Vicente do Seridó	4907	C	Poço Dantas	101	F
Uiraúna	10897	A	Capim	4923	C	São Domingos do Cariri	113	F
Soledade	11327	A	São Sebastião de Lagoa de Roça	4976	C	Zabelê	161	F
Lucena	11549	A	Areial	5015	C	Cacimbas	174	F
Ingá	11602	A	Desterro	5098	C	Bom Sucesso	199	F
Piancó	11775	A	Caiçara	5163	C	Catingueira	296	F
Conceição	11848	A	Imaculada	5297	C	Nazarezinho	318	F
Pitumbu	11881	A	Salgado de São Félix	5314	C	Várzea	327	F
Itapororoca	12121	A	Fagundes	5357	C	São José da Lagoa Tapada	334	F
Picuí	12463	A	Belém do Brejo do Cruz	5417	C	Mogeiro	361	F
Remígio	14715	A	Nova Floresta	7953	D	Livramento	381	F
Prata	2705	B	Cruz do Espírito Santo	8054	D	Umbuzeiro	425	F
Aguiar	2746	B	Pirpirituba	8096	D	Junco do Seridó	428	F
Duas Estradas	2785	B	Pilar	8252	D	Malta	502	F
Riachão do Bacamarte	2849	B	Bonito de Santa Fé	8304	D	Matinhas	715	F
São José de Caiana	2903	B	Jacaraú	8334	D	Barra de Santana	743	F
Nova Palmeira	2932	B	Barra de Santa Rosa	8771	D	Quixaba	748	F
Congo	3005	B	Serra Branca	8959	D	Mataraca	764	F
Santa Cruz	3038	B	Cacimba de Dentro	9388	D	Santa Luzia	772	F
Pilões	3112	B	Aroeiras	9531	D	Santo André	818	F
Nova Olinda	3132	B	Arara	9601	D	Joca Claudino	848	F
São Bentinho	3164	B	Juazeirinho	10019	D	Coxixola	860	F
Boa Ventura	3214	B	Juripiranga	10141	D	Gado Bravo	899	F
Pedra Lavrada	3272	B	Santa Inês	1451	E	Taperoá	928	F
Marcação	3275	B	Belém	1464	E	Sobrado	940	F
Assunção	3286	B	São José dos Cordeiros	1487	E	Parari	972	F
Serraria	3355	B	São José do Bonfim	1523	E	Bernardino Batista	996	F
Caldas Brandão	3476	B	Mãe D'Água	1557	E	Bom Jesus	1065	F
Baía da Traição	3549	B	Poço de José de Moura	1564	E	Vieirópolis	1065	F
Santana dos Garrotes	3569	B	São José de Espinharas	1573	E	São Domingos	1086	F
Olho d'Água	3571	B	São João do Rio do Peixe	1600	E	Caraúbas	1091	F
Serra Redonda	3583	B	Vista Serrana	1739	E	Caturité	1104	F
Ibiara	3592	B	Serra Grande	1744	E	Areia de Baraúnas	1111	F
Natuba	3594	B	Cacimba de Areia	1745	E	Amparo	1152	F
Montadas	3672	B	Sossêgo	1813	E	Passagem	1218	F
Casserengue	3689	B	Logradouro	1926	E	Lastro	1268	F
Cachoeira dos Índios	3695	B	Carrapateira	1955	E	Boqueirão	1275	F
Boa Vista	3719	B	Serra da Raiz	2075	E	Mato Grosso	1309	F
Diamante	3755	B	Cuité de Mamanguape	2122	E	Algodão de Jandaíra	1347	F
Sertãozinho	3769	B	Santana de Mangueira	2133	E	Salgadinho	1363	F
Borborema	3878	B	Ouro Velho	2134	E	São Francisco	1368	F
Igaracy	4078	C	Santa Teresinha	2193	E	Riacho de Santo Antônio	1377	F
Riacho dos Cavalos	4126	C	São João do Cariri	2253	E	Cuité	5493	G
Lagoa de Dentro	4182	C	Riachão	2264	E	Marizópolis	5805	G
Maturéia	4345	C	Lagoa	2284	E	São Mamede	5878	G
Juru	4361	C	Emas	2286	E	Gurinhém	5901	G
Triunfo	4427	C	Pedro Régis	2287	E	Paulista	6022	G
Água Branca	4459	C	Gurjão	2342	E	Juarez Távora	6287	G
Puxinanã	4504	C	Pedra Branca	2416	E	Itatuba	6462	G
Dona Inês	4592	C	Cabaceiras	2514	E	Araçagi	6659	G
Condado	4616	C	Damião	2515	E	Tavares	6939	G
Tacima	4692	C	Barra de São Miguel	2568	E			
Manaíra	4747	C	São José dos Ramos	2601	E			

Legenda: PSTE é a população urbana sem atendimento a tratamento de esgoto.

Fonte: Brasil (2019). Processado pelo autor (2023).

Diante da análise do Quadro 4.11, pode-se perceber que o resultado do agrupamento definiu os grupos da seguinte maneira (PSTE é a população urbana sem atendimento de esgoto):

- Grupo A (13 municípios): PSTE de 10.434 a 14.715 hab.
- Grupo B (30 municípios): PSTE de 2.705 a 3.878 hab.
- Grupo C (25 municípios): PSTE de 4.078 a 5.417 hab.
- Grupo D (13 municípios): PSTE de 8.054 a 10.141 hab.

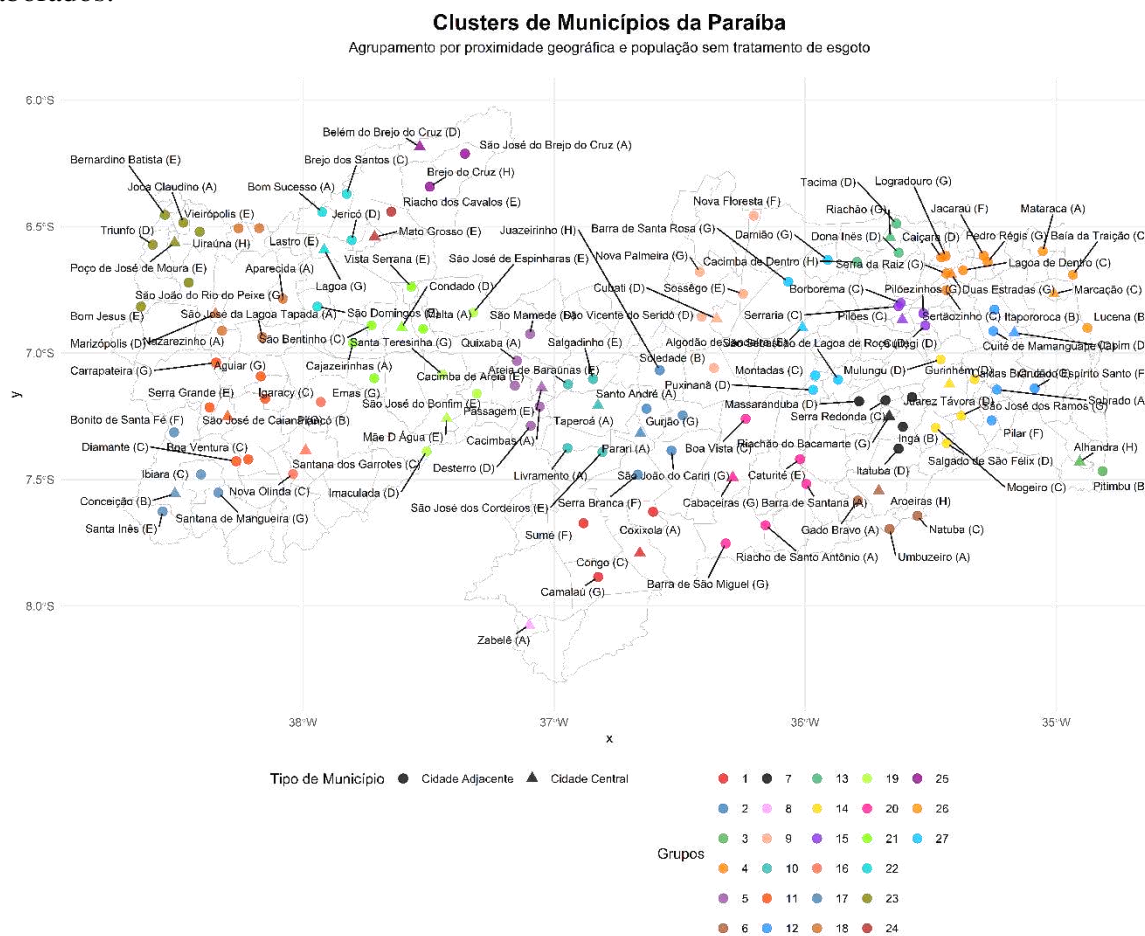
- Grupo E (32 municípios): PSTE de 1.451 a 2.671 hab.
- Grupo F (43 municípios): PSTE de 27 a 1.377 hab.
- Grupo G (9 municípios): PSTE de 5.493 a 6.939 hab.

Observa-se que a faixa de municípios com até 1.377 habitantes da população urbana sem tratamento de esgoto, é mais ampla, contando com um total de 43 municípios. Em seguida, tem-se 32 municípios na faixa de 1.451 a 2.671 habitantes sem tratamento de esgoto. Dessa forma, é perceptível que cerca de 60% dos municípios possuem população urbana sem tratamento de esgoto menor que 5.500 habitantes.

4.4.4 Análise em mapa dos grupos de municípios consorciáveis

Foi elaborado um mapa geográfico do estado da Paraíba que apresenta os grupos de cidades próximas, definidos com base em critérios de proximidade geográfica e características demográficas. No rótulo de cada cidade, entre parênteses, é indicado o grupo PSTE correspondente, permitindo uma análise visual clara das relações territoriais entre os municípios. Este mapa, ilustrado na Figura 4.5, contribui para a compreensão espacial das dinâmicas regionais abordadas nesta pesquisa.

Figura 4.5 – Mapa geográfico da Paraíba destacando os grupos de municípios consorciáveis elaborados.



O mapa dos municípios consorciáveis da Paraíba, gerado com base em análises de agrupamento pelo método k-means, revela insights valiosos para o planejamento consorciado do tratamento de esgoto no estado. Os 27 clusters identificados destacam uma organização estratégica onde municípios próximos geograficamente podem colaborar para soluções compartilhadas. As cidades centrais podem servir como epicentros para instalações de tratamento regionalizadas, o que pode reduzir os custos operacionais e aumentar a eficiência do sistema.

Outro ponto de destaque é a variação na distribuição dos clusters em relação às regiões mais áridas do estado. Nas áreas do semiárido, os agrupamentos apresentam maior dispersão geográfica, indicando um desafio adicional para a implementação de sistemas consorciados devido às longas distâncias. Já nas áreas mais urbanizadas e com maior densidade populacional, os clusters tendem a ser mais compactos, sugerindo a possibilidade de soluções consorciadas que priorizem eficiência operacional e atendimento a uma população maior em menor área.

4.4.5 Análise dos municípios consorciáveis

Com base nos resultados dos agrupamentos anteriores, torna-se necessário definir quais municípios são consorciáveis. Devido à quantidade de informações envolvidas, essa tarefa não é trivial. Para melhor visualizar os dados e facilitar o processo de definição, foram gerados gráficos 3D para todos os grupos formados.

Nos gráficos 3D, o eixo X representa a distância entre o município central e o município adjacente, o eixo Y mostra a PSTE (População urbana Sem Tratamento de Esgoto), e o eixo Z informa o valor da população total do município. Além disso, foi adicionado um atributo de cor para cada ponto, representando o grupo ao qual pertence na classificação PSTE. Quando dois pontos apresentam a mesma cor, isso indica que pertencem ao mesmo grupo PSTE.

O município central em cada grupo é identificado pelo ponto com rótulo "C", e os municípios adjacentes são rotuladas como "A1", "A2", "A3", ... "An", no qual "n" representa a quantidade de municípios adjacentes no grupo. Por exemplo, "A1" significa "Município Adjacente 1", e assim sucessivamente, até o enésimo sufixo.

Além disso, foram adicionadas linhas cinzas que conectam o município central aos municípios adjacentes, e linhas cinzas paralelas ao eixo Y que conectam os municípios adjacentes ao plano XZ (que foi preenchido por polígono na cor cinza clara). Essas linhas foram criadas com o propósito de facilitar a visualização do gráfico tridimensional, considerando que a noção de profundidade do gráfico pode ser afetada quando impresso em duas dimensões no papel. Também, foram definidos tamanhos dos marcadores diferentes para cada município. O marcador de diâmetro maior indica que “está mais próximo” do observador e o diâmetro do marcador menor indica que “está mais longe” do observador, indicando que está mais distante ao plano do papel.

Essas linhas auxiliares proporcionam uma melhor compreensão da disposição espacial dos municípios centrais e adjacentes em relação aos eixos do gráfico. Essa representação gráfica aprimorada permite uma análise mais clara das relações entre os municípios dentro de cada grupo, contribuindo para a identificação de padrões e tendências relevantes na formação dos consórcios.

Nesta seção, serão apresentados alguns resultados gráficos dos grupos formados. A análise de todos os 27 gráficos elaborados pelo autor pode ser feita nos Apêndice C desta tese.

A Figura 4.6 apresenta o gráfico tridimensional do grupo de proximidade Grupo1, composto pelo município central Lastro e os municípios adjacentes Vieirópolis, São Francisco e

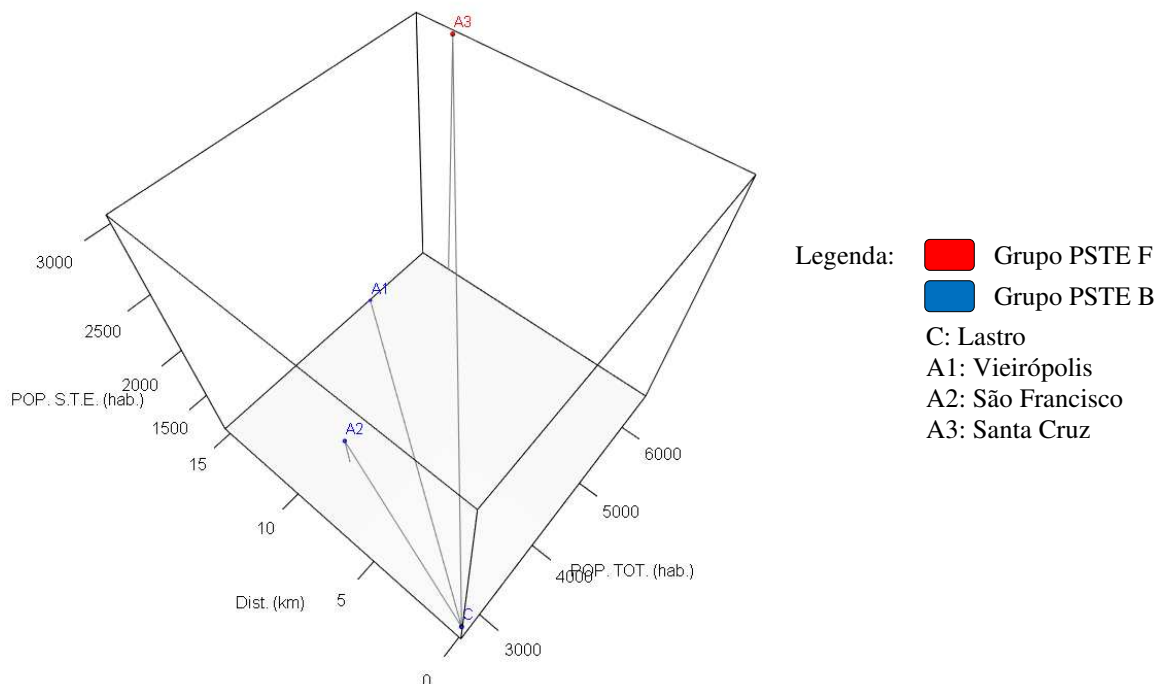
Santa Cruz. O município central e os municípios de Vieirópolis e São Francisco estão contidas no Grupo PSTE B, o qual possui PSTE de 2.705 a 3.878 hab. O município de Santa Cruz está contido no Grupo PSTE F, o qual uniu os municípios com PSTE de 27 a 1.377 hab.

Como informação importante extraída da Figura 4.6, pode-se explicitar quatro vertentes de cenários de planejamento para a formação de consórcio desse grupo, são eles:

- a) O mais conservador o qual indica que só os municípios C, A1 e A2 podem formar consórcio com a mesma tecnologia de tratamento de esgoto;
- b) O de abrangência média o qual aduz que C, A1, A2 e A3 podem formar consórcio, mas A3 irá ter solução de tratamento de esgoto diferente das demais;
- c) O mais abrangente o qual exprime que C, A1, A2 e A3 poderão formar consórcio e que a solução de tratamento de esgoto a ser proposta para todas os municípios devem seguir as condições para atender o município de maior PSTE, ou seja A3, e consequentemente deve atender as de menores PSTE; e
- d) O de centralização, o qual propõe que todos os municípios adjacentes do grupo exportam o esgoto gerado para um município central, o qual será responsável por realizar o tratamento de esgoto de todos os consorciados. Nesse arranjo, o município central deve possuir infraestrutura e tecnologia adequadas para atender as demandas de todos os participantes do consórcio.

A vertente a ser definida deve ser analisada em etapa posterior a essa de planejamento proposta por esta tese, claro que atribuindo os demais fatores intervenientes na escolha de uma estação de tratamento de esgoto sustentável.

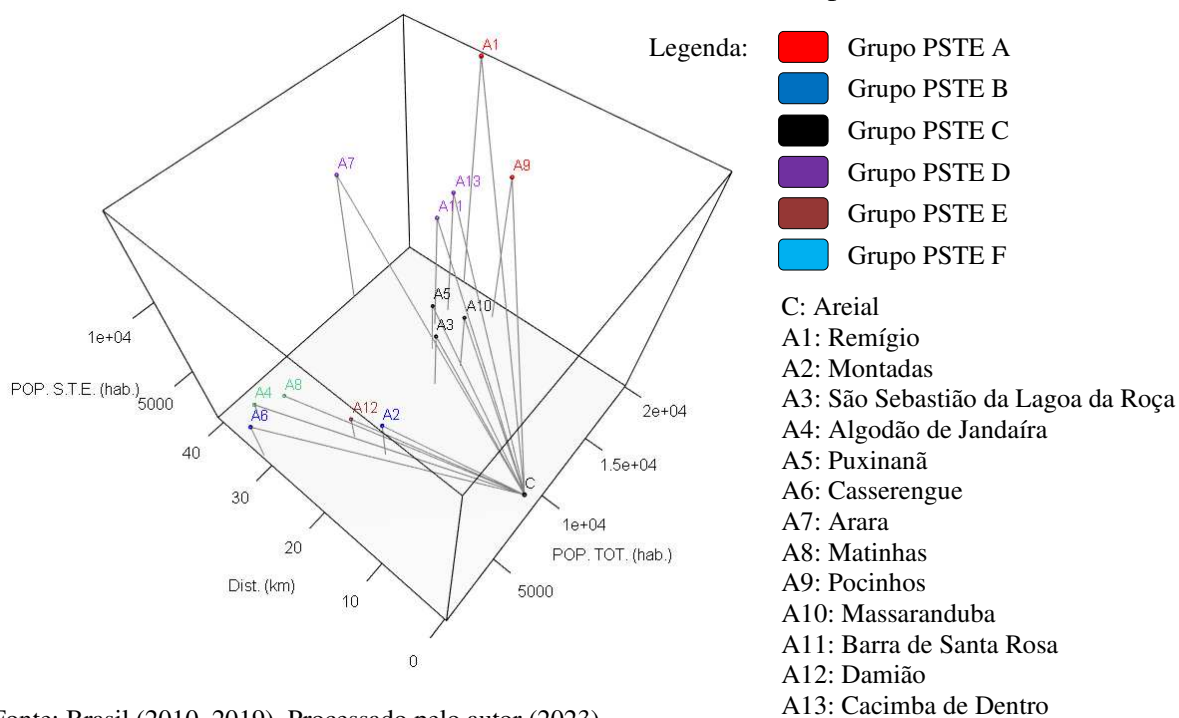
Figura 4.6 - Gráfico tridimensional do grupo de proximidade Grupo1.



Fonte: Brasil (2010, 2019). Processado pelo autor (2023).

De maneira análoga à Figura 4.6, a Figura 4.7 apresenta o gráfico tridimensional do Grupo2, o qual possui um município central e 13 municípios adjacentes.

Figura 4.7 - Gráfico tridimensional do grupo de proximidade Grupo2.



Fonte: Brasil (2010, 2019). Processado pelo autor (2023).

Assim como as análises feitas a partir da Figura 4.6, pode-se estabelecer alguns cenários de planejamento para o Grupo2, ao auferir informações da Figura 4.7:

- a) O mais conservador o qual indica que só os municípios C, A3, A5 e A10 podem formar consórcio;
- b) O de abrangência média o qual aduz que C, A1 a A13 podem formar consórcio, mas A1 e A9, A2 e A6, C, A3, A5 e A10, A7, A11 e A13, irão ter soluções de tratamento de esgoto diferentes entre si, e;
- c) O mais abrangente o qual exprime que C, A1 a A13 poderão formar consórcio e que a solução de tratamento de esgoto a ser proposta para todas os municípios devem seguir as condições para atender o município de maior PSTE, ou seja A1, e conseqüentemente deve atender as de menores PSTE.
- d) O de centralização, o qual propõe que todos os municípios adjacentes do grupo exportam o esgoto gerado para um município central, o qual será responsável por realizar o tratamento de esgoto de todos os consorciados. Nesse arranjo, o município central deve possuir infraestrutura e tecnologia adequadas para atender as demandas de todos os participantes do consórcio.

Em suma, a análise dos gráficos tridimensionais e a identificação das vertentes de cenários de planejamento possibilitam uma abordagem visual para a formação dos consórcios de municípios próximos.

4.4.5.1 Análise dos cenários-resultados

A partir dos resultados dos agrupamentos definidos, três cenários de formação de consórcios são propostos, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens. Esses cenários consideram tanto a complexidade dos arranjos institucionais quanto as especificidades técnicas necessárias para garantir a eficiência no tratamento de esgoto. Foram analisadas as vantagens e desvantagens de cada cenário. A mesma forma de análise pode ser replicada para todos os grupos formados.

- Cenário 1: Conservador

Definição: Apenas o município central (Lastro) e os municípios adjacentes Vieirópolis (A1) e São Francisco (A2) formariam o consórcio, utilizando a mesma tecnologia de tratamento

de esgoto.

Vantagens:

- Uniformidade tecnológica: A utilização de um único arranjo de tratamento de esgoto simplifica a gestão e a operação do sistema.

- Facilidade de implementação: Menor número de municípios envolvidos facilita a coordenação e a tomada de decisões.

- Menores custos operacionais: Redução de custos com treinamento e manutenção, devido à padronização dos processos.

Desvantagens:

- Exclusão de municípios com necessidades diferentes: O município de Santa Cruz (A3), com uma PSTE significativamente maior, fica de fora do consórcio, o qual terá de enfrentar o desafio da universalização de outras formas.

- Perda de economias de escala: O consórcio menor pode não aproveitar plenamente as vantagens econômicas de operar em maior escala.

- Cenário 2: Abrangência média

Definição: Lastro, Vieirópolis (A1), São Francisco (A2) e Santa Cruz (A3) formariam o consórcio, com Santa Cruz utilizando uma solução de tratamento de esgoto diferente das demais.

Vantagens:

- Inclusão de todos os municípios: Todos os municípios do grupo são considerados, aumentando a abrangência do consórcio.

- Flexibilidade tecnológica: Permitir diferentes arranjos pode ser mais adequado às necessidades específicas de cada município.

- Potencial para economias de escala: Inclui mais municípios, aumentando a possibilidade de redução de custos por economia de escala.

Desvantagens:

- Complexidade operacional: A gestão de diferentes tecnologias de tratamento pode ser mais complexa e exigir maior coordenação.

- Custos de implementação variáveis: Investimentos iniciais podem ser maiores devido à necessidade de diferentes infraestruturas de tratamento.

- Cenário 3: Mais abrangente

Definição: Lastro, Vieirópolis (A1), São Francisco (A2) e Santa Cruz (A3) formariam o consórcio, com todos os municípios adotando a tecnologia necessária para atender Santa Cruz, que possui a maior PSTE.

Vantagens:

- Uniformidade tecnológica: Todos os municípios adotam a mesma tecnologia, facilitando a gestão do sistema.
- Inclusão e universalização: Garante que mesmo o município com maior PSTE seja atendido, promovendo a universalização do saneamento.
- Economias de escala: Potencial para maiores economias de escala, devido ao maior número de municípios no consórcio.

Desvantagens:

- Sobrecarga tecnológica: Adotar uma tecnologia avançada para todos os municípios pode resultar em custos desnecessários para aqueles com menores PSTE.
- Desafios de implementação: Implementar uma solução única para todos pode ser mais complexo e caro no curto prazo.

- Cenário 4: Centralização de ETEs

Neste cenário, os municípios adjacentes exportam seu esgoto para um município central que realiza o tratamento de esgoto para todas elas. Por exemplo, Lastro seria o município central que receberia o esgoto dos municípios adjacentes Vieirópolis (A1), São Francisco (A2) e Santa Cruz (A3) para tratamento.

Vantagens:

- Economias de escala: Centralizar o tratamento em uma única ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) pode resultar em economias de escala, reduzindo os custos operacionais e de manutenção.
- Eficiência técnica: Uma única ETE centralizada pode ser mais eficiente tecnicamente, com maior capacidade de implementar tecnologias avançadas de tratamento.
- Simplificação da gestão: A gestão e operação de uma única ETE é mais simples e direta, facilitando a supervisão e o controle da qualidade do efluente tratado.
- Redução de custos de treinamento: Com uma única tecnologia em um único local, os custos com treinamento de pessoal são reduzidos.

Desvantagens:

- Custos de transporte: O transporte de esgoto dos municípios adjacentes para o município

central pode ser caro e complexo, exigindo investimentos significativos em infraestrutura de recalque e tubulação.

- Riscos de centralização: A centralização aumenta os riscos de falhas sistêmicas. Se a ETE central apresentar problemas, todos os municípios consorciados serão impactados.

- Dependência do município central: Os municípios adjacentes ficam dependentes do município central para o tratamento de esgoto, o que pode gerar desafios políticos e administrativos.

- Complexidade na implementação inicial: A construção de uma infraestrutura de transporte de esgoto e uma ETE central de grande capacidade pode ser complexa e exigir um alto investimento inicial.

- Concentração de empregos e reuso: A centralização da ETE gera oportunidades de emprego e de reuso de subprodutos apenas no município sede.

Ao analisar as vantagens e desvantagens dos cenários propostos, considerando o contexto específico dos municípios de pequeno porte do semiárido, o Cenário 3 se destaca como o mais promissor. Esse cenário combina a uniformidade tecnológica, que facilita a gestão e operação, com a inclusão e universalização do saneamento, atendendo às necessidades do município com maior PSTE sem excluir os demais. Além disso, o potencial para economias de escala é maximizado, proporcionando redução de custos operacionais no longo prazo. Embora a implementação inicial possa ser mais desafiadora e envolver custos um pouco mais elevados que o cenário 1 e 2, os benefícios em termos de eficiência técnica, abrangência e sustentabilidade justificam sua escolha como a alternativa mais equilibrada e viável para a realidade local. Assim, o Cenário 3 representa a melhor estratégia para promover um tratamento de esgoto eficiente e inclusivo, alinhado aos princípios de sustentabilidade e universalização do saneamento.

A definição da vertente a ser adotada deve ser feita em etapas posteriores, levando em consideração os fatores intervenientes na escolha de uma estação de tratamento de esgoto sustentável. Isso inclui análise de custos, viabilidade técnica, impactos sociais e econômicos, além de consultas e negociações com os gestores municipais e atores envolvidos. A decisão final deve buscar um equilíbrio entre eficiência técnica, viabilidade econômica e inclusão social, garantindo a sustentabilidade e a universalização do saneamento nos municípios consorciados.

4.5 DISCUSSÃO DOS FATORES AMBIENTAIS, ECONÔMICOS E SOCIAIS DO CONSORCIAMENTO DE MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE

A análise do consorciamento de municípios de pequeno porte para o tratamento de esgoto, considerando as particularidades da região do semiárido brasileiro, revela desafios significativos que precisam ser ponderados para a viabilidade de uma implementação eficaz.

Em primeiro lugar, a capacidade pagadora limitada desses municípios constitui um obstáculo considerável. Com uma base econômica restrita e uma arrecadação tributária insuficiente, os investimentos iniciais necessários para a infraestrutura de consórcio podem ser difíceis de viabilizar sem apoio financeiro externo, seja por meio de subsídios governamentais, parcerias público-privadas ou financiamentos internacionais. A capacidade de atrair e gerir tais recursos é, portanto, fundamental para a sustentabilidade financeira dos consórcios.

Adicionalmente, a gestão administrativa enfrenta desafios substanciais devido ao reduzido efetivo de servidores qualificados em muitos desses municípios. A falta de pessoal técnico capacitado pode levar a ineficiências na operação e manutenção das infraestruturas de tratamento de esgoto, bem como na administração financeira e organizacional do consórcio. Para superar essas limitações, é essencial investir em programas de capacitação e treinamento contínuo, de modo a preparar os servidores municipais para lidar com os complexos aspectos técnicos e administrativos envolvidos. Em paralelo a isso, pode ser pensada em uma entidade jurídica de gestão do consórcio, tal como ocorre em diversos consórcios da área de saneamento.

Politicamente, o consorciamento requer uma harmonização entre diferentes administrações municipais, o que pode ser desafiador. Divergências políticas e desigualdade de poder entre os municípios envolvidos podem dificultar a tomada de decisões e a implementação de políticas. A criação de um marco regulatório claro e a promoção de uma governança colaborativa são essenciais para evitar conflitos e garantir que todos os municípios se beneficiem equitativamente do consórcio.

Ambientalmente, o transporte de esgoto entre municípios implica riscos de vazamentos e poluição ao longo das rotas de transporte, além da necessidade de garantir que as tecnologias de tratamento sejam adaptadas ao contexto local do semiárido brasileiro. A centralização do tratamento de esgoto em uma estação eficiente pode, no entanto, reduzir significativamente a poluição dos corpos d'água locais e melhorar a qualidade ambiental.

Economicamente, os custos iniciais de implementação da infraestrutura necessária podem ser elevados, representando um ônus significativo para municípios de pequeno porte. A sustentabilidade financeira a longo prazo depende de uma gestão eficiente dos custos operacionais e de manutenção. O consorciamento permite a obtenção de economias de escala, reduzindo os custos por município e aumentando a capacidade de atrair financiamento e recursos de programas estaduais e federais.

Socialmente, a aceitação pública do consorciamento é crucial para o seu sucesso. Pode haver resistência da comunidade devido a preocupações com o transporte de esgoto e mudanças nas tarifas de saneamento. Garantir a equidade no atendimento é fundamental para que todos os municípios, independentemente do tamanho e capacidade econômica, tenham acesso aos benefícios do consórcio. O tratamento adequado do esgoto reduz a incidência de doenças de veiculação hídrica, melhorando a saúde pública e a qualidade de vida da população.

Adicionalmente, a sustentabilidade dos consórcios intermunicipais deve considerar a mobilização e o engajamento da comunidade. A participação ativa da população na tomada de decisões e na gestão dos recursos pode fortalecer a transparência e a responsabilização, além de aumentar a aceitação e o suporte para o consórcio. Programas de educação e sensibilização sobre os benefícios do tratamento adequado de esgoto podem ajudar a construir um apoio comunitário robusto.

Dessa forma, o consorciamento de municípios de pequeno porte para o tratamento de esgoto apresenta uma oportunidade valiosa para promover a sustentabilidade e o desenvolvimento regional, mas exige uma abordagem integrada que considere as limitações financeiras, a necessidade de capacitação técnica, a harmonização política e a mobilização comunitária. Uma estratégia bem planejada e executada pode superar os desafios e maximizar os benefícios, melhorando a qualidade de vida e promovendo a sustentabilidade ambiental e econômica dos municípios envolvidos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

As considerações finais desta pesquisa reafirmam a relevância do desenvolvimento de um modelo conceitual estratégico para a implementação de soluções sustentáveis de tratamento de esgoto em municípios de pequeno porte do semiárido brasileiro, focando na aplicação prática em consórcios intermunicipais no estado da Paraíba. Através da análise bibliométrica, foi possível identificar as tecnologias de tratamento de esgoto mais promissoras e sustentáveis, destacando aquelas aplicáveis em regiões semiáridas.

A análise bibliométrica das produções científicas permitiu a identificação das tecnologias mais sustentáveis para o tratamento de esgoto, confirmando a hipótese de que a análise bibliométrica pode destacar tecnologias promissoras para climas semiáridos (Hipótese 1).

A avaliação da correlação de termos dos documentos pesquisados se mostrou ferramenta capaz de mostrar a aplicabilidade dessas tecnologias em climas semiáridos (Hipótese 2).

A formulação do modelo conceitual de planejamento estratégico, com base em consórcios de municípios de pequeno porte, mostrou-se uma estratégia pertinente para otimização de recursos e melhoria da eficiência no tratamento de esgoto. A aplicação desse modelo aos municípios de pequeno porte do estado da Paraíba resultou em agrupamentos consorciáveis eficientes – no contexto de pressupostos desta tese -, validando a hipótese de que a formação de consórcios regionais é uma solução viável (Hipótese 3 e Hipótese 4).

Do ponto de vista prático, o modelo proposto oferece um norte para gestores públicos e planejadores urbanos, facilitando a tomada de decisões para o esgotamento sanitário. Teoricamente, esta pesquisa avança o conhecimento na área de saneamento e sustentabilidade, fornecendo uma abordagem integrada para a gestão colaborativa de sistemas de esgotamento sanitário.

Para a sociedade, especialmente para os gestores públicos e planejadores urbanos, os resultados oferecem uma base sólida para a formação de consórcios intermunicipais, otimizando recursos e melhorando a eficiência no tratamento de esgoto em municípios de pequeno porte. Isso pode resultar em melhorias significativas na saúde pública e na qualidade de vida das populações afetadas.

Para a academia, os métodos e análises empregados no estudo servem como referência para pesquisas futuras e para o desenvolvimento de novas abordagens na gestão de saneamento básico. A utilização de técnicas como o k-means e a visualização tridimensional dos dados pode ser aplicada em outros contextos, enriquecendo o campo de estudo e proporcionando novas

oportunidades de pesquisa.

Apesar das contribuições significativas, esta pesquisa apresenta algumas limitações. Primeiramente, a análise se baseou em dados disponíveis e pode não refletir todas as variáveis relevantes, como aspectos políticos, econômicos e sociais que influenciam a formação de consórcios. Também, a implementação do modelo conceitual foi limitada aos municípios de pequeno porte e do estado da Paraíba. O modelo pode não se aplicar com eficácia em estados que possuam municípios muito distantes entre si. Além disso, a implementação prática das soluções propostas necessita de estudos de viabilidade mais detalhados.

Recomenda-se que pesquisas futuras realizem estudos de viabilidade para a formação de consórcios de municípios com base nos grupos identificados, considerando aspectos políticos, sociais, econômicos e logísticos. Analisar os desafios e benefícios da cooperação entre diferentes municípios na gestão e implantação de sistemas de tratamento de esgoto pode complementar e expandir o conhecimento nesta área, contribuindo para soluções mais eficazes e sustentáveis. Também, é possível ampliar a limitação espacial para todos os estados brasileiros e ainda municípios de maior porte e avaliar a viabilidade de aplicação do modelo.

Em síntese, esta pesquisa demonstra que a implementação de consórcios regionais de tratamento de esgoto é uma abordagem viável e promissora para promover a sustentabilidade e a melhoria da qualidade de vida nos municípios de pequeno porte do semiárido brasileiro. O modelo conceitual desenvolvido tem o potencial de servir como um guia teórico e prático na formulação de políticas públicas de saneamento, contribuindo significativamente para o desenvolvimento sustentável da região.

REFERÊNCIAS

- ABDERRAZZAQ, B. *et al.* Impacts of Anthropogenic Factors on the Groundwater Ecosystem of Fezouata in South-East of Morocco. *Journal of Ecological Engineering*, v. 23, n. 5, p. 30–43, 1 maio 2022.
- ABDOULKADER, B. A. *et al.* Wastewater use in agriculture in Djibouti: Effectiveness of sand filtration treatments and impact of wastewater irrigation on growth and yield of *Panicum maximum*. *Ecological Engineering*, v. 84, p. 607–614, nov. 2015.
- ACHAG, B.; MOUHANNI, H.; BENDOU, A. Improving the performance of waste stabilization ponds in an arid climate. *Journal of Water and Climate Change*, v. 12, n. 8, p. 3634–3647, 1 dez. 2021a.
- _____. Improving the performance of waste stabilization ponds in an arid climate. *Journal of Water and Climate Change*, v. 12, n. 8, p. 3634–3647, 1 dez. 2021b.
- _____. Performance of municipal waste stabilization ponds in the Saharan desert (Morocco). *Journal of Water and Climate Change*, v. 14, n. 6, p. 1741–1761, 1 jun. 2023.
- ADIMALLA, N.; QIAN, H. Evaluation of non-carcinogenic causing health risks (NCHR) associated with exposure of fluoride and nitrate contaminated groundwater from a semi-arid region of south India. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 34, p. 81370–81385, 4 jul. 2022.
- AFONSO, R. A. , V. C. G. E A. Á. *et al.* DENDROIDH: AGRUPANDO CIDADES POR SEMELHANÇA DE INDICADORES XV Congresso Brasileiro de Informática em Saúde. Anais...Goiânia - GO: 27 nov. 2016
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas. Brasília - DF: [s.n.].
- ALRESHEEDI, M. T. *et al.* Sustainability of a Low-Cost Decentralized Treatment System for Wastewater Reuse: Resident Perception-Based Evaluation for Arid Regions. *Water*, v. 15, n. 19, p. 3458, 30 set. 2023.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959–975, nov. 2017.
- BACHI, O. E. *et al.* Wastewater Treatment Performance of Aerated Lagoons, Activated Sludge and Constructed Wetlands under an Arid Algerian Climate. *Sustainability*, v. 14, n. 24, p. 16503, 9 dez. 2022.
- BARKOUCH, Y. *et al.* Study of filter height effect on removal efficiency of Cd, Cu, Pb and Zn from contaminated water by slow sand filtration. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, v. 161, p. 337–342, 2019.
- BECK, S. E. *et al.* Woven-Fiber Microfiltration (WFMF) and Ultraviolet Light Emitting Diodes (UV LEDs) for Treating Wastewater and Septic Tank Effluent. *Water*, v. 13, n. 11, p. 1564, 31 maio 2021.
- BEKKARI, N. E.; AMIRI, K.; HADJOUJ, M. Performance of pilot scale constructed wetland as ecological practice for domestic wastewater treatment in an arid climate – Algeria. *Water Science and Technology*, v. 86, n. 4, p. 787–799, 15 ago. 2022.
- BOUHOUM, K.; AMAHMID, O.; ASMAMA, S. Occurrence and removal of protozoan cysts and helminth eggs in waste stabilisation ponds in Marrakech. *Water Science and Technology*, v. 42, n. 10–11, p. 159–164, 1 nov. 2000.
- BRASIL. Estruturação e Implementação de Consórcios Públicos de Saneamento. Brasília, DF: [s.n.].
- _____. Lista de Municípios Brasileiros e Informações Adicionais.
- _____. SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2019/Diagnostico-SNIS-AE-2019-Capitulo-06.pdf>: [s.n.].
- _____. ROTEIRO PARA IMPLEMENTAÇÃO DE CONSÓRCIOS PÚBLICOS DE MANEJO DE RSU. Brasília, DF: [s.n.].
- _____. Mapeamento dos consórcios públicos brasileiros 2023. Brasília: [s.n.].
- CASTRO, L. M. A. Proposição de Metodologia para a Avaliação dos Efeitos da Urbanização nos Corpos de Água. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- CHAABANE, S. *et al.* Investigation of mechanisms of an upflow-downflow siliceous sand filtration system for surfactants bathroom grey water treatment. *Water Science and Technology*, v. 86, n. 12, p. 3181–3194, 15 dez. 2022.
- CHAOUA, S. *et al.* Efficiency of two sewage treatment systems (activated sludge and natural lagoons) for helminth egg removal in Morocco. *Journal of Infection and Public Health*, v. 11, n. 2, p. 197–202,

mar. 2018.

CHENG, T. *et al.* Monitoring Influent Measurements at Water Resource Recovery Facility Using Data-Driven Soft Sensor Approach. *IEEE Sensors Journal*, v. 19, n. 1, p. 342–352, 1 jan. 2019.

CHERNICHARO, C.; MOTA, C. A recuperação de recursos a partir do tratamento de esgoto pode impulsionar o setor de saneamento? III Seminário Internacional de Soluções Baseadas na Natureza (SbN). *Anais...Brasília: 2020*

CHHIPI-SHRESTHA, G.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. Fit-for-purpose wastewater treatment: Conceptualization to development of decision support tool (I). *Science of The Total Environment*, v. 607–608, p. 600–612, dez. 2017.

CHRISPIM, M. C.; SCHOLZ, M.; NOLASCO, M. A. Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries. *Journal of Environmental Management*, v. 248, p. 109268, out. 2019.

DAEE, M.; GHOLIPOUR, A.; STEFANAKIS, A. I. Performance of pilot Horizontal Roughing Filter as polishing stage of waste stabilization ponds in developing regions and modelling verification. *Ecological Engineering*, v. 138, p. 8–18, nov. 2019.

DALMO, F. C. *et al.* Energy recovery from municipal solid waste of intermunicipal public consortia identified in São Paulo State. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, v. 37, n. 3, p. 301–310, 26 mar. 2019.

DATTA, A. *et al.* Constructed wetland for improved wastewater management and increased water use efficiency in resource scarce SAT villages: a case study from Kothapally village, in India. *International Journal of Phytoremediation*, v. 23, n. 10, p. 1067–1076, 24 ago. 2021.

DIAS, S. *et al.* Livestock Wastewater Treatment in Constructed Wetlands for Agriculture Reuse. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 22, p. 8592, 19 nov. 2020.

DOMHOLDT, E. *Rehabilitation research: principles and applications* Elsevier Saunders. *Anais...Missouri: 2005*

ECK, N. J. VAN; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, v. 84, n. 2, p. 523–538, 31 ago. 2010.

EL-MANDOUH, A. M. *et al.* Optimized K-Means Clustering Model based on Gap Statistic. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, v. 10, n. 1, 2019.

FÁVERO, L. P. *et al.* Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FERREIRA, C. F. A.; JUCÁ, J. F. T. Metodologia para avaliação dos consórcios de resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 22, n. 3, p. 513–521, maio 2017.

FIELD, J. P.; FARRELL-POE, K. L.; WALWORTH, J. L. Comparative Treatment Effectiveness of Conventional Trench and Seepage Pit Systems. *Water Environment Research*, v. 79, n. 3, p. 310–319, mar. 2007.

FONTANELLA, B. J. B. *et al.* Amostragem em pesquisas qualitativas: proposta de procedimentos para constatar saturação teórica. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/csp/a/3bsWNzMMdvYthrNCXmY9kJQ/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 22 maio. 2023.

FREIRE, R. C. *et al.* Avaliação de sustentabilidade para estações de tratamento de esgoto: uma revisão bibliométrica. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 61, p. 161–162, jan. 2023.

FUCHS, A. G. P. *et al.* SANEAMENTO NA AMÉRICA LATINA: PANORAMA DAS TRAJETÓRIAS INSTITUCIONAL E DO NÍVEL DOS SERVIÇOS DE ÁGUA E ESGOTO NA BOLÍVIA, NO CHILE, NO MÉXICO E NO PERU. Rio de Janeiro: [s.n.].

GABR, M. E. *et al.* Floating Wetlands for Sustainable Drainage Wastewater Treatment. *Sustainability*, v. 14, n. 10, p. 6101, 17 maio 2022.

GHOLIPOUR, A.; STEFANAKIS, A. I. A full-scale anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland for university dormitory wastewater treatment and reuse in an arid and warm climate. *Ecological Engineering*, v. 170, p. 106360, nov. 2021.

HAIR, F. J. *et al.* Análise multivariada de dados. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HDIDOU, M. *et al.* Potential Use of Constructed Wetland Systems for Rural Sanitation and Wastewater Reuse in Agriculture in the Moroccan Context. *Energies*, v. 15, n. 1, p. 156, 27 dez. 2021.

HERRERA-LÓPEZ, D. *et al.* SISTEMA ACOPLADO REACTOR ANAEROBIO CON DEFLECTORES-HUMEDAL ARTIFICIAL COMO ALTERNATIVA PARA REÚSO DE AGUA RESIDUAL EN RIEGO DE ÁREAS VERDES. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 13 maio 2021.

HOPHMAYER-TOKICH, S.; KLIOT, N. Inter-municipal cooperation for wastewater treatment: Case studies from Israel. *Journal of Environmental Management*, v. 86, n. 3, p. 554–565, fev. 2008.

HUTTON, G.; HALLER, L. Evaluation of the costs and benefits of water and sanitation improvements at the global level. Geneva: [s.n.].

IRIBARNEGARAY, M. A. *et al.* Management challenges for a more decentralized treatment and reuse of domestic wastewater in metropolitan areas. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, v. 8, n. 1, p. 113–122, 1 mar. 2018.

JAJAC, N. *et al.* Decision Support Concept to Selection of Wastewater Treatment Plant Location—the Case Study of Town of Kutina, Croatia. *Water*, v. 11, n. 4, p. 717, 6 abr. 2019.

JASSAL, S. *et al.* Sustainable Waste Water Treatment: Opportunities and Challenges. *Environmental Sciences*, 2023.

JILALI, A.; ZARHLOULE, Y.; GEORGIADIS, M. Vulnerability mapping and risk of groundwater of the oasis of Figuig, Morocco: application of DRASTIC and AVI methods. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 8, n. 3, p. 1611–1621, 27 mar. 2015.

JIN, R.; YUAN, H.; CHEN, Q. Science mapping approach to assisting the review of construction and demolition waste management research published between 2009 and 2018. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 140, p. 175–188, jan. 2019.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 4. ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

JORGE, M. F. *et al.* Biological pilot treatment reduces physicochemical and microbiological parameters of dairy cattle wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 12, p. 34775–34792, 15 dez. 2022.

KACPRZAK, M. J.; KUPICH, I. The specificities of the circular economy (CE) in the municipal wastewater and sewage sludge sector—local circumstances in Poland. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 4 ago. 2021.

KAETZL, K. *et al.* On-farm wastewater treatment using biochar from local agroresidues reduces pathogens from irrigation water for safer food production in developing countries. *Science of The Total Environment*, v. 682, p. 601–610, set. 2019.

KALBAR, P. P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R. Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *Journal of Environmental Management*, v. 113, p. 158–169, dez. 2012.

KAMMOUN, A. *et al.* Enhancing pollutant removal efficiency in urban domestic wastewater treatment through the hybrid multi-soil-layering (MSL) system: A case study in Morocco. *Water Science & Technology*, v. 89, n. 10, p. 2685–2702, 15 maio 2024.

KHAJVAND, M. *et al.* Management of greywater: environmental impact, treatment, resource recovery, water recycling, and decentralization. *Water Science and Technology*, v. 86, n. 5, p. 909–937, 1 set. 2022.

KITCHNHAN, B. A. Procedures for performing systematic reviews. [s.l.: s.n.].

KUNG, C. H. Conceptual Modeling in the Context of Development. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. 15, n. 10, p. 1176–1187, out. 1989.

LAW, M.; PHILP, I. Systematically reviewing the evidence. *Em: Evidence-based rehabilitation: a guide to practice*. Thorofare (NJ): SLACK Inc., 2002. .

LENART-BORON, A. *et al.* The effect of a Sewage Treatment Plant modernization on changes in the microbiological and physicochemical quality of water in the receiver. *Archives of Environmental Protection*, v. 45, n. 2, 2019.

LEONETI, A. B. Teoria dos jogos e sustentabilidade na tomada de decisão: aplicação a sistemas de tratamento de esgoto. [s.l.] Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

LI, X. *et al.* Application of constructed wetlands in treating rural sewage from source separation with high-influent nitrogen load: a review. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 37, n. 8, p. 138, 19 ago. 2021.

LLOYD, S. Least squares quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 28, n. 2, p. 129–137, mar. 1982.

MAHLKNECHT, J. *et al.* Groundwater Flow Processes and Human Impact along the Arid US-Mexican Border, Evidenced by Environmental Tracers: The Case of Tecate, Baja California. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 15, n. 5, p. 887, 30 abr. 2018.

MAKISHA, N.; GEORGINA, E. Scientific approach and practical experience for reconstruction of waste water treatment plants in Russia CONFERENCE ON ADVANCED IN ENERGY SYSTEMS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING (ASEE). Anais...Poland: 2017

MAKROPOULOS, C. K. *et al.* Decision support for sustainable option selection in integrated urban

water management. *Environmental Modelling & Software*, v. 23, n. 12, p. 1448–1460, dez. 2008.

MANFIO, D. V.; TONETTI, A. L.; MATTA, D. Dewatering of septic tank sludge in alternative sludge drying bed. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, v. 8, n. 4, p. 792–798, 1 dez. 2018.

MARANGON, B. B. *et al.* Reuse of treated municipal wastewater in productive activities in Brazil's semi-arid regions. *Journal of Water Process Engineering*, v. 37, p. 101483, out. 2020.

MARQUES, M. DA S. *et al.* Análise bibliométrica sobre o uso de água residuária na agricultura. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 3, p. e30311326105, 22 fev. 2022.

MARTIKAINEN, K. *et al.* Treatment of Domestic Wastewater in Small-Scale Sand Filters Fortified with Gypsum, Biotite, and Peat. *Sustainability*, v. 15, n. 2, p. 1351, 11 jan. 2023.

MESACASA, L. *et al.* WETLANDS CONSTRUÍDOS: UMA ALTERNATIVA DE TECNOLOGIA LIMPA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS 21 nov. 2022 Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2022/IX-008.pdf>>

METCALF, L.; EDDY, H. P. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MEZRIOUI, N. *et al.* Effect of microalgae growing on wastewater batch culture on escherichia coli and vibrio cholerae survival. *Water Science and Technology*, v. 30, n. 8, p. 295–302, 1 out. 1994.

MEZRIOUI, N.; OUFDOU, KH. Abundance and antibiotic resistance of non-O1 *Vibrio cholerae* strains in domestic wastewater before and after treatment in stabilization ponds in an arid region (Marrakesh, Morocco). *FEMS Microbiology Ecology*, v. 21, n. 4, p. 277–284, dez. 1996.

MLIH, R. *et al.* Light-expanded clay aggregate (LECA) as a substrate in constructed wetlands – A review. *Ecological Engineering*, v. 148, p. 105783, abr. 2020.

MORIHAMA, A. C. D. Desenvolvimento de metodologia para o planejamento de modernização de estações de tratamento de esgoto. 29o CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE (AESABESP/FENASAN). Anais...São Paulo: 2018

NAJAFI, P.; TABATABAEI, S. H. Application of sand and geotextile envelope in subsurface drip irrigation. *AFRICAN JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY*, v. 9, n. 32, p. 5147–5150, 2010.

NETTO, J. C. S. Sistemas Descentralizados de Esgotamento Sanitário: Análise Bibliométrica da Produção Científica Brasileira no Período 2000-2018. São Cristóvão – SE: [s.n.].

NOTARO, V. *et al.* A Decision Support Tool for Water and Energy Saving in the Integrated Water System. *Procedia Engineering*, v. 119, p. 1109–1118, 2015.

NOYOLA, A. *et al.* Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. *CLEAN - Soil, Air, Water*, v. 40, n. 9, p. 926–932, set. 2012.

NOYOLA ROBLES, A. *et al.* Informe técnico final / Water and Sanitation : LAC Cities Adapting to Climate Change by Making Better Use of their Available Bioenergy Resources. <http://hdl.handle.net/10625/52761>: [s.n.].

OLIVEIRA CRUZ, L. M. DE; TONETTI, A. L.; GOMES, B. G. L. A. Association of septic tank and sand filter for wastewater treatment: full-scale feasibility for decentralized sanitation. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, v. 8, n. 2, p. 268–277, 1 jun. 2018.

OLIVEIRA, P. F. DE; GUERRA, S.; MCDONNELL, R. *Ciência de dados com R: Introdução*. Disponível em: <https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Ci%C3%AAncia%20de%20dados%20com%20R%3A%20Introdu%C3%A7%C3%A3o%20%28Data%20Science%20with%20R%3A%20Introduction%29&author=P.%20F.%20de.%20Oliveira&author=S.%20Guerra&author=R.%20McDonnell&publication_year=2018&book=Ci%C3%AAncia%20de%20dados%20com%20R%3A%20Introdu%C3%A7%C3%A3o%20%28Data%20Science%20with%20R%3A%20Introduction%29>. Acesso em: 6 jun. 2023.

OLIVEIRA, S. V. W. B. DE. Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, 10 nov. 2004.

PASTICH, E. A. *et al.* Structure and dynamics of the phytoplankton community within a maturation pond in a semiarid region. *Brazilian Journal of Biology*, v. 76, n. 1, p. 144–153, 22 jan. 2016.

PAULO, P. L. *et al.* Ferramentas de avaliação de sustentabilidade em sistemas de tratamento de esgotos descentralizados. *Em: SANTOS, A. (Ed.). Caracterização, Tratamento e Gerenciamento de Subprodutos de Correntes de Esgotos Segregadas e Não Segregadas em Empreendimentos Habitacionais*. Fortaleza-CE: IMPRECE, 2019. .

PINTO, G. O. *et al.* Trends in global greywater reuse: a bibliometric analysis. *Water Science and Technology*, v. 84, n. 10–11, p. 3257–3276, 15 nov. 2021.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD BRASIL). Relatório Anual. [s.l.: s.n.].

SAIDI, S.; BOURI, S.; DHIA, H. BEN. Groundwater management based on GIS techniques, chemical indicators and vulnerability to seawater intrusion modelling: application to the Mahdia–Ksour Essaf aquifer, Tunisia. *Environmental Earth Sciences*, v. 70, n. 4, p. 1551–1568, 6 out. 2013.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, v. 11, n. 1, p. 83–89, 2007.

SINN, J. *et al.* Characterization and evaluation of waste stabilization pond systems in Namibia. *H2Open Journal*, v. 5, n. 2, p. 365–378, 1 jun. 2022.

SPERLING, M. VON. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4a. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2014.

SPERLING, M. VON; CHERNICHARO, C. A. L. A comparison between wastewater treatment processes in terms of compliance with effluent quality criteria standards XXVII CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL. *Anais...Porto Alegre: 2000*

SPYCHAŁA, M. *et al.* Removal of Volatile Solids from Greywater Using Sand Filters. *Applied Sciences*, v. 9, n. 4, p. 770, 22 fev. 2019.

STEFANAKIS, A. Constructed Wetlands for Sustainable Wastewater Treatment in Hot and Arid Climates: Opportunities, Challenges and Case Studies in the Middle East. *Water*, v. 12, n. 6, p. 1665, 10 jun. 2020.

STOREY, V. C.; LUKYANENKO, R.; CASTELLANOS, A. Conceptual Modeling: Topics, Themes, and Technology Trends. *ACM Computing Surveys*, v. 55, n. 14s, p. 1–38, 31 dez. 2023.

SYLLA, A. Domestic wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with *Arundo donax*, and the intermittent sand filters impact. *Ecohydrology & Hydrobiology*, v. 20, n. 1, p. 48–58, jan. 2020.

U. S. CENSUS BUREAU GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS FAQ. GIS FAQ Q5.1: Great circle distance between 2 points.

ULLAH, A. *et al.* Development of a decision support system for the selection of wastewater treatment technologies. *Science of The Total Environment*, v. 731, p. 139158, ago. 2020.

ULSIDO, M. Performance evaluation of constructed wetlands: A review of arid and semi arid climatic region. v. 8, p. 99–106, jul. 2014.

UMARGONO, E.; SUSENO, J. E.; VINCENSIUS GUNAWAN, S. K. K-Means Clustering Optimization Using the Elbow Method and Early Centroid Determination Based on Mean and Median Formula Proceedings of the 2nd International Seminar on Science and Technology (ISSTEC 2019). *Anais...Paris, France: Atlantis Press, 2020* Disponível em: <<https://www.atlantispress.com/article/125944915>>

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis. Nova York - EUA: [s.n.].

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. USEPA Water Conservation Plan Guidelines. [s.l: s.n.].

VEENSTRA, S.; AL-NOZAILY, F. A.; ALAERTS, G. J. Purple non-sulfur bacteria and their influence on waste stabilisation pond performance in the Yemen Republic. *Water Science and Technology*, v. 31, n. 12, p. 141–149, 1 jun. 1995.

VELOUTSOU, C.; RUIZ MAFE, C. Brands as relationship builders in the virtual world: A bibliometric analysis. *Electronic Commerce Research and Applications*, v. 39, p. 100901, jan. 2020.

XUE, W. *et al.* Sea salt bittern-driven forward osmosis for nutrient recovery from black water: A dual waste-to-resource innovation via the osmotic membrane process. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, v. 14, n. 2, p. 32, 18 abr. 2020.

YANG, P. *et al.* Optimization and mechanism of coupling process between algal ponds and constructed wetlands for wastewater polishing and nutrient recovery. *Journal of Cleaner Production*, v. 389, p. 136057, fev. 2023.

YU, J. *et al.* Impact of loading rate and filter height on the retention factor in the model of total coliform (TC) removal in direct rapid sand filtration. *Desalination and Water Treatment*, v. 54, n. 1, p. 140–146, 3 abr. 2015.

ZANCAN, C.; PASSADOR, J. L.; PASSADOR, C. S. MODELOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA GESTÃO DE CONSÓRCIOS INTERMUNICIPAIS BRASILEIROS. *Revista Gestão e Desenvolvimento*, v. 20, n. 2, p. 80–123, 5 set. 2023.

ZHANG, D.-Q. *et al.* Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000–2013). *Journal of Environmental Sciences*, v. 30, p. 30–46, abr. 2015.

ZHANG, H. *et al.* A review on China’s constructed wetlands in recent three decades: Application and practice. *Journal of Environmental Sciences*, v. 104, p. 53–68, jun. 2021.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, v. 18, n. 3, p. 429–472, 22 jul. 2015.

APÊNDICE A

THESARUS FILE

label replace by
 activated sludge activated sludge system
 activated sludge treatment activated sludge system
 conventional activated sludge activated sludge system
 conventional activated sludge process activated sludge system
 sludge system
 activated sludge process activated sludge system
 circular economy sustainability
 life cycle assessment sustainability
 energy recovery sustainability
 environmental sustainability sustainability
 irrigation reuse sustainability
 potential reuse sustainability
 phosphorus recovery sustainability
 nutrient recovery sustainability
 sustainable development sustainability
 sustainable water treatment sustainability
 sustainable solution sustainability
 sustainable technology sustainability
 sustainable treatment sustainability
 sustainable wastewater treatment sustainability
 reuse application sustainability
 agricultural reuse sustainability
 unrestricted reuse sustainability
 wastewater reuse sustainability
 water resource recovery facility sustainability
 resource recovery sustainability
 water recovery sustainability
 reuse sustainability
 water reuse sustainability
 effluent reuse sustainability
 greywater reuse sustainability
 sustainable wastewater treatment system sustainability
 uasb reactor UASB
 uasb system UASB
 upflow anaerobic sludge blanket UASB
 anaerobic sludge blanket UASB
 flow anaerobic sludge blanket UASB
 upflow anaerobic sludge blanket reactor UASB
 facultative pond stabilization pond
 waste stabilisation pond stabilization pond
 waste stabilization pond stabilization pond
 wastewater stabilization pond stabilization pond
 pond system stabilization pond
 stabilization pond system stabilization pond
 aerated lagoon stabilization pond
 aeration tank stabilization pond
 maturation pond stabilization pond
 oxidation pond stabilization pond
 high rate algal pond oxidation ditch
 hrap oxidation ditch
 raceway pond reactor oxidation ditch
 wetlands wetland
 wetland plant wetland
 wetland system wetland
 wetland treatment system wetland
 vertical subsurface flow wetland
 subsurface horizontal flow wetland
 subsurface flow wetland wetland
 horizontal subsurface flow wetland
 treatment wetland wetland
 vertical flow wetland wetland
 artificial wetland wetland
 constructed wetland wetland
 constructed wetlands wetland
 duckweed duckweed pond
 mbr membrane bioreactor
 mbr membrane bioreactor
 mbr system membrane bioreactor
 bed biofilm reactor membrane bioreactor
 membrane bioreactor membrane bioreactor
 membrane filtration membrane bioreactor
 membrane technology membrane bioreactor
 submerged membrane bioreactor membrane bioreactor

anmbr membrane bioreactor
 anaerobic membrane bioreactor membrane bioreactor
 anaerobic filter anaerobic treatment
 anaerobic reactor anaerobic treatment
 sand filter sand filtration
 slow sand filter sand filtration
 slow sand filtration sand filtration
 cod removal remoção
 ammonia removal remoção
 e coli removal remoção
 fecal coliform removal remoção
 nitrogen removal remoção
 nutrient removal remoção
 nutrients removal remoção
 organic matter removal remoção
 p removal remoção
 phosphorus removal remoção
 tp removal remoção
 total nitrogen removal remoção
 tn removal remoção
 pathogen removal remoção
 operational cost custo
 energy cost custo
 high cost custo
 maintenance cost custo
 removal
 performace
 waste-water treatment
 waste-water
 wastewater treatment
 nitrogen
 systems
 system
 wastewater
 phosphorus
 ability
 absence
 abundance
 acceptable level
 access
 accordance
 account
 accumulation
 acetic acid
 acid
 acid mine drainage
 activated carbon
 activity
 adaptation
 addition
 additional treatment
 adoption
 adsorbent
 adsorption
 advanced treatment
 advantage
 adverse effect
 aeration
 age
 agricultural irrigation
 agricultural purpose
 agricultural wastewater
 agriculture
 air
 algae
 algal biomass
 alkalinity
 alternative
 alternative water source
 alum sludge
 aluminum
 ambient temperature
 amd
 ammonia
 ammonia nitrogen
 ammonium
 ammonium nitrogen
 amount
 anaerobic ammonium oxidation
 anaerobic condition

anaerobic digester
 anaerobic digestion
 anaerobic effluent
 analysis
 anammox
 animal
 antibiotic
 antibiotic resistance
 antibiotic resistance gene
 antibiotic resistant bacterium
 aop
 applicability
 application
 approach
 appropriate technology
 april
 aquaculture
 aquatic ecosystem
 aquatic environment
 aquatic plant
 aqueous solution
 aquifer
 area
 args
 arid region arid climate
 arsenic
 art
 article
 arundo
 arundo donax
 asp
 aspect
 assessment
 association
 attempt
 attention
 author
 autumn
 availability
 average
 average concentration
 average removal efficiency
 average removal rate
 average value
 bacterial community
 bacteriophage
 bacterium
 bacteroidetes
 barrier
 basis
 batch
 batch experiment
 batch reactor
 bed
 behavior
 beneficial reuse
 benefit
 best performance
 better performance
 better understanding
 biochar
 biochemical oxygen demand
 biodegradability
 biodegradation
 biofilm
 biofuel
 biogas
 biogas production
 biological oxygen demand
 biological process
 biological treatment
 biomass
 biomass production
 biomass productivity
 biomass yield
 bioreactor
 bioremediation
 biosolid
 biosorption
 black water

blackwater
bod
bod5
bottom
building
c n
c n ratio
caffeine
calcium
calculation
canna indica
capability
capacity
capital
carbamazepine
carbohydrate
carbon
carbon dioxide
carbon source
carrier
cas
case
case study
category
cathode
cell
cfd
cfu
ch4
challenge
change
characteristic
characterization
chemical
chemical oxygen demand
chemical precipitation
chlorination
chlorine
chlorophyll
choice
chromium
city
class
clay
clean water
climate
climate change
climatic condition
clostridium perfringens
co2
coagulant
coagulation
cod
cod removal efficiency
codcr
coefficient
coli
coliform
coliphage
collection
color
column
combination
combined system
community
comparative study
comparison
compartment
complete removal
complexity
compliance
component
composition
composting
compound
comprehensive review
computational fluid dynamic
concentration
concept
concern

condition
conductivity
configuration
consequence
conservation
consideration
constraint
construction
consumer
consumption
contact
contact time
contaminant
contamination
content
context
continuous flow
contrast
contribution
control
control strategy
conversion
copper
correlation
cost
country
coupling
criterion
critical review
crop
crop irrigation
crop yield
cryptosporidium
cultivation
current state
current status
current study
cw mfc
cw system
cws
cycle
cyst
data
date
day
day biochemical oxygen demand
decade
december
decision
decision maker
decrease
degradation
degree
degrees c
demand
denitrification
denitrification process
denitrifier
density
depletion
depth
desalination
design parameter
detail
detection
deterioration
determination
development
dhs
diclofenac
difference
difficulty
digestate
disadvantage
discharge
discharge standard
disease
disinfection
disposal
distribution

diversity
domestic sewage
domestic sewage treatment
domestic wastewater
domestic wastewater treatment
dosage
dose
drainage
drawback
drinking water
dry weight
dynamic
e coli
ease
economic analysis
economic feasibility
economy
ecosystem
ecosystem service
effect
effective removal
effectiveness
efficacy
efficiency
efficient removal
effluent
effluent concentration
effluent quality
effluent water
effluent water quality
effort
egg
electrical conductivity
electricity
electricity consumption
electron microscopy
element
elimination
emission
emphasis
end
energy
energy consumption
energy demand
energy production
energy saving
enhancement
enrichment
enterococci
environment
environmental benefit
environmental condition
environmental factor
environmental impact
environmental pollution
environmental protection
eps
escherichia coli
estimation
etc
ethanol
europe
eutrophication
evaluation
evaporation
evapotranspiration
evidence
evolution
example
exception
excess sludge
experience
experiment
experimental result
experimental study
exposure
extent
extracellular polymeric substance
facility
fact

factor	harvest	integrated system
faecal coliform	health	integration
faecal sludge	health risk	interaction
fao	heavy metal	interest
farm	hectare	investigation
farmer	height	investment
fate	helminth egg	ion exchange
feasibility	heterotrophic bacterium	iron
fecal coliform	hfcw	irrigation
fecal indicator bacterium	high	irrigation purpose
feed	high concentration	irrigation water
feedstock	high efficiency	issue
fertiliser	high level	january
fertilizer	high quality	july
field	high quality effluent	june
film	high quality water	key factor
filter	high rate	key role
filter medium	high removal	kg cod m
filtration	high removal efficiency	kind
final effluent	high strength wastewater	knowledge
first stage	higher concentration	knowledge gap
first time	highest removal efficiency	kwh m
fish	highlight	l m
flocculation	hhr	lab scale
flow	horizontal flow	laboratory
flow rate	hour	laboratory scale
flux	household	lack
focus	hrt	lagoon
fold	hrts	lake
food	hssf	land
food security	hssf cw	land application
food waste	hssf cws	landfill
form	human	landfill leachate
formation	human activity	landscape
fouling	human consumption	landscape irrigation
fraction	human health	large amount
framework	hybrid	large scale
free water surface	hybrid cw	large volume
frequency	hybrid system	last decade
fresh water	hydraulic load	latter
freshwater	hydraulic loading	laundry
freshwater resource	hydraulic loading rate	layer
fruit	hydraulic residence time	lca
full scale	hydraulic retention time	leachate
function	hydrolysis	lead
further research	hydroponic cultivation	leafe
further study	hydroponic system	legislation
further treatment	i e	lettuce
future	identification	level
future research	iii	life
fws	impact	life cycle
g l	impact category	light
g m	implementation	limestone
gap	implication	limit
gene	importance	limitation
generation	important factor	line
ghg	important role	liter
ghg emission	improvement	literature
giardia	inactivation	literature review
goal	incorporation	litre
good performance	increase	load
granular sludge	indicator	loading
gravel	indicator bacterium	loading rate
grease	industrial wastewater	location
great potential	industrialization	log
greece	industry	log unit
greenhouse	inflow	long term
greenhouse gas	influence	long term operation
greenhouse gas emission	influent	loss
grey water	influent concentration	lot
greywater	information	low concentration
greywater treatment	infrastructure	low cost
groundwater	inhabitant	low temperature
groundwater recharge	inhibition	m h
group	initial concentration	macrophyte
growth	inlet	magnitude
guideline	input	main aim
h2o2	insight	main objective
half	installation	main source
hand	instance	maintenance

major challenge
 majority
 management
 march
 mass balance
 mathematical model
 matter
 maximum
 mean
 measure
 measurement
 mechanism
 medium
 membrane
 metal
 methane
 methane production
 methane yield
 methodology
 mfc
 mg g
 mg kg
 mg l
 mg o
 mg l
 microalgae
 microbe
 microbial activity
 microbial community
 microbial community analysis
 microbial community structure
 microbial diversity
 microbial fuel cell
 microbial quality
 microbiological parameter
 microbiological quality
 microorganism
 micropollutant
 min
 mineralization
 mixed liquor
 mixing
 mixture
 mlss
 mode
 model
 modelling
 modification
 monitoring
 month
 month period
 morphology
 mpn
 mu g l
 mu m
 municipal wastewater
 municipal wastewater treatment
 municipal wastewater treatment plant
 municipality
 n nh4
 n2o
 n2o emission
 natural process
 natural resource
 natural system
 natural treatment system
 natural wetland
 nature
 near future
 necessity
 need
 negative effect
 negative impact
 neutral ph
 new technology
 ng l
 nh3 n
 nh4
 nh4 n
 nh4n
 nickel
 nitrate
 nitrate nitrogen
 nitrification
 nitrifier
 nitrogen removal efficiency
 no3
 no3 n
 no3n
 non potable purpose
 novel
 ntu
 number
 nutrient
 nutrient content
 nutrient solution
 observation
 occurrence
 october
 oil
 olr
 one
 operating condition
 operation
 operational condition
 operational parameter
 operator
 opportunity
 optimization
 optimum condition
 option
 order
 organic
 organic carbon
 organic compound
 organic load
 organic loading rate
 organic material
 organic matter
 organic micropollutant
 organic nitrogen
 organic pollutant
 organic waste
 organism
 origin
 ornamental plant
 orp
 outcome
 outflow
 outlet
 output
 overall performance
 overall removal efficiency
 overview
 oxidation
 oxygen
 ozonation
 ozone
 p australi
 pah
 paper
 parallel
 parameter
 parasite
 part
 particle
 particle size
 pathogen
 pathogen removal efficiency
 pathogenic microorganism
 pattern
 pcr
 percentage
 performance
 performance evaluation
 peri urban area
 period
 permissible limit
 person
 personal care product
 perspective
 pesticide
 pharmaceutical
 phase
 phenol
 phosphate
 phosphorus removal efficiency
 photosynthesis
 phragmite
 phragmites australi
 phragmites australis
 physico chemical
 physicochemical characteristic
 physicochemical parameter
 physicochemical property
 phytoremediation
 phytotoxicity
 pilot
 pilot plant
 pilot scale
 pilot study
 pilot system
 place
 plant
 plant biomass
 plant growth
 plant species
 plant uptake
 plot
 po4
 po4 p
 point
 policy
 pollutant
 pollutant removal
 pollutant removal efficiency
 pollutants removal
 polluted water
 pollution
 polymerase chain reaction
 pond
 pond effluent
 population
 population growth
 portion
 positive effect
 possibility
 possible solution
 post
 post treatment
 potable water
 potassium
 potential
 potential application
 potential risk
 potential use
 power
 practice
 pre
 pre treatment
 precipitate
 precipitation
 prediction
 presence
 present
 present study
 present work
 pressurent
 prevalence
 previous study
 primary treatment
 principle
 priority
 problem
 process
 product
 production
 productivity
 project
 promise

promising technology	review	sodium
property	review paper	soil
proportion	risk	soil aquifer treatment
prospect	river	solar energy
protection	role	solid
protein	root	solid waste
proteobacteria	rotavirus	solids concentration
protozoa	rna gene	solution
pseudomonas	runoff	somatic coliphage
public	rural area	sorption
public health	rural community	source
purification	rvfcw	source separation
quality	safe reuse	space
quantitative microbial risk assessment	safety	spatial distribution
quantity	salinity	species
rainfall	salmonella	spite
rainwater	salmonella spp	sponge
range	salmonellae	spring
rapid urbanization	salt	srt
ras	sample	ssf
rate	sampling	stability
ratio	sand	stabilization
raw material	sanitation	stage
raw sewage	sanitation system	standard
raw wastewater	sbr	start
raw water	scale	state
re use	scarcity	statistical analysis
reactor	scenario	steady state
real wastewater	scheme	step
reason	search	storage
recent advance	season	stormwater
recent development	seasonal variation	stp
recent year	second stage	strain
recirculation	secondary effluent	strategy
reclaimed wastewater	secondary treatment	stream
reclaimed water	sediment	strength
reclamation	sedimentation	structure
recommendation	selection	struvite
recovery	sem	study
recycle	semi	study period
recycled water	sensitivity analysis	substance
recycling	separation	substrate
reduction	september	subsurface
reed	septic tank effluent	subsurface flow
reference	sequence	success
regard	series	sulfamethoxazole
regeneration	set	sulfate
region	sewage	summer
regulation	sewage sludge	sunlight
relation	sewage treatment	supply
relationship	sewage treatment plant	surface
relative abundance	sewerage system	surface area
release	sfcw	surface flow
reliability	shift	surface water
remediation	shoot	surfactant
removal efficiency	shortage	survey
removal mechanism	sicily	survival
removal performance	significance	suspended solid
removal process	significant amount	swine wastewater
removal rate	significant difference	synthetic wastewater
replacement	significant effect	system performance
report	significant impact	t latifolium
requirement	significant improvement	tank
research	significant increase	tap water
researcher	significant reduction	target
reservoir	significant removal	tds
residence time	simulation	technique
resistance	simultaneous removal	technology
resistant bacterium	site	temperature
resistance gene	situation	term
resource	size	tertiary treatment
respect	sludge	test
response	sludge process	textile industry
restoration	sludge production	textile wastewater
restricted irrigation	sludge retention time	threat
retention	sludge system	threshold
retention time	sludge treatment	time
reuse potential	small community	tkn
reuse purpose	small scale	tmp
reuse standard	society	toc

today	waste stream	making	
toilet	waste water	gas emission	
toilet flushing	wastewater discharge	advance	
tomato	wastewater effluent	quality parameter	
tool	wastewater irrigation	pressure	
top	wastewater management	digestion	
total	wastewater quality	n ratio	
total coliform	wastewater reclamation	status	
total kjeldahl nitrogen	wastewater sample	service	
total n	wastewater stream	care product	
total nitrogen	wastewater system	quality improvement	
total organic carbon	wastewater treatment facility	security	
total phosphorus	wastewater treatment plant	risk assessment	
total solid	wastewater treatment process	treatment performance	
total suspended solid	wastewater treatment system	recharge	
town	wastewater treatment technology	stress	
toxicity	water	exchange	
tp removal efficiency	water body	spp	
trace element	water conservation	water source	
transformation	water consumption	train	
transport	water crisis	kjeldahl nitrogen	
treated wastewater	water demand	quality effluent	
treatment	water environment	gas	
treatment capacity	water loss	reaction	
treatment efficiency	water pollution	flushing	
treatment facility	water quality	oxygen demand	
treatment method	water quality improvement	suitability	
treatment performace	water quality parameter	cost effectiveness	
treatment plant	water reclamation	semi arid region	arid climate
treatment process	water recycling		
treatment stage	water resource		
treatment system	water sample		
treatment technology	water scarcity		
treatment train	water shortage		
treatment unit	water stress		
trend	water supply		
trial	water treatment		
trickling filter	water use		
trimethoprim	way		
tss	week		
turbidity	weight		
turn	wide range		
type	winter		
typha	winter season		
typha latifolium	work		
uasb effluent	world		
ultraviolet	world health organization		
understanding	wrrf		
unit	wsp		
university	wsp		
unrestricted irrigation	wwtp		
untreated wastewater	wwtps		
uptake	x ray diffraction		
urban area	xrd		
urban wastewater	year		
urban wastewater treatment	year period		
urbanization	yield		
urine	zeolite		
use	zinc		
user	zone		
utilization	ammonium oxidation		
valuable resource	water surface		
value	community analysis		
variability	community structure		
variable	liquor		
variation	cod m		
variety	decision making		
vegetable	microbial risk assessment		
vegetation	mine drainage		
vertical flow	crisis		
vfcw	organization		
vfcws	saving		
viability	body		
viable alternative	balance		
viable option	quality water		
view	pretreatment		
virus	digester		
volatile fatty acid	membrane fouling		
volume	perfringen		
waste	fatty acid		

APÊNDICE B

Município	População total (hab.)	População urbana (hab.)	PSTE (hab.)	Coordenada geográfica da sede municipal (°)	
				Latitude	Longitude
Água Branca	10375	4459	4459	-7,511861	-37,636
Aguiar	5622	2746	2746	-7,092219	-38,1684
Algodão de Jandaíra	2588	1347	1347	-6,899451	-36,0113
Amparo	2264	1152	1152	-7,567368	-37,063
Araçagi	16857	6659	6659	-6,85214	-35,3793
Arara	13613	9601	9601	-6,828543	-35,7555
Areia de Baraúnas	2105	1111	1111	-7,12379	-36,945
Areial	7054	5015	5015	-7,049901	-35,9251
Aroeiras	19081	9531	9531	-7,545153	-35,7068
Assunção	4067	3286	3286	-7,07501	-36,7314
Baía da Traição	9197	3549	3549	-6,690412	-34,9335
Barra de Santa Rosa	15607	8771	8771	-6,71858	-36,0674
Barra de Santana	8338	743	743	-7,517828	-35,9958
Barra de São Miguel	6095	2568	2568	-7,752709	-36,3166
Belém	17733	1464	1464	-6,74346	-35,5172
Belém do Brejo do Cruz	7356	5417	5417	-6,185558	-37,5351
Bernardino Batista	3571	996	996	-6,453753	-38,5502
Boa Ventura	5248	3214	3214	-7,420561	-38,2181
Boa Vista	7218	3719	3719	-7,259828	-36,2369
Bom Jesus	2588	1065	1065	-6,816425	-38,6457
Bom Sucesso	4937	199	199	-6,442174	-37,9237
Bonito de Santa Fé	12126	8304	8304	-7,313825	-38,5136
Boqueirão	17934	1275	1275	-7,482646	-36,1323
Borborema	5311	3878	3878	-6,802412	-35,619
Brejo do Cruz	14287	10776	10776	-6,342266	-37,4946
Cabaceiras	571	2514	2514	-7,491883	-36,2881
Cachoeira dos Índios	10364	3695	3695	-6,918893	-38,6786
Cacimba de Areia	3708	1745	1745	-7,128801	-37,1566
Cacimba de Dentro	17169	9388	9388	-6,639936	-35,7935
Cacimbas	7225	174	174	-7,211613	-37,0574
Caiçara	7182	5163	5163	-6,621567	-35,4584
Caldas Brandão	6077	3476	3476	-7,103308	-35,325
Capim	6715	4923	4923	-6,920202	-35,1669
Caraúbas	4206	1636	1091	-7,7283	-36,4935
Carrapateira	2714	1955	1955	-7,038089	-38,346
Casserengue	753	3689	3689	-6,779955	-35,8182
Catingueira	4938	296	296	-7,125579	-37,6065

Caturité	4898	1104	1104	-7,420023	-36,0209
Conceição	1903	11848	11848	-7,55634	-38,5101
Condado	6662	4616	4616	-6,898728	-37,6063
Congo	4787	3005	3005	-7,791205	-36,6584
Coxixola	1948	860	860	-7,627491	-36,6058
Cruz do Espírito Santo	17599	8054	8054	-7,139442	-35,086
Cuité de Mamanguape	636	2122	2122	-6,91334	-35,2505
Cuitegi	6748	5493	5493	-6,891438	-35,5218
Damião	5409	2515	2515	-6,632023	-35,9104
Desterro	8332	5098	5098	-7,287415	-37,0928
Diamante	6506	3755	3755	-7,427904	-38,2659
Dona Inês	10375	4592	4592	-6,603226	-35,6274
Duas Estradas	3569	2785	2785	-6,688751	-35,4184
Emas	3556	2286	2286	-7,100053	-37,7166
Fagundes	1118	5357	5357	-7,35822	-35,7852
Gado Bravo	8292	899	899	-7,583208	-35,7902
Gurinhém	14125	5901	5901	-7,12198	-35,4251
Gurjão	3477	2342	2342	-7,246398	-36,488
Ibiara	5877	3592	3592	-7,479986	-38,4062
Igaracy	6092	4078	4078	-7,18127	-38,1508
Imaculada	11877	5297	5297	-7,389324	-37,5082
Ingá	18184	11602	11602	-7,291173	-35,6108
Itapororoca	18978	12121	12121	-6,828945	-35,2463
Itatuba	11069	6462	6462	-7,378353	-35,6277
Jacaraú	14467	8334	8334	-6,614942	-35,2893
Jericó	7751	4863	4863	-6,553468	-37,806
Joca Claudino	264	848	848	-6,484033	-38,4767
Juarez Távora	8014	6287	6287	-7,174628	-35,5741
Juazeirinho	18422	10019	10019	-7,068351	-36,5792
Junco do Seridó	7238	476	428	-6,993112	-36,7169
Juripiranga	1083	10141	10141	-7,358663	-35,2387
Juru	9831	4361	4361	-7,538325	-37,8202
Lagoa	464	2284	2284	-6,592067	-37,9156
Lagoa de Dentro	7754	4182	4182	-6,672546	-35,3709
Lastro	2698	1268	1268	-6,506446	-38,1745
Livramento	7274	381	381	-7,375813	-36,9463
Logradouro	4406	1926	1926	-6,616507	-35,4407
Lucena	13344	11549	11549	-6,900241	-34,8764
Mãe D'Água	3988	1557	1557	-7,257923	-37,4277
Malta	5745	502	502	-6,904705	-37,5215
Manaíra	10988	6155	4747	-7,703734	-38,1526
Marcação	8746	3275	3275	-6,765767	-35,0089
Marizópolis	6689	5805	5805	-6,845847	-38,3486

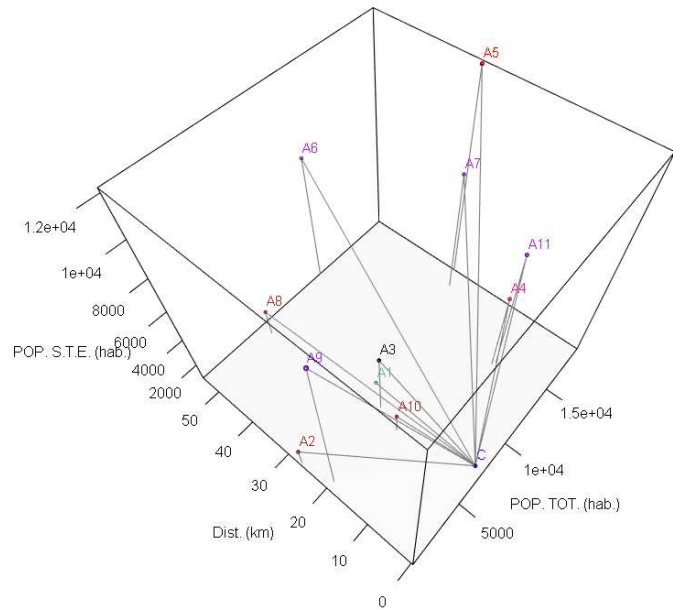
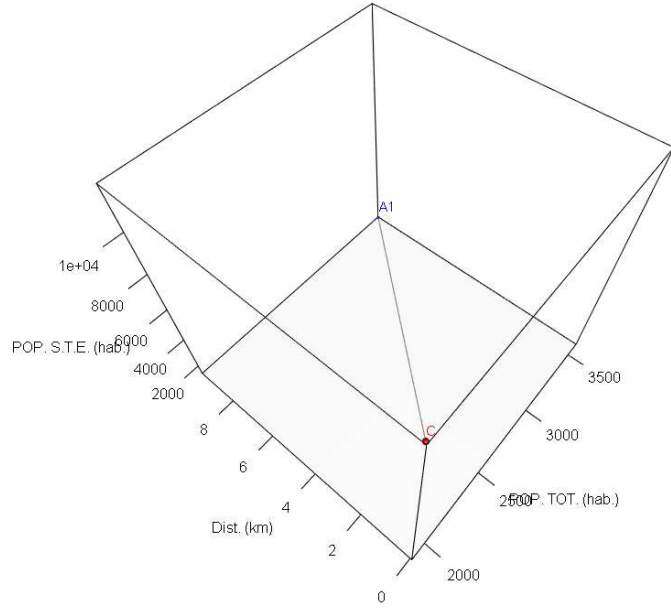
Massaranduba	14077	4892	4892	-7,190369	-35,7851
Mataraca	8642	764	764	-6,597146	-35,0534
Matinhas	4528	715	715	-7,122052	-35,7701
Mato Grosso	2944	1309	1309	-6,541358	-37,7149
Maturéia	669	4345	4345	-7,262298	-37,3513
Mogeirol	13238	5917	361	-7,295504	-35,4802
Montadas	5806	3672	3672	-7,088901	-35,9595
Monte Horebe	4867	27	27	-7,215592	-38,586
Mulungu	9962	4772	4772	-7,025664	-35,4603
Natuba	10449	3594	3594	-7,64351	-35,5531
Nazarezinho	7271	318	318	-6,911817	-38,3223
Nova Floresta	10614	7953	7953	-6,456714	-36,2049
Nova Olinda	5892	3132	3132	-7,478412	-38,0399
Nova Palmeira	5011	2932	2932	-6,678913	-36,4198
Olho d'Água	6399	3571	3571	-7,228603	-37,7466
Ouro Velho	3052	2134	2134	-7,616458	-37,1522
Parari	1747	972	972	-7,318219	-36,6562
Passagem	2453	1218	1218	-7,136893	-37,0494
Paulista	12411	6022	6022	-6,591796	-37,6189
Pedra Branca	3802	2416	2416	-7,428825	-38,0711
Pedra Lavrada	7954	3272	3272	-6,756048	-36,4683
Pedro Régis	6139	2287	2287	-6,640425	-35,2734
Piancó	16147	11775	11775	-7,193241	-37,9292
Picuí	18737	12463	12463	-6,508866	-36,35
Pilar	12036	8252	8252	-7,266477	-35,257
Pilões	6518	3112	3112	-6,868687	-35,6133
Pilõesinhos	4937	2631	2631	-6,842533	-35,5292
Pirpirituba	1059	8096	8096	-6,780027	-35,4911
Pitimbu	19478	11881	11881	-7,46682	-34,8154
Pocinhos	18848	10643	10643	-7,073818	-36,0608
Poço Dantas	3877	101	101	-6,399176	-38,4912
Poço de José de Moura	4366	1564	1564	-6,564425	-38,5114
Prata	4265	2705	2705	-7,695029	-37,0836
Puxinanã	13801	4504	4504	-7,145724	-35,9686
QuixabÁ	2009	748	748	-7,030865	-37,1484
Remígio	19973	14715	14715	-6,955359	-35,7989
Riachão	365	2264	2264	-6,543103	-35,6613
Riachão do Bacamarte	4562	2849	2849	-7,250824	-35,6652
Riacho de Santo Antônio	1999	1377	1377	-7,681027	-36,1577
Riacho dos Cavalos	8555	4142	4126	-6,441084	-37,6486
Salgadinho	3975	1363	1363	-7,102738	-36,845
Salgado de São Félix	12123	5314	5314	-7,357591	-35,4363
Santa Cruz	6579	3038	3038	-6,52597	-38,0565

Santa Helena	3591	1451	1451	-6,718015	-38,643
Santa Inês	1547	14167	772	-7,626792	-38,5593
Santa Luzia	455	2193	2193	-6,869737	-36,9188
Santa Teresinha	5098	2133	2133	-7,084227	-37,444
Santana de Mangueira	6942	3569	3569	-7,551974	-38,3365
Santana dos Garrotes	2496	818	818	-7,385614	-37,9895
Santo André	4602	3164	3164	-7,220209	-36,6316
São Bentinho	3119	1086	1086	-6,890393	-37,7271
São Domingos	2645	113	113	-6,81606	-37,9426
São Domingos do Cariri	3377	1368	1368	-7,633155	-36,4377
São Francisco	417	2253	2253	-6,618849	-38,0958
São João do Cariri	1802	6817	1600	-7,386065	-36,5321
São João do Rio do Peixe	7622	334	334	-6,721559	-38,4555
São José da Lagoa Tapada	6394	2903	2903	-6,936875	-38,1625
São José de Caiana	4631	1573	1573	-7,251855	-38,3002
São José de Espinharas	3619	1523	1523	-6,840152	-37,3217
São José do Bonfim	4153	2671	2671	-7,160368	-37,3072
São José do Sabugi	3607	1487	1487	-6,774067	-36,7983
São José dos Cordeiros	6037	2601	2601	-7,391395	-36,8078
São José dos Ramos	7682	5878	5878	-7,247828	-35,3782
São Mamede	11793	4976	4976	-6,924279	-37,0957
São Sebastião de Lagoa de Roça	10919	4907	4907	-7,105739	-35,8686
São Vicente do Seridó	13807	8959	8959	-6,856654	-36,412
Serra Branca	3114	2075	2075	-7,480765	-36,6663
Serra da Raiz	2921	1744	1744	-6,68569	-35,4382
Serra Grande	7001	3583	3583	-7,214728	-38,3721
Serra Redonda	6037	3355	3355	-7,186702	-35,6799
Serraria	5152	3769	3769	-6,815591	-35,6281
Sertãozinho	7845	940	940	-6,75169	-35,4375
Sobrado	15211	11327	11327	-7,144708	-35,236
Soledade	3631	1813	1813	-7,0591	-36,3629
Sossêgo	11024	4692	4692	-6,766258	-36,2474
Tacima	15505	928	928	-6,488	-35,637
Taperoá	14791	6939	6939	-7,206713	-36,8248
Tavares	15333	10434	10434	-7,627392	-37,8715
Teixeira	9473	4427	4427	-7,221455	-37,2528
Triunfo	15356	10897	10897	-6,571719	-38,5989
Uiraúna	9914	425	425	-6,520716	-38,4116
Umbuzeiro	287	2103	327	-7,695496	-35,6639
Várzea	5395	1065	1065	-6,770924	-36,9925
Vieirópolis	385	1739	1739	-6,507259	-38,257
Vista Serrana	2269	161	161	-6,738541	-37,5687

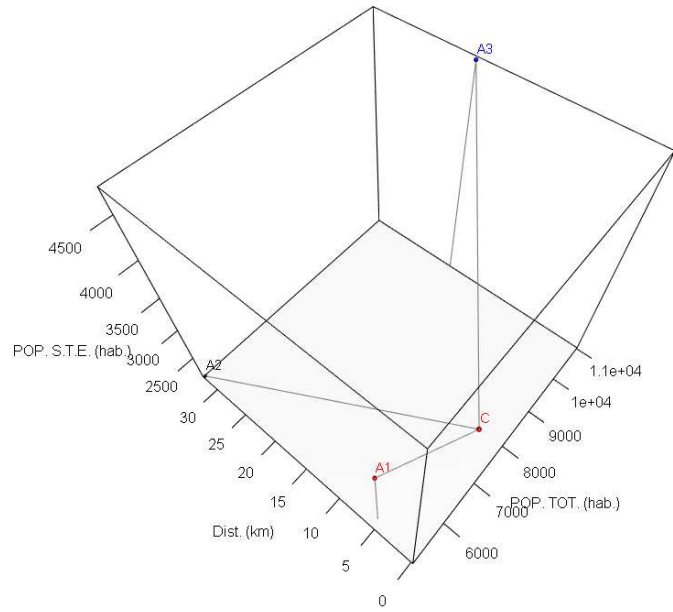
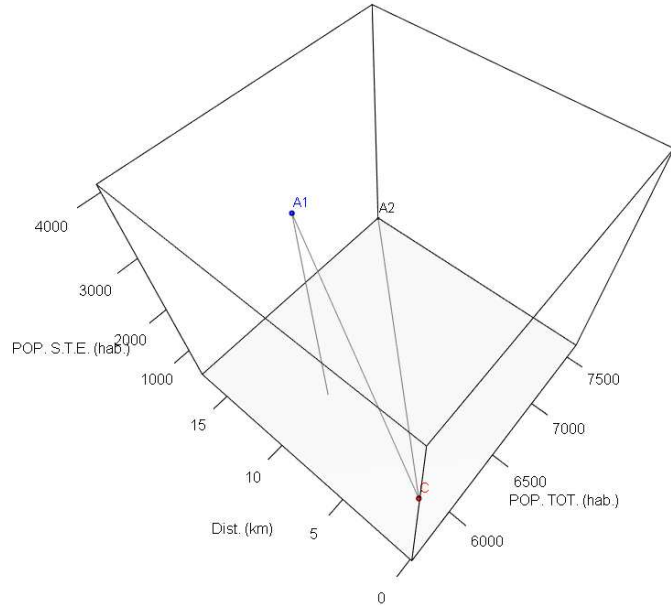
Fonte: Brasil (2010, 2019). Processado pelo autor (2023).

APÊNDICE C

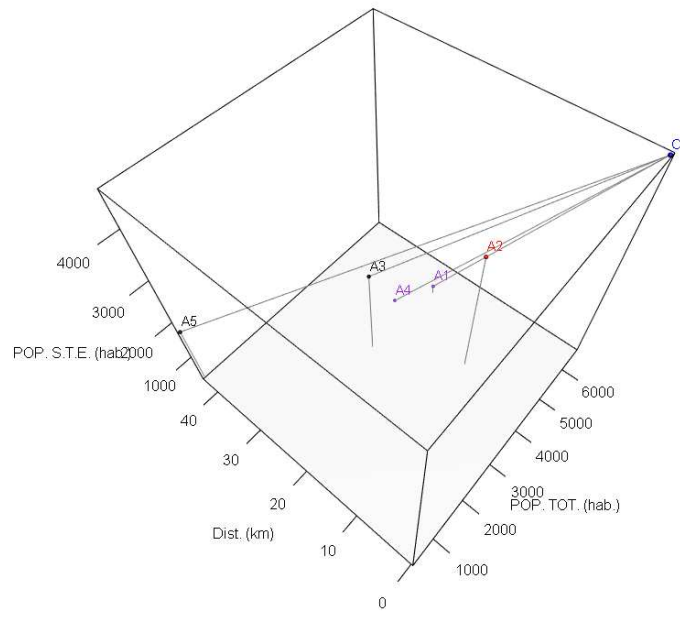
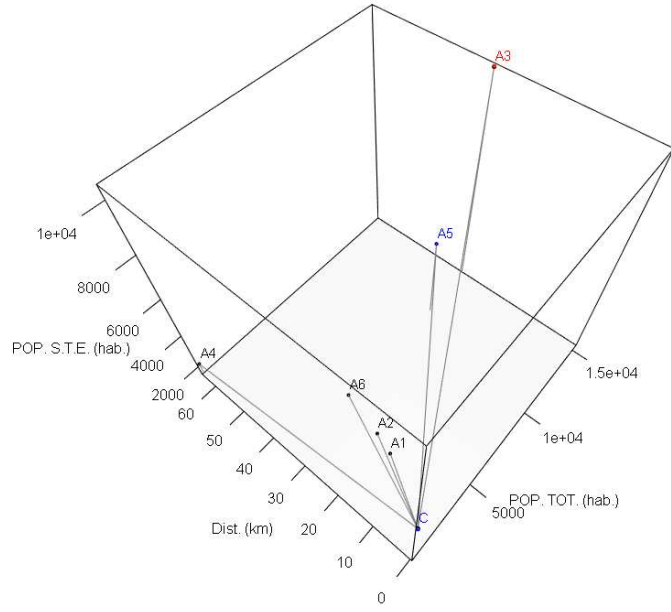
Grupo PSTE 2



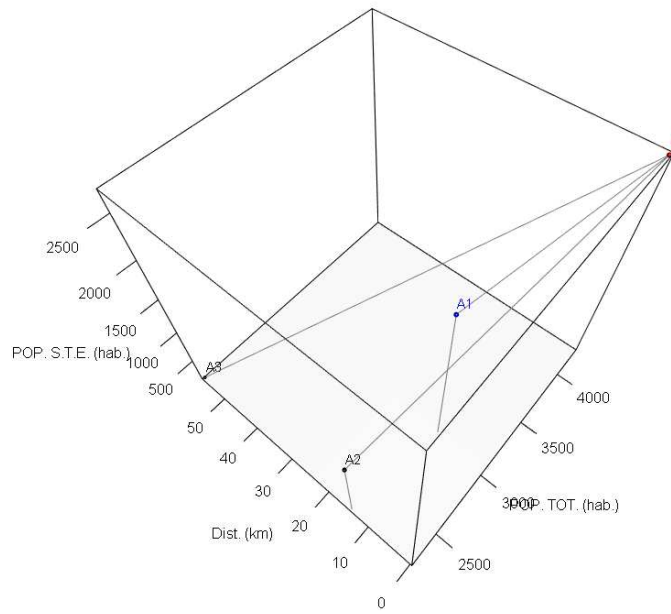
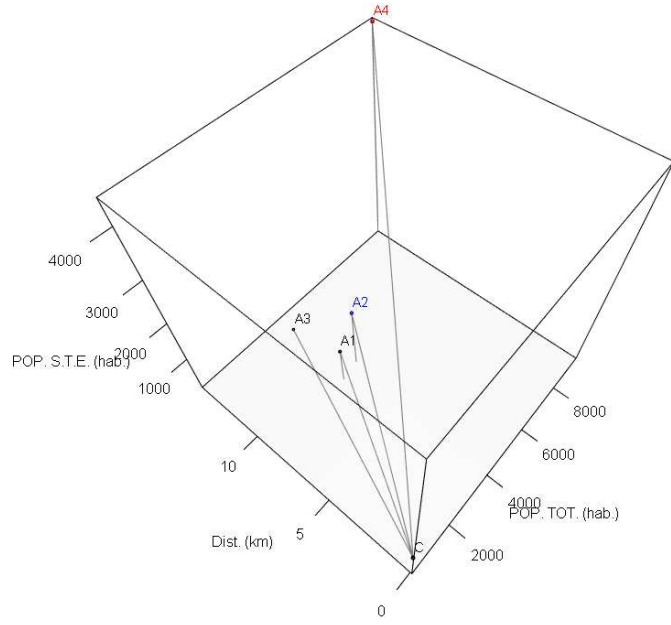
Grupo PSTE 3



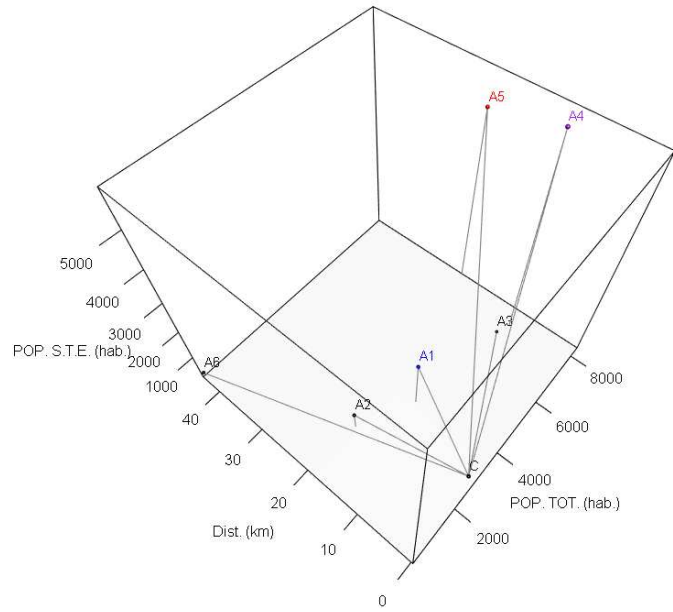
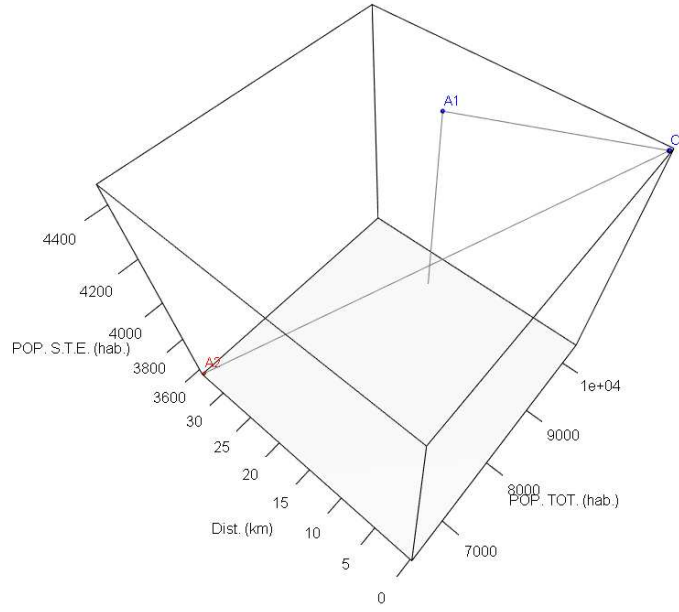
Grupo PSTE 5

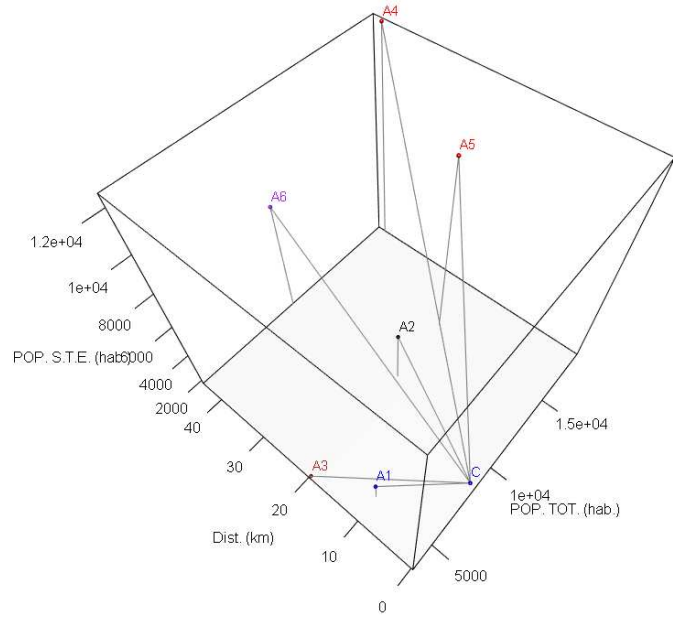


Grupo PSTE 6

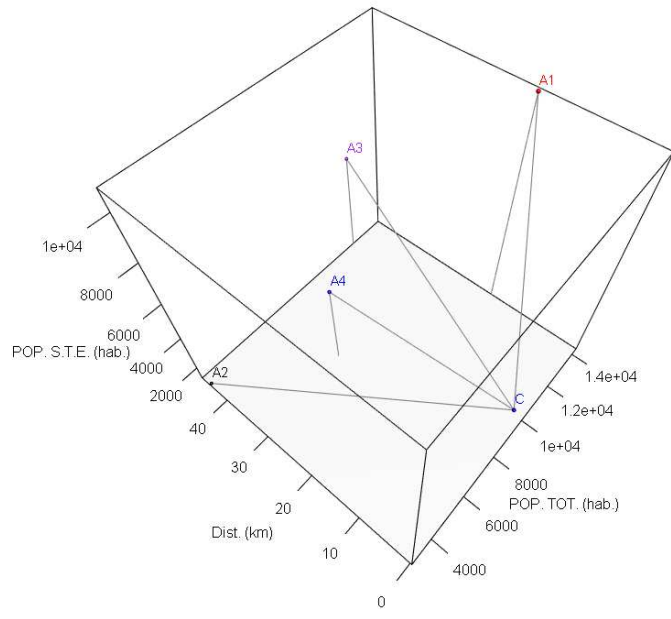


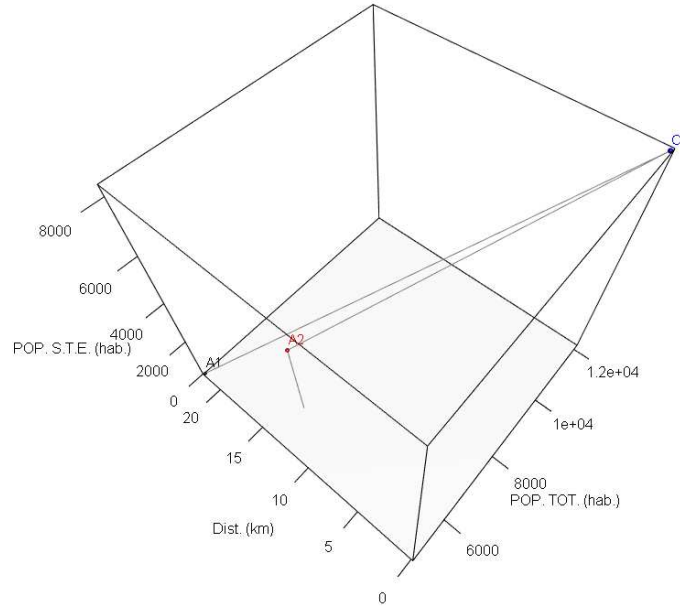
Grupo PSTE 7



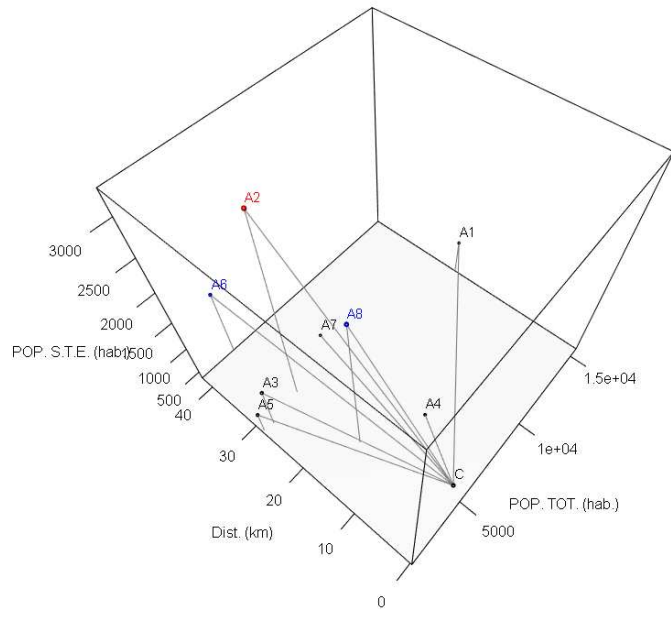


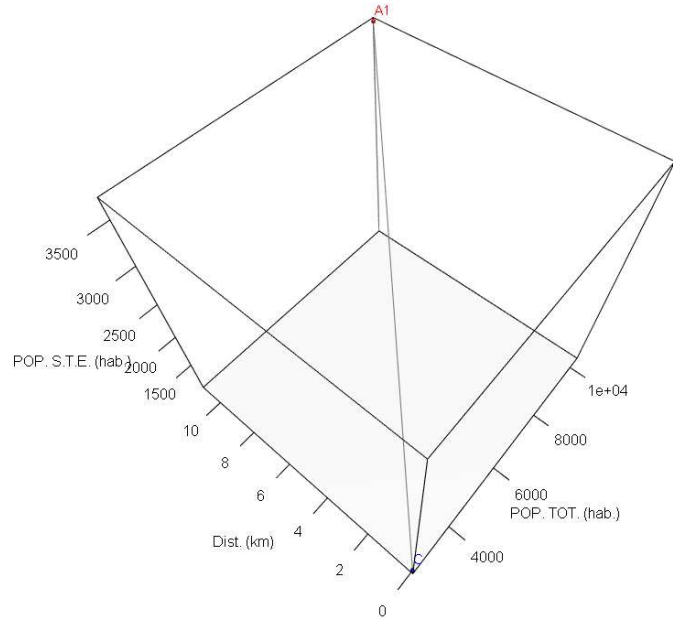
Grupo PSTE 9



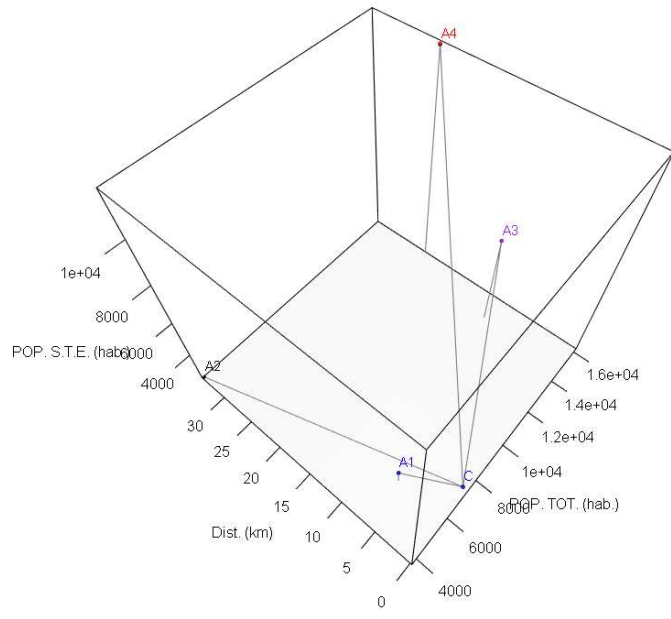


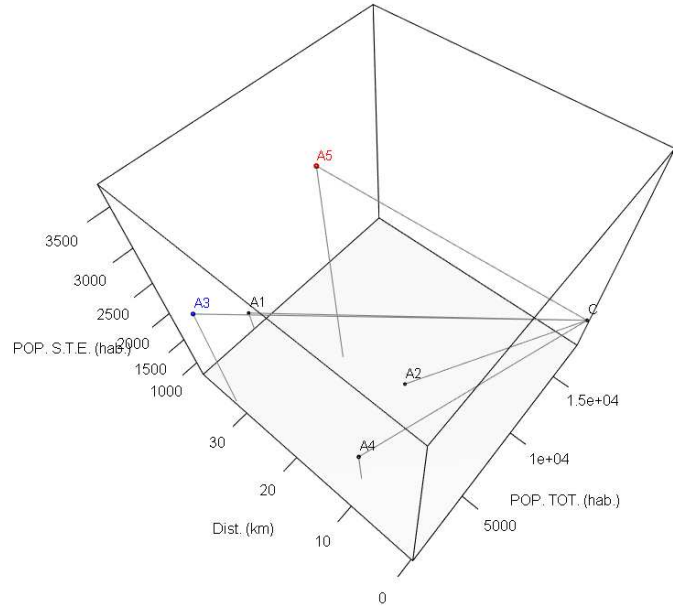
Grupo PSTE 10



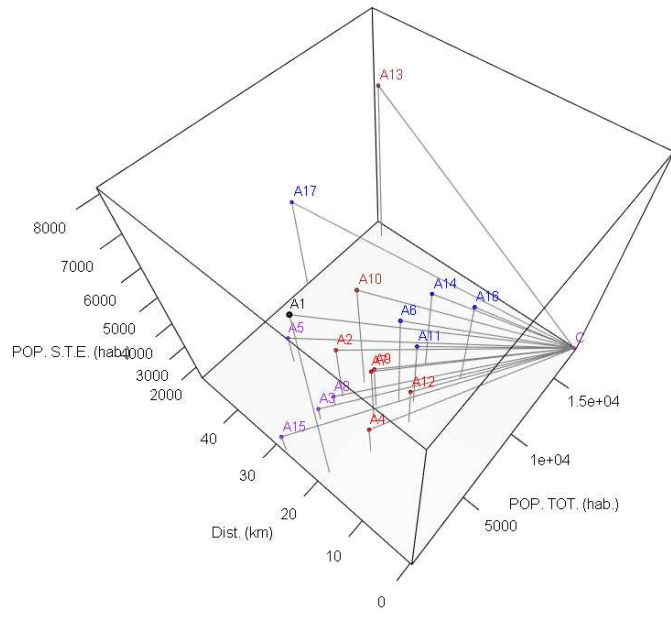


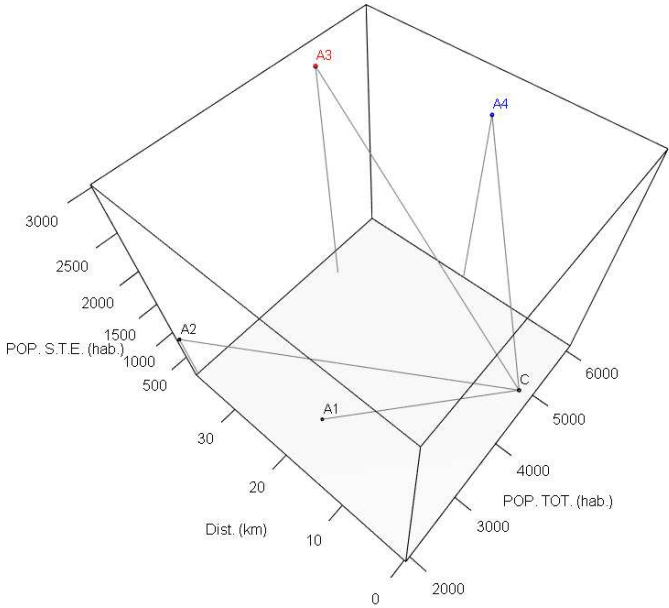
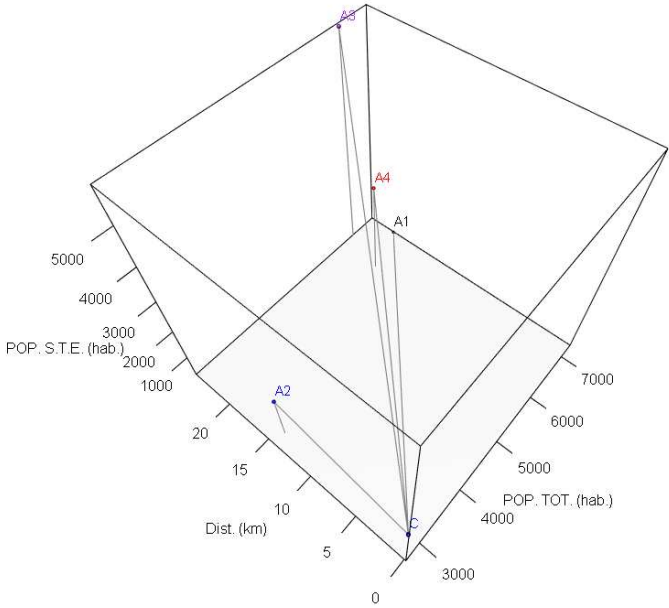
Grupo PSTE 12



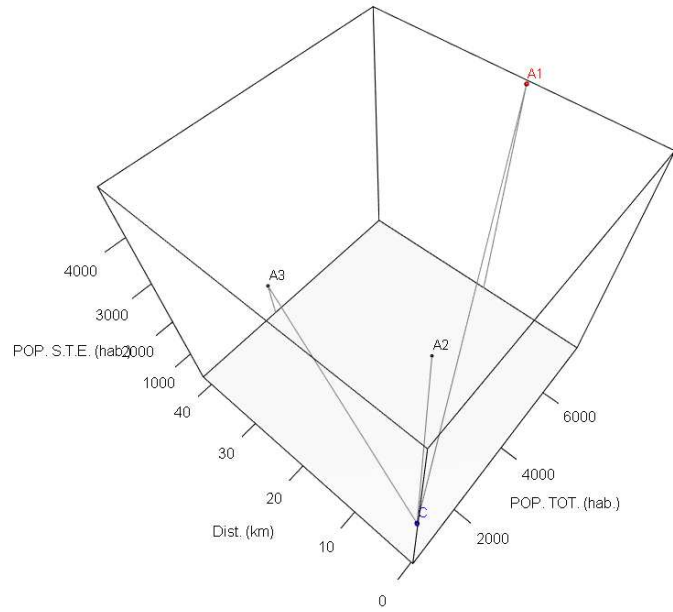
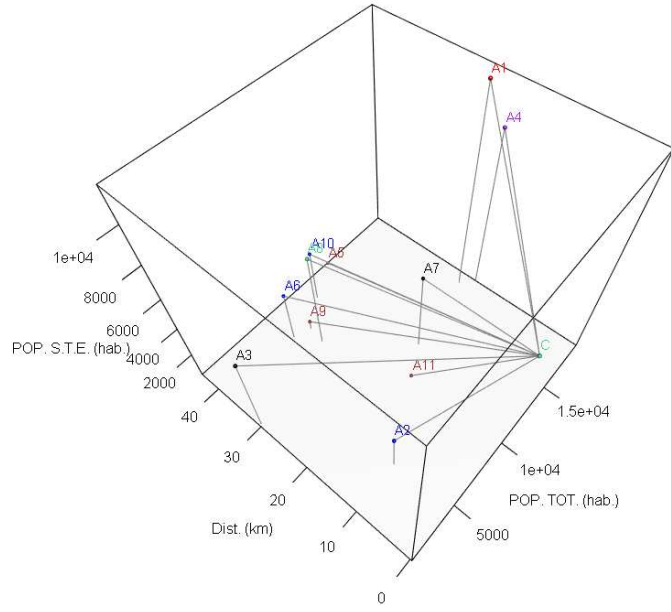


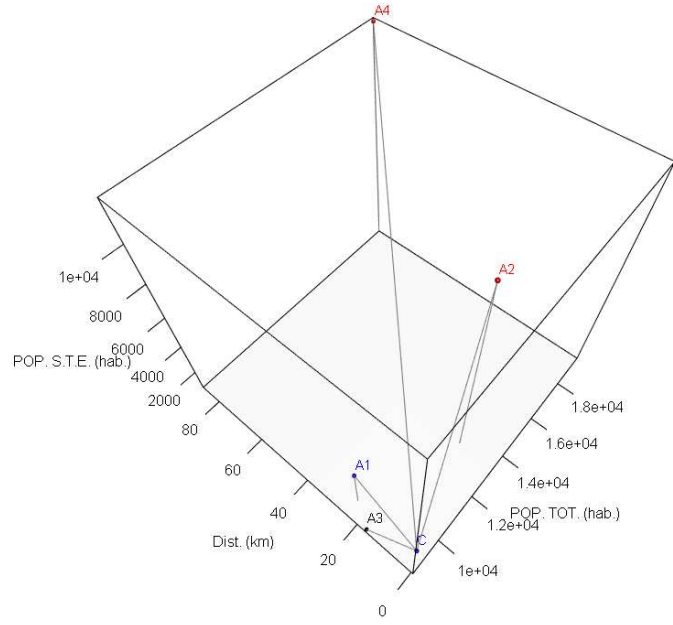
Grupo PSTE 14





Grupo PSTE 28





Grupo PSTE 22

