

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**EXPLORANDO ABORDAGENS DE PLANEJAMENTO
ADAPTATIVO SOB INCERTEZAS PROFUNDAS PARA
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA:
UMA APLICAÇÃO PARA O DISTRITO FEDERAL DO
BRASIL**

BRUNA MATTOS ARAÚJO

**ORIENTADORA: CONCEIÇÃO DE MARIA ALBUQUERQUE
ALVES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**EXPLORANDO ABORDAGENS DE PLANEJAMENTO
ADAPTATIVO SOB INCERTEZAS PROFUNDAS PARA
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA:
UMA APLICAÇÃO PARA O DISTRITO FEDERAL DO
BRASIL**

BRUNA MATTOS ARAÚJO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS
HÍDRICOS.**

APROVADA POR:

Prof^a Conceição de Maria Albuquerque Alves, Dra. (ENC-UnB)
(Orientadora)

Prof. Oscar de Moraes Cordeiro Netto, Dr. (ENC-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Suzana Gico Montenegro, Dra. (UFPE)
(Examinadora Externa)

BRASÍLIA/DF, 28 DE AGOSTO DE 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

ARAÚJO, BRUNA MATTOS

Explorando Abordagens Adaptativas Resistentes a Incertezas Profundas: Uma Aplicação ao Distrito Federal [Distrito Federal] 2023.

120p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2023).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Planejamento Adaptativo

2. Incertezas Profundas

3. Abastecimento Urbano de Água

4. Inequidades

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, B. M. (2023). *Explorando abordagens de planejamento adaptativo sob incertezas profundas para sistemas de abastecimento urbano de água: uma aplicação para o Distrito Federal do Brasil*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Bruna Mattos Araújo.

TÍTULO: Explorando Abordagens de Planejamento Adaptativo Sob Incertezas Profundas para Sistemas de Abastecimento Urbano de Água: uma aplicação para o Distrito Federal do Brasil.

GRAU: Mestre ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Bruna Mattos Araújo

SQN 210, Bloco F, Asa Norte.

70.862-060 Brasília – DF – Brasil.

"Quanto mais aprendemos sobre o mundo, quanto mais profundo nosso conhecimento, mais específico, consistente e articulado será o nosso conhecimento do que ignoramos - o conhecimento da nossa ignorância. [...] Vale a pena lembrar que, embora haja uma vasta diferença entre nós no que diz respeito aos fragmentos que conhecemos, somos todos iguais no infinito da nossa ignorância."

KARL POPPER (1961)

AGRADECIMENTOS

À Inteligência Divina, por meio da qual todas as bênçãos me foram concedidas, e sem a qual nenhum passo da minha trajetória seria possível.

Aos meus amados pais Dilene e Gladstone, as pessoas mais incríveis, pelo amor incessante e apoio incondicional em todas as minhas decisões. Espero honrá-los em todas as minhas ações ao longo da vida. À minha irmã Isabela, pela torcida carinhosa e constante.

Ao Otávio, por me mostrar o significado mais bonito e verdadeiro de companheirismo. Obrigada por me dar suporte, força e coragem todos os dias, por acreditar em mim em todos os momentos, por se orgulhar e vibrar com minhas conquistas, e por compartilhar comigo o fascínio pela pesquisa científica e pelo meio acadêmico.

À minha orientadora, Professora Conceição, por fortalecer meu alicerce na vida acadêmica, por confiar na minha dedicação e no meu trabalho, mesmo em tempos incertos. Obrigada pelos incontáveis ensinamentos, e pela constante motivação para explorar as fronteiras da ciência.

Aos pesquisadores da Universidade de Cornell (EUA), em especial aos colegas David Gold, Lillian Lau e ao Professor Patrick Reed, pelo compartilhamento de experiências, ferramentas e conhecimentos no âmbito desta pesquisa. A parceria de vocês foi inestimável e me inspirou a buscar a excelência e o espírito de colaboração que devem guiar a trajetória acadêmica. Ao colega Saulo Aires, pela valorosa colaboração no tratamento de dados hidrológicos utilizados neste trabalho. À Caesb (Diogo Gebrim) e à Adasa (Jorge Lima e Gustavo Carneiro), pelo compartilhamento de reflexões e discussões técnicas acerca das especificidades e desafios que permeiam a operação e regulação do sistema de abastecimento de água do Distrito Federal.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido para desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores Oscar Netto e Suzana Montenegro, por contribuírem com o aperfeiçoamento desta pesquisa.

RESUMO

EXPLORANDO ABORDAGENS DE PLANEJAMENTO ADAPTATIVO SOB INCERTEZAS PROFUNDAS PARA SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA: UMA APLICAÇÃO PARA O DISTRITO FEDERAL DO BRASIL

Cenários de mudanças rápidas e com pouca previsibilidade já são realidade em muitos sistemas de abastecimento urbano de água (SAUAs). Eventos climáticos extremos, alterações rápidas no uso e ocupação do solo, aumento da poluição de mananciais, crescimento na demanda por água são alguns dos desafios hoje comuns na gestão e planejamento desses sistemas. Algumas dessas condições, conhecidas por incertezas profundas, carecem de consenso acerca de suas características, probabilidade de ocorrência, e impactos na performance dos sistemas. Recentemente, metodologias para apoio à tomada de decisões em ambientes de incertezas têm dado destaque para abordagens adaptativas que consideram incertezas profundas, conhecidas como Tomada de Decisão em Contextos de Incerteza Profundas (DMDU). Apesar de já possuírem aplicações internacionais consolidadas e bem-sucedidas, as abordagens DMDU ainda carecem de adaptações e aplicações para estudos de caso brasileiros, mesmo que haja no país diversos contextos que justifiquem sua aplicação. O SAUA do Distrito Federal (DF) opera em região marcada pelo crescimento rápido de sua população, alteração acelerada do uso e ocupação do solo, e disparidades socioeconômicas e de acesso a infraestruturas de saneamento. Este trabalho propõe a aplicação da abordagem DMDU conhecida como *Deeply Uncertain Pathways*, para construção e análise de portfólios de planejamento e gestão do SAUA do DF que associem medidas de mitigação de secas e instalação de infraestruturas. Para tanto, foram utilizados algoritmos e recursos computacionais de alta performance, com destaque para o programa *WaterPaths*. Os resultados mostram a existência de fortes relações de compromisso entre segurança hídrica (confiabilidade) e a necessidade de medidas de restrição de consumo de água, e também a forte necessidade de investimento em infraestruturas para manutenção da sustentabilidade do SAUA do DF, especialmente no curto prazo. Também revelam as disparidades na robustez e capacidade de adaptação de áreas com diferentes perfis populacionais dentro do SAUA estudado, mostrando que inequidades socioeconômicas históricas possuem consequências na exposição a riscos e impactos de crises hídricas junto a populações mais vulneráveis.

Palavras-chave: incertezas profundas, planejamento adaptativo, sistema de abastecimento urbano de água, inequidades socioeconômicas, segurança hídrica, otimização multiobjetiva.

ABSTRACT

EXPLORING ADAPTIVE PLANNING APPROACHES UNDER DEEP UNCERTAINTIES FOR URBAN WATER SUPPLY SYSTEMS: AN APPLICATION FOR THE FEDERAL DISTRICT OF BRAZIL

Many urban water supply systems (UWSS) are already facing scenarios marked by accelerated and unpredictable changes. Extreme climate events, unexpected land use changes, water sources pollution growth and increase in water demand are some of the challenges faced today by decision makers. Some of these conditions are aggravated by Deep Uncertainties (DU), defined as conditions characterized by lack agreement from analysts about its main attributes, probability distributions, and its impacts on system performance. Recently, decision support tools evolved to include adaptive approaches and methodologies termed as Decision Making Under Deep Uncertainty (DMDU) incorporating DUs in the analysis. Despite having successful and robust applications around the world, in Brazil DMDU approaches have not been extensively explored, even though many national contexts would justify its application. The UWSS in the Federal District (FD) operates in a region marked by rapid and persistent population growth, fast land use changes and accentuated disparities in socioeconomic conditions and infrastructure access. This work proposes the application of the *Deeply Uncertain Pathways* framework, to build and assess planning and management portfolios for the FD UWSS that couples long term infrastructure measures and drought mitigation actions using the *WaterPaths* software. Results show strong tradeoffs between system reliability and the use of water consumption restriction measures, and also a strong need of infrastructure investments to maintain water supply sustainability, especially in the short term. The local socioeconomic disparities in robustness and in policy performance are also key results, showing that historic socioeconomic inequities can exacerbate water crisis impacts, specially to the most vulnerable populations.

Key-words: deep uncertainties, adaptive planning, urban water supply systems, socioeconomic inequities, water security, multiobjective optimization.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	7
2.1. OBJETIVO GERAL.....	7
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3.1. ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA: PLANEJAMENTO EM CENÁRIOS DE INCERTEZA.....	8
3.2. PLANEJAMENTO ADAPTATIVO E TOMADA DE DECISÃO MEDIANTE INCERTEZAS PROFUNDAS (DMDU): COMPONENTES E ABORDAGENS... 15	
3.2.1. Componentes principais das abordagens DMDU.....	15
3.2.2. Abordagens DMDU	17
3.2.3. Técnicas, algoritmos e modelos computacionais aplicados em abordagens DMDU para gerenciamento de sistemas hídricos.....	22
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: DISTRITO FEDERAL (DF) DO BRASIL	37
4.1. INFRAESTRUTURA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DO DISTRITO FEDERAL	40
4.2. CRISE HÍDRICA NO DISTRITO FEDERAL ENTRE 2016 E 2018	43
5. METODOLOGIA.....	47
5.1. GERAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA WATERPATHS.....	50
5.1.1. Séries Sintéticas de Vazão e Evaporação.....	50
5.1.2. Projeções de Demanda de Água	56
5.1.3. Seleção e Definição de Intervalos de Incertezas Profundas.....	57
5.2. OTIMIZAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE POLÍTICAS ÓTIMAS	59
5.3. REAVALIAÇÃO	63
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66

6.1. DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA WATERPATHS	66
6.1.1. Séries sintéticas de vazão e evaporação	66
6.1.2. Séries sintéticas de demanda	83
6.1.3. Definição de Incertezas Profundas.....	85
6.2. FRENTE DE PARETO RESULTANTE DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO.....	89
6.3. AVALIAÇÃO DE ROBUSTEZ E ANÁLISE DE CENÁRIOS A PARTIR DA REAVALIAÇÃO DE POLÍTICAS NÃO DOMINADAS.....	98
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
APÊNDICES	118
APÊNDICE A – CÁLCULO DAS FUNÇÕES OBJETIVO.....	119
APÊNDICE B – BORG MOEA: ASPECTOS OPERACIONAIS IMPORTANTES.....	122
Apêndice C – IMPORTÂNCIA DE ATRIBUTOS NO MÉTODO GBT.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Fontes dos dados hidrológicos de vazão utilizados neste trabalho.....	54
Tabela 5.2 - Fontes dos dados hidrológicos de evaporação utilizados neste trabalho.....	54
Tabela 5.3 - Ações de gestão de curto prazo disponíveis para mitigação de secas nas AS.....	59
Tabela 5.4 - Ações disponíveis para gestão de riscos de falha de longo prazo nas AS.....	59
Tabela 6.1 - Projeção de demanda por água entre 2021-2060, por Área de Serviço.	83
Tabela 6.2 - FIPs definidos inicialmente para o SAUA do DF	86
Tabela 6.3 - Índices econômicos utilizados para definição dos FIPs relacionados às variações de tarifa de água.....	88
Tabela 6.4 - FIPs ajustados a partir dos entendimentos técnicos com Adasa e Caesb.....	89
Tabela A1 - Valores de ϵ -dominância utilizadas no processo de otimização multiobjetiva empregando MS Borg MOEA.....	123
Tabela A2 - Ranque de importância de atributos para as políticas de alto investimento e investimento moderado em infraestrutura.....	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Exemplo de mapa de caminhos adaptativos da abordagem DAPP.....	19
Figura 3.2 - Fluxo e módulos de Operação do Programa <i>WaterPaths</i>	29
Figura 3.3 - Dinâmica de adoção de novas ações de planejamento com base em RdFs.	34
Figura 4.1 - Regiões Hidrográficas do DF.	38
Figura 4.2 - Renda domiciliar média mensal das RAs do DF.	39
Figura 4.3 - Consumo <i>per capita</i> de água por RA nos anos de 2017 e 2018	39
Figura 4.4 - Distribuição espacial das RAs conforme (a) densidade populacional, (b) consumo de água per capita, (c) renda.	40
Figura 4.5 - Configuração dos Sistemas Produtores de água do Distrito Federal.....	41
Figura 5.1 - Fluxograma metodológico desta pesquisa	47
Figura 5.2 - Localização das AS Descoberto e Santa Maria dentro do SAUA do DF ...	49
Figura 5.3 - Abstração conceitual do SAUA do DF utilizada para modelagem no <i>WaterPaths</i>	49
Figura 5.4 - Manipulação de matrizes pelo método mFGN	52
Figura 5.5 - Estações fluviométricas utilizadas no presente estudo.....	54
Figura 5.6 - Processo de construção de cenários e de avaliação de cada política θ construída pelo algoritmo evolucionário.....	60
Figura 5.7 - Processo de construção de cenários para Reavaliação da Frente Ótima de Pareto.....	63
Figura 6.1 - Exemplo de série sintética de vazão afluente ao Reservatório Descoberto, com duração de 40 anos (2086 semanas).....	67
Figura 6.2 - Exemplo de série sintética de vazão afluente ao Reservatório Corumbá IV, com duração de 40 anos (2086 semanas).....	67
Figura 6.3 - Exemplo de série sintética de vazão afluente ao Reservatório Santa Maria, com duração de 40 anos (2086 semanas).....	68
Figura 6.4 - Exemplo de série sintética de vazão afluente ao Reservatório Paranoá, com duração de 40 anos (2086 semanas).....	68
Figura 6.5 - Exemplo de série sintética gerada para a captação a fio d'água representativa dos córregos Torto e Bananal, com duração de 40 anos (2086 semanas).....	68
Figura 6.6 - Curvas de probabilidade de excedência para as fontes de água dos Sistemas Descoberto e Santa Maria/Torto.....	69

Figura 6.7 - Análises estatísticas das séries sintéticas das vazões afluentes ao Reservatório Descoberto.....	70
Figura 6.8 - Análises estatísticas das séries sintéticas das vazões afluentes ao Reservatório Corumbá IV.....	71
Figura 6.9 - Análises estatísticas das séries sintéticas das vazões afluentes ao Reservatório Santa Maria.....	71
Figura 6.10 - Análises estatísticas das séries sintéticas das vazões afluentes ao Lago Paranoá.....	72
Figura 6.11 - Análises estatísticas das séries sintéticas das séries sintéticas de vazões do conjunto Bananal/Torto.....	72
Figura 6.12 - Curvas de probabilidade de excedência comparativas entre as séries sintéticas de vazão de Giacomazzo (2020) e do presente trabalho.....	74
Figura 6.13 - Análises comparativas das séries sintéticas de vazão para o Reservatório Descoberto.....	74
Figura 6.14 - Análises comparativas das séries sintéticas de vazão para o Reservatório Corumbá.....	75
Figura 6.15 - Análises comparativas das séries sintéticas de vazão para o Reservatório Santa Maria.....	75
Figura 6.16 - Análises comparativas das séries sintéticas de vazão para o Lago Paranoá.....	75
Figura 6.17 - Análises comparativas das séries sintéticas de vazão para o conjunto Bananal/Torto.....	76
Figura 6.18 - Exemplo de série sintética evaporação para o Reservatório do Descoberto, com duração de 40 anos (2086 semanas).....	76
Figura 6.19 - Exemplo de série sintética evaporação para o Reservatório Corumbá, com duração de 40 anos (2086 semanas).....	76
Figura 6.20 - Exemplo de série sintética evaporação para o Reservatório Santa Maria, com duração de 40 anos (2086 semanas).....	77
Figura 6.21 - Exemplo de série sintética evaporação para o Lago Paranoá, com duração de 40 anos (2086 semanas).....	77
Figura 6.22 - Curvas de probabilidade de excedência os reservatórios Descoberto, Corumbá, Santa Maria e Paranoá.....	78
Figura 6.23 - Análises estatísticas das séries sintéticas de evaporação do Reservatório Descoberto.....	79

Figura 6.24 - Análises estatísticas das séries sintéticas de evaporação do Reservatório Corumbá IV.....	79
Figura 6.25 - Análises estatísticas das séries sintéticas de evaporação do Reservatório Santa Maria.....	80
Figura 6.26 - Análises estatísticas das séries sintéticas de evaporação do Lago Paranoá.....	80
Figura 6.27 - Curvas de probabilidade de excedência comparativas entre as séries sintéticas de vazão de Giacomazzo (2020) e do presente trabalho.....	81
Figura 6.28 - Análises comparativas das séries sintéticas de evaporação para o Reservatório do Descoberto.....	82
Figura 6.29 - Análises comparativas das séries sintéticas de evaporação para o Reservatório Corumbá.....	82
Figura 6.30 - Análises comparativas das séries sintéticas de evaporação para o Reservatório Santa Maria.....	82
Figura 6.31 - Análises comparativas das séries sintéticas de evaporação para o Lago Paranoá.....	83
Figura 6.32 - Séries sintéticas de demanda para a AS Descoberto.....	84
Figura 6.33 - Séries sintéticas de demanda para a AS Santa Maria.....	84
Figura 6.34 - Resultado da otimização multiobjetiva considerando incertezas profundas...	90
Figura 6.35 - Relações de compromisso entre as FOs mais estratégicas.....	92
Figura 6.36 - Variáveis de decisão para cada AS em quatro políticas-chave.....	93
Figura 6.37 - Opções de infraestrutura adotadas ao longo do horizonte de planejamento em cada política selecionada.....	95
Figura 6.38 - Diagnóstico temporal de performance das políticas selecionadas a partir da frente aproximada de Pareto.....	96
Figura 6.39 - Avaliação da robustez de políticas não dominadas sob a perspectiva de métricas de satisfação.....	99
Figura 6.40 - Avaliação da robustez de políticas não dominadas sob a perspectiva de métricas de arrependimento.....	100
Figura 6.41 - Análise de cenários para as políticas com alto e moderado investimento em infraestrutura.....	102
Figura A1 - Dinâmica de funcionamento do algoritmo MS Borg MOEA.....	122
Figura A2 - Hipervolume relativo para as cinco inicializações de MS Borg MOEA.....	124

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

ABP	Planejamento Baseado em Suposioes (<i>Assumption Based Planning</i>)
Adasa	Agência Reguladora de guas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
ANA	Agência Nacional de águas e Saneamento Básico
AS	rea de Serviço
ATP	Pontos de Inflexão Adaptativos (<i>Adaptation Tipping Points</i>)
Caesb	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CAM	Função Objetivo Custo anual médio de operação do sistema
CART	Método de árvore de Classificação e Regressão (<i>Classification and Regression Tree</i>)
CDI	Certificado de Depósito Interbancário
CODEPLAN	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
CONF	Função Objetivo Confiabilidade
CPPP	Função Objetivo Custo do pior primeiro percentil
DAP	Planejamento Dinâmico Adaptativo (<i>Dynamic Adaptive Planning</i>)
DAPP	Caminhos Dinâmicos Adaptativos (<i>Dynamic Adaptive Policy Pathways</i>)
DF	Distrito Federal
DMDU	Tomada de Decisão Mediante Incertezas Profundas (<i>Decision Making Under Deep Uncertainty</i>)
DU	Incetezas Profundas (<i>Deep Uncertainty</i>)
DU Pathways	<i>Deeply Uncertain Pathways</i>
EA	Algoritmo Evolucionário
EE	Custos com Energia Elétrica
EM	Modelagem Explortria (<i>Exploratory Modeling</i>)
EOA	Análise de opções de Engenharia (<i>Engineering Options Analysis</i>)
ETA	Estação de Tratamento de gua
FERAH	Ferramenta de Apoio a Estudos Hidrológicos
FGN	Ruído Gaussiano Fracionário (<i>Fractional Gaussian Noise</i>)

FIP	Fator de Incertezas Profundas
FO	Função Objetivo
FR	Função Objetivo Frequência de Restrição
GBT	Árvores Impulsionadas Por Gradiente
GDF	Governo do Distrito Federal
GR	Medidas de restrição de consumo
GT	Transferências de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Teoria de Lacunas Decisórias (<i>Information Gap</i>)
IGP-M	Índice Geral de Preços-Mercado
INF	Infraestruturas
INPC	Índice Nacional de Preços ao Consumidor
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IRAS	<i>Interactive River-Aquifer Simulation</i>
LHS	Amostragem Hipercubo Latino (<i>Latin HyperCube Sampling</i>)
mFGN	Ruído Gaussiano Fracionário Modificado (<i>Modified Fractional Gaussian Noise</i>)
MT	Custos com Material
MOEA	Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo
MORDM	Tomada de Decisão Multiobjetiva Robusta (<i>Multiobjective RDM</i>)
MS	Borg <i>Master-Worker Borg MOEA</i>
MOEA	
OC	Outros Custos
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P	Custos com pessoal
PA	Pagamento Anual dos Custos com Operação do Sistema
PIB	Produto Interno Bruto
PRIM	Método de Regras de Indução Paciente (<i>Patient Rule Induction Method</i>)
PTARH	Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
RA	Região Administrativa
RdF	Riscos de Falha (<i>Risk of Failure</i>)
RDM	Tomada de Decisão Robusta (<i>Robust Decisionmaking</i>)
RI	Remuneração com Investimentos

SARIMA	Modelos Autorregressivos Integrados de Médias Móveis Sazonal
SAUA	Sistema de Abastecimento Urbano de Água
SD	Análise de Cenários (<i>Scenario Discovery</i>)
TCU	Tribunal de Contas da União
UNB	Universidade de Brasília
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
VPL	Função Objetivo Valor presente líquido do custo de infraestrutura
WEAP	<i>Water Evaluation and Planning</i>

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas em escala global possuem cada vez mais evidências científicas e estão relacionadas à ocorrência mais intensa e frequente de fenômenos extremos, afetando diversas sociedades ao redor do globo. Atualmente, quase metade da população mundial vivencia escassez de água em algum período do ano, e milhões de pessoas já estão expostas à insegurança hídrica (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, IPCC, 2022). Em quase um terço das maiores metrópoles mundiais, a demanda por água excederá a disponibilidade hídrica superficial até 2050 (Flörke *et al.*, 2018).

A crescente demanda por água se mostra como agravante desse contexto: nos últimos 100 anos, houve um aumento do consumo hídrico da ordem de 6 vezes, alavancado pelo crescimento populacional, pelo desenvolvimento econômico e pelas mudanças nos padrões de consumo (Wada *et al.*, 2016). Burek *et al.* (2016) estimam que a demanda hídrica global aumentará entre 20% e 33% até 2050, o que corresponde a um volume entre 360 e 660 km³ de água por ano.

Todas essas problemáticas se fazem presentes de maneira particularmente alarmante no ambiente urbano, dificultando o fornecimento de água em quantidade e qualidade adequadas, e desafiando a manutenção da segurança de diversos sistemas de abastecimento ao redor do globo. Diversas grandes metrópoles no mundo já vivenciaram crises de abastecimento: Los Angeles, Melbourne e Cidade do Cabo são alguns exemplos (Zhang *et al.*, 2019). Projeções indicam que entre 2016 e 2050, as cidades de grande porte enfrentando escassez hídrica pode aumentar de 193 para 294, incluindo 20 megalópoles (He *et al.*, 2021).

A América do Sul possui particularidades que potencializam as incertezas relacionadas ao futuro do abastecimento urbano de água: é a região mais urbanizada do mundo, com mais de 80% de sua população vivendo em cidades; e de modo geral possui um processo histórico de ocupação desordenada dos espaços urbanos, com alta taxa de informalidade e infraestrutura frágil e espacialmente concentrada; e mananciais para abastecimento de água localizados em regiões distantes dos grandes centros urbanos (Rieu-Clarke *et al.*, 2015). Segundo projeções climáticas recentes, o Brasil – detentor do maior Produto Interno Bruto (PIB) da América do Sul em 2022 – poderá ser significativamente afetado pelas mudanças

climáticas, com eventos hidrológicos extremos cada vez mais frequentes, e redução nas vazões de diversos rios importantes que atravessam o país (IPCC, 2021). Exemplos desse contexto puderam ser observados em São Paulo em 2014, e mais recentemente no Distrito Federal (DF), onde a associação de precipitações abaixo da média histórica por anos seguidos, ocupação desordenada do solo, aumento da população e desafios inerentes aos processos de gestão e planejamento desses sistemas resultaram em uma grave crise hídrica entre os anos de 2016 e 2018 (Governo do Distrito Federal - GDF, 2017b). Dentro desse panorama, existem ainda incertezas que muitas vezes não possuem meios consolidados de previsão: mudanças no contexto regulatório da prestação de serviços de abastecimento de água, efetividade na redução do consumo de água por meio da adoção de racionamento e tarifas de contingência, definição dos reajustes na cobrança pelo serviço e vulnerabilidades associadas a inequidades socioeconômicas são alguns exemplos.

A tarefa de planejar a gestão desses sistemas a longo prazo (da ordem de 40 anos) passa pela análise de diversos tipos de incertezas e riscos. Muitas abordagens tradicionais de planejamento e apoio à tomada de decisão utilizam estratégias que associam investimento em infraestrutura – construção ou ampliação de reservatórios, barramentos e estações de tratamento – a medidas de gestão de curto prazo, como restrições ao consumo de água (Trindade *et al.*, 2020) e uso de tarifas de contingência (Governo do Distrito Federal - GDF, 2017b). O planejamento de quais ações adotar e quando adotá-las é feito de maneira antecipada, tomando-se como referência apenas o cenário futuro mais provável, gerando planos com baixa adaptabilidade e com pouca oportunidade para ajustes. Esse tipo de abordagem já apresentou benefícios a diversos sistemas de abastecimento urbano de água (SAUA), contudo ainda produz soluções dispendiosas em termos econômicos, sociais e ambientais, dificultando a manutenção da sustentabilidade financeira e da segurança hídrica desses sistemas a longo prazo (Gleick, 2003).

Além disso, esses planos de gestão muitas vezes não consideram a possibilidade de mudanças no contexto do sistema em estudo, tampouco a presença de incertezas profundas, que são elementos dotados de características desconhecidas ou discordantes para as partes interessadas ou para os especialistas – como a probabilidade de ocorrência de um evento, a delimitação das condições de contorno, os desdobramentos futuros, a influência provocada na performance do sistema e a possibilidade de interação com outras condições presentes no contexto em estudo (Trindade *et al.*, 2020; Marchau *et al.*, 2019, Walker *et al.*, 2013a). Ainda

que não tenham suas características bem conhecidas, as incertezas profundas podem afetar a performance dos sistemas em que estão inseridas. No caso de SAUAs, algumas incertezas profundas identificadas na literatura são a definição de tarifas de consumo de água, o aumento da demanda por esse recurso, a sustentabilidade econômico-financeira das concessionárias de abastecimento e a efetividade da aplicação de medidas de racionamento e tarifação do consumo excessivo (Trindade *et al.*, 2020).

Em contrapartida aos métodos tradicionais de planejamento e apoio à tomada de decisão, novas técnicas baseadas em princípios adaptativos e análise de incertezas profundas têm sido desenvolvidas. Essas abordagens – conhecidas como Tomada de Decisão Mediante Incertezas Profundas (*Decision Making Under Deep Uncertainty*, DMDU) buscam se adequar à realidade do mundo conforme os cenários futuros se revelam, viabilizando a construção de planos que se comprometam com ações de gestão no curto prazo e deixem as opções de gestão de longo prazo em aberto. Tais medidas serão adotadas apenas quando e caso necessário, o que é indicado pelo monitoramento constante do estado de mundo do sistema e dos riscos associados. Essa lógica de gestão aproxima-se da dinâmica de tomada de decisão necessária para a operação de sistemas complexos, como diversos SAUAs, e resultam em estratégias com desempenho satisfatório frente a vários cenários possíveis, em contraponto a planos que possuem performance excelente em um único cenário (ou pequeno conjunto de cenários) (Marchau *et al.*, 2019). Estudos têm mostrado que a aplicação desses princípios possibilita a construção de planos – conhecidos como portfólios ou políticas – mais robustos, mais resistentes às incertezas profundas, e com menor custo de implementação e manutenção (Walker *et al.*, 2013a; Zeff *et al.*, 2016; Trindade *et al.*, 2019). Conseqüentemente, os sistemas de abastecimento urbano de água que se valem de tais estratégias tornam-se mais sustentáveis do ponto de vista econômico-financeiro, sem ter sua confiabilidade prejudicada.

Dentre as diversas abordagens adaptativas resistentes a incertezas profundas, este trabalho se aprofundou na técnica denominada *Deeply Uncertain Pathways* (DU Pathways), desenvolvida por Trindade *et al.* (2019). Desenvolvida a partir da metodologia Tomada de Decisão Multiobjetiva Robusta (*Multiobjective Robust Decision Making*, MORDM), DU Pathways desenvolve propostas de planejamento e gestão robustas e flexíveis, utilizando sistemas baseados em monitoramento de estados de mundo para deflagrar tomadas de decisão adaptativas. Essa técnica emprega otimização multiobjetiva para explorar relações

de compromisso entre objetivos almejados por diferentes partes interessadas de um sistema, investigando cenários com incertezas profundas que levam a vulnerabilidades em sistemas complexos (Trindade *et al.*, 2019). Por envolver processos de otimização sob uma perspectiva multiobjetiva, *DU Pathways*, *MORDM* e outras aplicações *DMDU* se revelam de grande utilidade para construção de abordagens em sistemas hídricos complexos, nos quais a negociação e conciliação de interesses de diversos atores se mostram fundamentais.

No âmbito da construção de políticas adaptativas resistentes a incertezas profundas, novas aplicações de programas e algoritmos empregados na gestão e planejamento de sistemas hídricos vêm sendo desenvolvidas. Contudo, essas ferramentas ainda possuem diversas limitações de uso no planejamento de SAUAs, como representação deficiente de certas condições de incerteza, códigos complexos e computacionalmente dispendiosos, e muitas vezes inacessibilidade financeira, por exigirem licenças de alto custo para seu acesso (Trindade *et al.*, 2020). Tais restrições motivaram o desenvolvimento do programa *WaterPaths*: um simulador de sistemas hídricos com alta eficiência computacional, adaptável a diversos cenários, e desenvolvido especificamente para apoiar o planejamento adaptativo de SAUAs em contextos envolvendo incertezas profundas. Seu funcionamento se apoia na construção de diversos cenários possíveis para o futuro do sistema, ao mesmo tempo em que testa opções de portfólios (adaptativos) de planejamento nesses estados de mundo, avaliando a performance das alternativas de gestão considerando uma perspectiva multiobjetiva (Trindade *et al.*, 2020).

Para geração de diversos cenários possíveis do SAUA em estudo e exploração do desempenho de portfólios de gestão nesses cenários – dois dos principais conceitos associados a abordagens adaptativas e modelagens exploratórias – *WaterPaths* solicita dados de entrada representativos do sistema, como séries temporais sintéticas de vazão e evaporação, séries temporais de consumo de água e infraestrutura instalada (reservatórios e estações de tratamento).

A aplicação da abordagem *DU Pathways*, por intermédio do programa *WaterPaths*, para planejamento do abastecimento urbano de água do Distrito Federal se mostra pertinente, por ser esse um espaço que possui diversas condições de incerteza, como fatores relacionados ao clima, ao uso e ocupação do solo, ao contexto regulatório, à sustentabilidade financeira da concessionária de abastecimento, e à demanda por recursos hídricos (GDF, 2017b).

Soma-se a esses fatores, ainda, a existência de inequidades socioeconômicas consideradas intrarregionais, pois coexistem em um mesmo SAUA, e que estão enraizadas no processo histórico de ocupação do Distrito Federal. Assim, o planejamento adaptativo de longo prazo – um dos princípios basilares da abordagem utilizada – consiste em solução potencialmente útil para tornar mais robusto e adaptável o planejamento do abastecimento de água nesse sistema. No presente trabalho, será adotado o conceito de robustez discutido por Walker *et. al* (2013a), em que planos robustos são aqueles que apresentam desempenho satisfatório em diversos cenários possíveis, ao mesmo tempo em que são facilmente ajustáveis a condições diversas, inclusive aquelas com pequenas chances de ocorrência.

No presente trabalho, pretendeu-se incorporar algumas sugestões de pesquisa identificadas em Giacomazzo (2020) e detalhar o sistema modelado considerando novas séries climáticas e refinamento dos fatores de incerteza profunda relacionados à estrutura tarifária vigente e a outros aspectos que possam impactar o desempenho das políticas de gestão analisadas. Além disso, este trabalho buscou analisar como diferentes perfis socioeconômicos de áreas dentro do mesmo SAUA podem afetar a adaptação e performance das políticas adaptativas, considerando contextos com incertezas profundas. Por fim, foram avaliadas a robustez das estratégias de gestão adaptativas quando essas são submetidas a cenários de incertezas profundas mais desafiadores, e no descobrimento das condições de incerteza que mais contribuem para falha ou sucesso no desempenho do SAUA.

Este trabalho está organizado em sete capítulos, sendo eles:

- Capítulo 1: Introdução, que apresenta a contextualização do problema de pesquisa;
- Capítulo 2: Objetivos, em que foram definidos os objetivos, geral e específicos, a serem alcançados;
- Capítulo 3: Revisão Bibliográfica, onde apresenta-se o embasamento teórico e a revisão da Literatura para subsidiar a execução desta pesquisa;
- Capítulo 4: Caracterização da área de estudo, em que são apresentados os detalhes do histórico e do contexto do SAUA do Distrito Federal relevantes para esta pesquisa;
- Capítulo 5: Metodologia, em que são elencadas e descritas as etapas metodológicas que estruturaram este trabalho;

- Capítulo 6: Resultados e Discussão, em que são apresentados e discutidos os resultados gerados com a execução das etapas metodológicas;
- Capítulo 7: Conclusões e Recomendações, em que se apresentam as principais conclusões e reflexões a respeito desta pesquisa.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é construir e analisar estratégias de planejamento e gestão do SAUA do DF no longo prazo – que sejam flexíveis, adaptativas e resistentes a incertezas profundas – buscando diagnosticar condições de vulnerabilidade na operação do sistema e o impacto de incertezas e de diferenças socioeconômicas intrarregionais no desempenho e robustez dessas estratégias.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Desenvolver séries temporais sintéticas de vazão e evaporação que reflitam os registros históricos do Distrito Federal, mantendo seus padrões de sazonalidade, correlação intra e interanual;
- b) Aperfeiçoar a modelagem do SAUA do DF sob a perspectiva de incertezas profundas, incorporando a percepção dos atores estratégicos responsáveis por sua operação e regulação;
- c) Analisar a performance do SAUA do DF a longo prazo (horizonte temporal de 40 anos) considerando o contexto de incertezas profundas;
- d) Investigar possíveis diferenças de performance dos portfólios entre áreas de serviço (AS) com diferentes perfis socioeconômicos;
- e) Identificar quais condições de incerteza afetam o SAUA do DF e se mostram determinantes para performance do sistema.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma etapa anterior e necessária à estruturação da metodologia deste trabalho consistiu em explorar a literatura existente sobre DMDU, apresentando os conceitos fundamentais para assimilação desse tema, e entendendo em que medida seus princípios são aplicáveis ao contexto de planejamento de sistemas de abastecimento urbano de água. O estudo do tema DMDU também envolveu a identificação de suas diferentes abordagens e respectivas aplicações. Foram estudados ainda os principais algoritmos, modelos e instrumentos computacionais que permitem a aplicação das abordagens DMDU em problemas de recursos hídricos e SAUAs.

Em seguida, os esforços de leitura e estudo foram direcionados às abordagens MORDM, *DU Pathways* e emprego deste último no programa *WaterPaths*, sendo apresentados seus princípios de funcionamento, sua forma de operação e sua dinâmica computacional, além das vantagens de seu uso em relação aos demais modelos já empregados no planejamento e tomada de decisão envolvendo recursos hídricos e abastecimento de água.

Dessa forma, esta seção apresenta os conceitos e princípios que serviram de embasamento teórico para desenvolvimento desta pesquisa, estando estruturada nos seguintes itens: aspectos relacionados ao planejamento e tomada de decisão em SAUAs, componentes e abordagens DMDU, e recursos computacionais e algoritmos que permitem a aplicação de tais ferramentas em sistemas hídricos, com destaque para o programa *WaterPaths*.

3.1. ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA: PLANEJAMENTO EM CENÁRIOS DE INCERTEZA

A sociedade atual vem sendo desafiada a lidar com mudanças cada vez mais frequentes e rápidas das condições naturais e antrópicas ao redor do planeta. A temperatura média global aumentou em cerca de 0,85°C entre 1880 e 2012, fenômeno provocado sobretudo pela ação do homem (Allen *et al.*, 2018). O desenvolvimento econômico global, o crescimento populacional aliado ao aumento da expectativa de vida e a elevação de renda da população, ainda que possuam distribuição desigual ao redor do mundo, foram capazes de elevar o

padrão mundial de consumo, o qual se apoiou em atividades baseadas em combustíveis fósseis.

Conseqüentemente, a poluição e degradação ambiental alcançaram níveis sem precedentes. A alta concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e o aumento da temperatura média global estão ocorrendo em velocidade superior às alterações do passado, provocadas por causas naturais (Allen *et al.*, 2018). Embora essas mudanças se manifestem de forma distinta ao redor do planeta, estudos climáticos apontam uma mudança consistente na temperatura média global, levando a uma maior frequência na ocorrência de eventos extremos.

As alterações hidrológicas causadas pelas mudanças climáticas representam duplo impacto à sociedade: de forma direta, influenciam os ciclos hidrológicos, e de forma indireta, geram riscos associados à produção de energia hidrelétrica, à segurança alimentar e ao desenvolvimento socioeconômico das comunidades urbanas e rurais (IPCC, 2022). Diversas autoridades governamentais já consideram que as mudanças climáticas e eventos hidrológicos extremos consistem em fatores que podem afetar de forma importante a quantidade e qualidade de água disponíveis para abastecimento da população (IPCC, 2022).

A pressão sob os recursos hídricos é agravada por outro fator: a manutenção do crescimento populacional mundial a longo prazo¹, que eleva a demanda por água ao mesmo tempo que aumenta o lançamento de efluentes domésticos e industriais em rios, lagos e mares. Burek *et al.* (2016) estimam que houve uma elevação de consumo hídrico da ordem de 6 vezes nos últimos 100 anos, e indicam projeções de aumento na demanda hídrica global entre 20% e 33% até 2050. Paralelamente, as fontes de água potável ao redor do globo têm sido cada vez mais contaminadas por resíduos domésticos e industriais, fertilizantes de uso agrícola e metais pesados, reduzindo a qualidade e quantidade de água disponível para abastecimento humano. Um aspecto importante dessa problemática é o fato de que as regiões com maiores índices de crescimento populacional também são aquelas com menores índices de desenvolvimento socioeconômico, e com comunidades mais vulneráveis a crises de abastecimento de água (IPCC, 2022). Outro ponto digno de nota é o perfil de crescimento

¹ Segundo projeções demográficas oficiais, em cenários com maior probabilidade de ocorrência, a população mundial total permanecerá em crescimento desacelerado ao menos até o ano de 2100, embora haja situações particulares de encolhimento populacional em algumas regiões, notadamente a Europa (*In: Nações Unidas, 2019*)

da população do Brasil e de diversos outros países em desenvolvimento, consideravelmente mais acelerado para a porção urbana em relação à rural, o que leva a ocupações e alterações desordenadas no uso do solo, comprometendo espaços que necessitam de proteção ambiental e também prejudicando o fornecimento de infraestrutura adequada à população (*In: Nações Unidas, 2018*).

Todas as condições expostas se mostram particularmente alarmantes no contexto urbano e ameaçam o fornecimento de água em quantidade e qualidade adequadas para a população que vive nesses ambientes (Silva, 2013). Esses fatores, associados a particularidades sociais, econômicas e políticas, já deflagraram crises de abastecimento ao redor do globo: Melbourne (2000 a 2010), Los Angeles (2012 a 2016) e Cidade do Cabo (2015 a 2018) são exemplos de grandes metrópoles que chegaram próximo ao colapso do sistema de fornecimento de água (Zhang *et al.*, 2019). Para essas e diversas outras cidades, manter o abastecimento de água de forma segura têm se tornado um desafio.

A América do Sul possui particularidades geográficas e históricas que agravam a vulnerabilidade hídrica em muitas de suas regiões, cabendo destaque ao processo de urbanização acelerado e desordenado, com alta ocupação informal do espaço urbano e desigualdades no fornecimento de serviços públicos (como saneamento básico); e a localização dos recursos hídricos mais abundantes, frequentemente em planícies afastadas das grandes metrópoles sul-americanas (Rieu-Clarke *et al.*, 2015). Projeções climáticas recentes apontam que o Brasil será afetado de maneira significativa pelos efeitos das mudanças climáticas, com aumento da frequência de eventos hidrológicos extremos e quedas nas vazões de cursos de água de considerável relevância regional (IPCC, 2021). Riscos de colapso no abastecimento urbano já foram realidade para São Paulo em 2014, e mais recentemente para o Distrito Federal. Entre 2016 e 2018, essa região presenciou redução drástica nos níveis dos reservatórios responsáveis por seu abastecimento urbano, chegando a operar abaixo de 20% da capacidade máxima operacional no caso do Reservatório do Descoberto. A gravidade da situação levou o Governo do Distrito Federal a decretar Situação de Emergência e a adotar medidas de restrição ao uso da água (GDF, 2017b). Os aspectos mais relevantes dessa crise no fornecimento de água serão apresentados nesta Revisão Bibliográfica.

Alguns sistemas hídricos, além de enfrentarem desafios como alterações no uso e ocupação do solo, mudanças climáticas, desmatamento de áreas de mananciais e poluição das fontes de água; também precisam lidar com alterações nos dispositivos legais que regulam a prestação dos serviços de saneamento básico. Um exemplo recente está no novo marco regulatório do saneamento básico no Brasil, definido através da Lei nº 14.026/2020. Esse dispositivo ampliou a possibilidade de participação de empresas privadas na prestação do saneamento básico, e também ampliou possibilidades de arranjos para execução dos serviços associados. Tais mudanças podem alterar a configuração atual das companhias e concessionárias, bem como trazer incertezas em relação à prestação dos serviços públicos de forma a atender os princípios de universalidade e integralidade trazidos pelos instrumentos legais e constitucionais.

Ao avaliar os contextos em que sistemas de abastecimento urbano de água operam, é possível identificar diversas fontes de incertezas, tanto profundas quanto bem caracterizadas. Essas condições podem limitar a capacidade de predição de cenários futuros para sistemas hídricos e de abastecimento urbano de água, dificultando seu planejamento a longo prazo (Haasnoot *et al.*, 2011). Conseqüentemente, o gerenciamento de riscos e incertezas terá cada vez mais importância no âmbito da gestão e planejamento desses sistemas (Borgomeo *et al.*, 2018).

Marchau *et al.* (2019) definem as incertezas envolvidas no processo de planejamento e tomada de decisão como a diferença entre o conhecimento disponível e o conhecimento que os gerenciadores acreditam ser necessário para adotar uma estratégia ótima de gerenciamento ou planejamento. Walker *et al.* (2013b) mencionam três dimensões de qualquer incerteza: localização – onde a incerteza se manifesta dentro do sistema; nível – ponto no qual a incerteza se encontra entre a total ignorância e o conhecimento determinístico; e natureza – origem da incerteza, se na falta de conhecimento ou na variabilidade inerente ao evento ou fator. Haasnoot *et al.* (2011) categorizaram as incertezas em três tipos:

- Incertezas naturais: envolvem a componente ambiental do sistema, contemplando variabilidades espaciais, temporais ou epistemológicas – como eventos climáticos extremos e seus impactos, por exemplo;
- Incertezas sociais: surgem da incerteza nas respostas humanas, em seus valores e objetivos futuros, na capacidade de adaptação e aprendizado da sociedade e em processos de tomadas de decisão envolvendo diferentes partes interessadas;

- Incertezas tecnológicas: provenientes de modelagens de sistemas complexos, como incertezas nos dados de entrada do modelo, de seus parâmetros, e falta de conhecimento dos processos.

Complementarmente às classificações supracitadas está aquela mais relevante para este trabalho: a divisão das incertezas em bem caracterizadas e profundas. Incertezas bem caracterizadas podem ser associadas a distribuições de probabilidade de ocorrência bem definidas. Já as incertezas profundas são definidas como situações de incerteza em que especialistas não conhecem ou as partes interessadas não concordam sobre: a distribuição de probabilidades de ocorrência de eventos, o contexto externo do sistema, como ele funciona e quais suas delimitações, desdobramentos e importância, ou mesmo quais os objetivos o planejamento deve alcançar (Trindade *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2015; Walker *et al.*, 2013a). Frente a todas as problemáticas já apresentadas e presentes em SAUAs, fica evidente que o planejamento de diversos desses sistemas envolve incertezas profundas, especialmente quando são considerados cenários de longo prazo. A título de exemplificação, algumas condições que podem ser consideradas incertezas profundas são: os impactos das mudanças climáticas, a definição do valor das tarifas de fornecimento de água, os custos operacionais relacionados à manutenção das redes de abastecimento, a efetividade de medidas de incentivo à economia de água junto aos consumidores, as alterações nos dispositivos legais que regem a prestação do serviço de abastecimento de água e os usos competitivos desse recurso. Nesse sentido, Walker *et al.* (2013a) ressaltam que nem todas as incertezas sobre o futuro podem ser eliminadas, e ignorá-las limita a capacidade de tomar ações corretivas, leva à perda de oportunidades e pode resultar na elaboração de planejamentos vulneráveis a longo prazo.

Os métodos tradicionais de planejamento e suporte à tomada de decisão utilizam ferramentas que consideram as incertezas como resultado de falta de informação, ou de variações aleatórias às quais pode ser atribuída uma probabilidade de ocorrência, conceito que aborda apenas as incertezas bem caracterizadas. O planejamento a partir dessa perspectiva se apoia em ações ótimas para o cenário com maior chance de ocorrência, visando a alcançar uma performance que, apesar de ótima, ocorre em um número pequeno de cenários futuros. A primeira dificuldade apresentada por esse tipo de abordagem é sua capacidade reduzida de refletir a diversidade de preferências e objetivos em um contexto com diversas partes interessadas ou vários tomadores de decisão (Singh *et al.*, 2015; Walker *et al.*, 2013a).

A segunda questão, ainda mais relevante, é a vulnerabilidade desse tipo de planejamento a contextos de mudanças constantes e incertezas profundas, o que pode apresentar resultados indesejáveis caso o estado de mundo se revelar distinto daquele cenário único, ou pequeno conjunto de cenários, com maior probabilidade de ocorrência. Walker *et al.* (2013a) resumem esse dilema da seguinte forma: os analistas frequentemente focam sua pergunta no que acontecerá no futuro, ficando reféns de sistemas e modelagens preditivos, quando o mais adequado seria indagar quais ações de planejamento são mais apropriadas para cada cenário futuro possível, de forma a saber como agir caso uma certa possibilidade de desdobramento venha a se concretizar.

A aplicação dos métodos tradicionais de planejamento e suporte à tomada de decisão em sistemas de abastecimento urbano de água resultam em estratégias pouco flexíveis, que incluem investimentos na expansão de infraestrutura – construção ou ampliação de reservatórios, barramentos e estações de tratamento – para gerir riscos de desabastecimento a longo prazo. Ao mesmo tempo, os tomadores de decisão ou planejadores optam por adotar sobretudo restrições de uso da água perante crises hídricas imediatas ou esperadas em um horizonte próximo (Gleick, 2003). Tais abordagens já beneficiaram diversas comunidades, contudo apresentam desvantagens relevantes: a construção ou ampliação de infraestruturas acarreta altos custos econômicos, sociais e ambientais, e por vezes é adotada em situações em que outras opções de gestão poderiam garantir a manutenção da segurança hídrica do sistema. Além disso, as medidas de racionamento trazem prejuízos para usuários e concessionária de abastecimento, ameaçando a sustentabilidade econômico-financeira dessas companhias. Ainda que necessárias em alguns casos, tais medidas devem ser adotadas de forma criteriosa e racional. Outra limitação relevante é a rigidez dessas estratégias de planejamento: o rol de ações e o momento em que serão adotadas costumam ser pouco flexíveis, sendo pouco adaptáveis frente a desdobramentos inesperados do futuro.

Frente à problemática apresentada, o planejamento e gestão de recursos hídricos vem evoluindo nas últimas décadas no sentido de incorporar múltiplos interesses e partes interessadas, mudanças pouco previsíveis ou imprevisíveis, e contextos de mudanças rápidas e constantes. Normalmente referenciadas como adaptativas, essas abordagens buscam propor estratégias mais sustentáveis do ponto de vista social, ambiental e econômico, e que sejam mais flexíveis a mudanças (Loucks e Van Beek, 2017).

Dentro das abordagens adaptativas, vêm ganhando força aquelas que se propõe a lidar não apenas com incertezas bem caracterizadas, mas também com incertezas profundas: as abordagens DMDU. As técnicas de gestão e planejamento DMDU buscam construir planos (portifólios ou políticas) robustos, que tenham performance satisfatória em um grande número de futuros possíveis, dentro de contextos com incertezas profundas e baixa previsibilidade (Haasnoot *et al.*, 2011).

Para tanto, essas abordagens se apoiam no comprometimento com ações de curto prazo, mantendo “em aberto” diversas medidas de gestão de longo prazo, que podem ser alteradas para se tornarem compatíveis com os desdobramentos de cenários futuros. A decisão de tomar novas ações é pautada pelo monitoramento constante dos estados de mundo e por indicadores de risco previamente selecionados, que acionam novas medidas caso ultrapassem limites aceitáveis, permitindo um aprendizado cada vez mais profundo sobre a dinâmica do sistema (Walker *et al.*, 2013a). O emprego dessas técnicas em contextos com incertezas profundas se mostra particularmente útil, já que em tais situações muitas vezes não é possível definir distribuições de probabilidade para a ocorrência de eventos causadores de falhas do sistema.

No âmbito da gestão de sistemas de abastecimento urbano de água, as políticas ou portifólios adaptativos e resistentes a incertezas profundas podem incluir como ações de longo prazo a construção ou ampliação de reservatórios, de redes de abastecimento, de estações de tratamento e de unidades de transferência de água; e como ações de curto prazo o gerenciamento de demandas, a adoção de racionamento e as transferências de água bruta ou tratada entre sistemas produtores distintos. As estratégias DMDU já mostraram benefícios tanto em termos de confiabilidade quanto em termos de sustentabilidade econômico-financeira (Herman *et al.*, 2014; Zeff *et al.*, 2014; Zeff *et al.*, 2016; Trindade *et al.*, 2019). Cabe ressaltar que a construção de planos adaptativos deve ser precedida de um estudo detalhado do sistema em análise, caracterizando cada ação a ser considerada no planejamento, inclusive no que tange às interações dessas medidas com outros sistemas ou atores, seus custos e prazos de licenciamento e execução. As abordagens DMDU serão descritas no item 3.2.2 desta Revisão Bibliográfica.

3.2. PLANEJAMENTO ADAPTATIVO E TOMADA DE DECISÃO MEDIANTE INCERTEZAS PROFUNDAS (DMDU): COMPONENTES E ABORDAGENS

A aplicação da perspectiva DMDU traz diversos benefícios ao processo de planejamento e tomada de decisão em cenários de incertezas profundas, permitindo o desenvolvimento de planos robustos, ou seja, capazes de produzir resultados satisfatórios em um grande número de estados de mundo possíveis (Walker *et al.*, 2013b).

Apesar da grande variedade de abordagens baseadas no conceito de DMDU, todas elas podem ser consideradas enfoques que visam ao planejamento adaptativo, possuindo os seguintes princípios centrais: criar uma visão estratégica das metas e objetivos do planejamento que seja compartilhada pelas diversas partes interessadas, explorar estratégias e alternativas para adaptação a diferentes estados de mundo, buscar o comprometimento com ações de curto prazo e ao mesmo tempo manter opções de medidas de longo prazo “em aberto” para possíveis ajustes no planejamento, e preparar uma estrutura baseada em gestão de riscos que seja capaz de guiar a tomada de decisão no futuro. Essa estrutura de orientação para suporte à tomada de decisão geralmente inclui um sistema de monitoramento que permite o acompanhamento de indicadores de risco selecionados previamente – os chamados riscos de falha (*Risk of Failure* – RdF, em inglês) – cujos limites de tolerância, caso extrapolados, acionam novas ações ou ações de contingência (Walker *et al.*, 2013a). Os principais componentes e métodos baseados no conceito DMDU são apresentados a seguir.

3.2.1. Componentes principais das abordagens DMDU

Os elementos mais comuns presentes nas abordagens DMDU correspondem a elementos que integram ciclos iterativos, executados diversas vezes, não havendo uma ordem específica de aplicação, tampouco obrigatoriedade de utilização de todos eles. Em geral as abordagens DMDU fazem uso dos seguintes elementos (Marchau *et al.*, 2019):

- Delimitação da análise: consiste em definir o problema ou oportunidade em estudo, especificar a estrutura do sistema, suas delimitações, a disposição geográfica de seus componentes e interrelações entre eles, os objetivos e indicadores de performance; e elencar as ações de gerenciamento para construção dos portfólios ou políticas;
- Análise exploratória de incertezas e de estados de mundo: consiste no detalhamento das incertezas, incluindo as discordâncias a respeito das probabilidades de ocorrência, das forças

externas, da estrutura do sistema, dos indicadores de desempenho e do valor de cada um dos possíveis resultados;

- Escolha de ações iniciais e ações de contingência: neste item busca-se representar as relações de custo benefício nas escolhas das ações e portfólios. As ações iniciais e ações de contingência são selecionadas, além dos meios para ajustes futuros à medida que o futuro se desdobra e mais conhecimento sobre o sistema é adquirido. Esse elemento também auxilia na construção de ferramentas de comunicação entre partes interessadas e de monitoramento de indicadores de resultado;

- Iteração e reexame: consiste em colocar em prática as ações selecionadas, monitorando a performance da política e efetuando ajustes, quando e se necessário.

Além dos elementos apresentados, muitas abordagens fundamentadas no conceito DMDU utilizam os seguintes conceitos e ferramentas:

- Planejamento Baseado em Suposições (*Assumption Based Planning* – sigla ABP, em inglês): busca incluir no planejamento ações que reduzam a vulnerabilidade de uma política aos eventos futuros. É uma técnica que foca na identificação do momento no qual novas ações precisam ser tomadas, buscando proteger um plano contra falhas. Essa técnica também procura identificar as condições de um cenário que estão mais atreladas ao sucesso dos planos, e quais os tornam mais suscetíveis a falhas. Além disso, a técnica ABP ressalta a importância de definir ações de “cobertura”, que protegem o planejamento em casos de falha ou suposições que não foram concretizadas (Dewar *et al.*, 1993);

- Modelagem Exploratória (*Exploratory Modeling* – sigla EM, em inglês): técnica de pesquisa que utiliza extensivamente experimentos computacionais para produzir e explorar um grande número de cenários futuros possíveis, estruturas de modelagens alternativas, e sistemas com valores não convencionais. Com isso, permite-se que as partes interessadas explorem diversas hipóteses e tenham uma melhor compreensão da dinâmica do sistema. Assim, busca cobrir boa parte da variedade de cenários possíveis para o futuro, estimulando a pesquisa por estratégias que possam responder de forma satisfatória à maior parte deles (Bankes, 1993, Walker *et al.*, 2013b);

- Análise de Cenários (*Scenario Discovery* – sigla SD, em inglês): ferramenta usada para produzir diversos estados de mundo possíveis para o sistema, distinguindo aqueles nos quais as políticas propostas atingem seus objetivos, e aqueles nos quais os planos falham em atingir as metas predefinidas. Importante destacar que o conceito de falha ou sucesso de uma política é normalmente pautado por critérios de performance e metas previamente

estabelecidos pelas partes interessadas. Nesse sentido, a técnica SD explora a ideia de que o conceito de sucesso ou falha pode variar muito entre os atores de um sistema, bem como o comportamento de cada um deles nos diversos cenários. Portanto, um planejamento a longo prazo adequado deve considerar a existência dessa variedade e complexidade, para que seja resistente ao surgimento de incertezas e mudanças (Hadjimichael *et al.*, 2020; Walker *et al.*, 2013a).

3.2.2. Abordagens DMDU

A seguir serão apresentadas as principais abordagens fundamentadas no conceito de DMDU, seguidas de considerações sobre modelos e algoritmos utilizados para sua aplicação, com ênfase na apresentação do programa *WaterPaths*.

Planejamento Dinâmico Adaptativo

O Planejamento Dinâmico Adaptativo (*Dynamic Adaptive Planning* – sigla DAP, em inglês) foca na implementação de um plano inicial, ajustado à medida que os estados de mundo se revelam no decorrer do tempo e novos conhecimentos são incorporados ao processo de planejamento e tomada de decisão. É baseada na manutenção de um programa de monitoramento, que acompanha parâmetros previamente selecionados pelos tomadores de decisão, e adota novas ações caso valores “limites” desses parâmetros sejam atingidos, em um processo explícito de adaptação ao longo do tempo (Kwakkel *et al.*, 2010).

Duas fases são fundamentais em sua aplicação: a primeira é a fase de projeto, quando são definidos o plano dinâmico adaptativo com ações iniciais e de contingência, o plano de monitoramento, e os RdFs que apontarão a necessidade de se adotar novas ações. Na segunda etapa, a de implementação, os planos formulados na primeira fase são implementados e ações de contingência são adotadas caso o monitoramento aponte essa necessidade (Marchau *et al.*, 2019).

A abordagem DAP foi apresentada nos estudos de Walker *et al.* (2001) e estendida para diversas áreas do conhecimento, como planejamento estratégico de aeroportos (Kwakkel *et al.*, 2010), implementação de estruturas de transporte urbano (Marchau *et al.*, 2008), e gestão

de riscos de inundação nos Países Baixos considerando cenários de mudanças climáticas (Rahman *et al.*, 2008).

Caminhos Dinâmicos Adaptativos

Esse método (conhecido por *Dynamic Adaptive Policy Pathways* – sigla DAPP, em inglês) teve destaque inicial no planejamento de longo prazo e gerenciamento adaptativo dos recursos hídricos no delta do Rio Reno, nos Países Baixos (Haasnoot *et al.*, 2013). Fundamenta-se na produção de planos flexíveis, com ações de curto e de longo prazo, esses últimos podendo ser alterados conforme os estados de mundo se revelam. Planos com ações distintas podem se interconectar nos chamados Pontos de Inflexão Adaptativos (*Adaptation Tipping Points* – sigla ATPs, em inglês), que representam as circunstâncias em que a estratégia inicialmente adotada falha, sendo possível tomar novas medidas visando a atingir os objetivos definidos (Haasnoot *et al.*, 2013).

O método DAPP busca explicitar a constante interação entre as decisões tomadas e a evolução do sistema, além de destacar a interdependência temporal entre as decisões adotadas em sequência. Sua essência é o planejamento dinâmico em resposta aos desdobramentos dos estados de mundo do sistema, explorando diferentes rotas para alcance dos objetivos, mesmo que suas condições apresentem grande variabilidade (Marchau *et al.*, 2019).

A aplicação de DAPP se inicia com a definição de planos (ou políticas), que são estratégias de planejamento compostas por ações iniciais e potenciais opções de longo prazo. Uma vez implementadas as primeiras ações, observa-se como o futuro se desdobra, e caso seja atingido algum ATP, o curso das ações e os planos podem ser alterados, para que os objetivos previamente definidos ainda sejam alcançados (Haasnoot *et al.*, 2013). Após avaliação de toda essa dinâmica, é possível delimitar as políticas com maior possibilidade de sucesso nos diversos desdobramentos do futuro. Também é possível construir um mapa de caminhos, semelhante a um mapa de linhas de metrô, que expressa a dinâmica desse método, conforme representado na Figura 3.1. O maior destaque da abordagem DAPP consiste em sua capacidade de oferecer visualizações compreensíveis das opções de planejamento existentes, facilitando a tomada de decisão que contemple a existência de incertezas e que inclua de maneira explícita os princípios de adaptação ao longo do tempo.

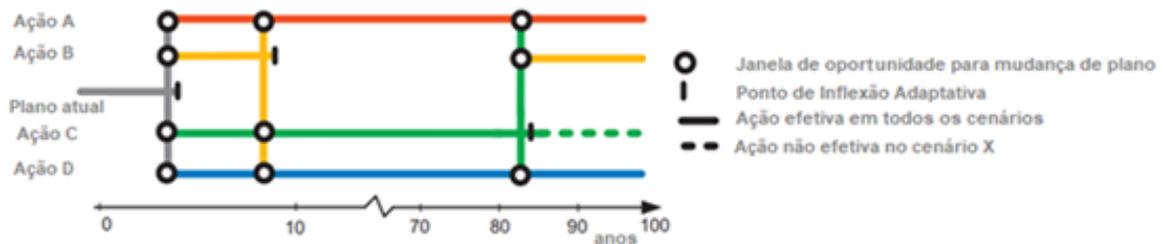


Figura 3.1 - Exemplo de mapa de caminhos adaptativos da abordagem DAPP. Fonte: Adaptado de Haasnoot *et al.* (2013)

DAPP foi aplicada em diversas áreas de conhecimento, cabendo destaque para: gerenciamento de recursos hídricos nos Países Baixos, conforme já mencionado (Haasnoot *et al.*, 2013), estudos e projetos de infraestrutura no Estuário do Rio Tâmesa, no Reino Unido (Ranger *et al.*, 2013), técnicas de gerenciamento de riscos de enchentes na Nova Zelândia (Lawrence *et al.*, 2013), e planejamento de abastecimento urbano de água com compartilhamento de infraestruturas entre municípios distintos nos Estados Unidos (Zeff *et al.*, 2016).

Tomada de Decisão Robusta

A Tomada de Decisão Robusta (*Robust Decisionmaking* – sigla RDM, em inglês) busca testar planos de gerenciamento em um vasto universo de cenários futuros possíveis, identificando condições críticas para essas estratégias de planejamento e analisando quais delas são mais confiáveis e robustas, ou seja, quais apresentam melhor desempenho em um grande número de cenários. Esse método executa uma grande quantidade de simulações de cenários através de modelos quantitativos, sem associá-los a probabilidades de ocorrência, e testa a performance das políticas candidatas dentro de cada um desses possíveis estados de mundo futuros. Os resultados são avaliados visual e estatisticamente, e auxiliam os tomadores de decisão a entender melhor a dinâmica do sistema em estudo, além de identificar em quais condições o planejamento analisado possui performance satisfatória e em quais ele falha em atingir seus objetivos (Lempert *et al.*, 2003).

Assim como outras abordagens DMDU, RDM utiliza modelos de simulação para identificar as vulnerabilidades das políticas formuladas, buscando estratégias para reduzir suas fragilidades. Além disso, por explorar diversos futuros possíveis visando à definição das melhores estratégias de planejamento, esse método utiliza um processo analítico inverso à

tradicional avaliação do tipo “prever e agir”, que busca associar probabilidades a estados de mundo futuro, se planejando somente para o cenário de maior probabilidade de ocorrência (Marchau *et al.*, 2019). O método RDM foi aplicado ao planejamento de problemas e situações estratégicas, como mudanças climáticas (Lempert *et al.*, 2003), gerenciamento de riscos de enchentes (Fischbach, 2010), gerenciamento de recursos hídricos (Lempert e Groves, 2010; Groves e Lempert, 2007), dentre outras aplicações.

Tendo em vista a complexidade envolvida na aplicação da abordagem RDM, o uso de ferramentas que facilitem a interpretação dos dados gerados nas simulações é de suma importância. Nesse sentido, as técnicas de EM e SD, descritos no item 3.2.1, são de grande valia para entender como os dados gerados nas simulações refletem as dinâmicas do sistema em estudo, identificando em quais cenários as políticas encontram-se mais vulneráveis a falhas, e quais são os fatores-chave associados a tais vulnerabilidades (Marchau *et al.*, 2019).

Teoria de Lacunas Decisórias

A Teoria de Lacunas Decisórias (*Information Gap* – sigla IG, em inglês) é uma teoria não probabilística que busca definir a disparidade entre o conhecimento que se detêm e aquele necessário para se tomar uma decisão confiável (Marchau *et al.*, 2019). Essa abordagem utiliza técnicas que buscam otimizar a resistência a falhas de uma dada política de planejamento, utilizando ferramentas computacionais e modelos locais de robustez. Sua aplicação implica no cumprimento de três tarefas: definição do sistema, determinação das fontes de incertezas às quais a solução deve ser resistente ou robusta, e representação matemática dessas incertezas (Marchau *et al.*, 2019). Esse método foi aplicado em diversos contextos, como em projetos para redução de emissão de gases de efeito estufa (Hall *et al.*, 2012), gestão de riscos de enchentes (Hall e Harvey, 2009) e gerenciamento de recursos hídricos (Korteling *et al.*, 2012).

Análise de opções de Engenharia

Essa abordagem (conhecida como *Engineering Options Analysis* – sigla EOA, em inglês) procura avaliar qual o valor de uma opção dentre todas as demais disponíveis no processo decisório, constituindo um processo de atribuir valor econômico à flexibilidade técnica de uma estratégia (Marchau *et al.*, 2019). Esse método não descreve um plano único, mas foca

em iniciar uma política que leve a possíveis desenvolvimentos almejados e ao mesmo tempo evite riscos indesejados. Em relação às aplicações de EOA, vale citar o trabalho de Jeuland e Whittington (2014). Nesse estudo, os autores associaram princípios de Análise de Opções Reais – abordagem precursora de EOA – a princípios DMDU, visando avaliar a gestão de recursos hídricos em porção da bacia do rio Nilo localizada na Etiópia.

Uma vez apresentados os fundamentos das principais abordagens DMDU (DAP, DAPP, RDM, IG e EOA), percebe-se que em muitos casos seus princípios e suas aplicações se sobrepõem, justamente por suas bases serem fundamentadas em um mesmo conceito comum, de tomada de decisão e planejamento adaptativos e resistentes a incertezas profundas. Portanto, essas perspectivas podem se complementar, e serem utilizadas de forma integrada dentro de um mesmo estudo.

Além disso, percebe-se que os exercícios propostos nessas abordagens – simulação de cenários, geração de dados de performance das políticas, análise dos planos e de suas vulnerabilidades – são processos que agregam diversos ganhos ao planejamento e tomada de decisão, porém possuem alto custo temporal e computacional, por exigirem consolidação e avaliação de um grande número de informações. Marchau *et al.* (2019) indicam que o uso de DMDU é positivo quando a quantidade de incertezas profundas no sistema é considerável, quando as políticas (ou portfólios) possuem alto grau de variabilidade, e quando o sistema em análise é complexo, havendo pouco conhecimento ou pouca concordância nas modelagens envolvidas, nas probabilidades de ocorrência de eventos ou nos possíveis resultados desse sistema.

Para facilitar a operacionalidade dos elementos utilizados nas abordagens DMDU, diversos recursos podem ser utilizados, a depender dos objetivos da aplicação, das abordagens utilizadas, e do tipo de sistema em estudo. É importante reforçar que a utilização dessas ferramentas computacionais, algoritmos e programas de simulação não buscam encontrar uma estratégia ótima para o cenário com maior probabilidade de ocorrência, e sim explorar diversos cenários e estratégias para geri-los, permitindo assim elaborar planejamentos adaptativos e robustos (Trindade *et al.*, 2020; Walker *et al.*, 2013a).

3.2.3. Técnicas, algoritmos e modelos aplicados em abordagens DMDU para gerenciamento de sistemas hídricos

Uma vez apresentadas as abordagens e componentes que permeiam o conceito DMDU, é possível perceber a utilidade que esses recursos possuem para planejamento a longo prazo de sistemas hídricos e SAUAs, os quais podem apresentar cenários de mudanças, situações não previstas ou condições caracterizadas como incertezas profundas. Contudo, a aplicação dos métodos e princípios DMDU pode exigir inovações na utilização dos modelos matemáticos e analíticos para suporte à tomada de decisão, cujo foco tradicional é a simulação de cenários associados a distribuições de probabilidade de ocorrência (Loucks e Da Costa, 2013 *apud* Trindade *et al.*, 2020).

Nesse sentido, uma das técnicas mais complexas utilizada em muitas abordagens DMDU é a análise de cenários (SD), que envolve a construção de uma grande quantidade de possíveis estados de mundo do sistema, aos quais as políticas a serem avaliadas são submetidas. A análise do desempenho das estratégias de gestão em diversos estados de mundo distintos permite entender a dinâmica do sistema e identificar as soluções mais robustas e sustentáveis do ponto de vista financeiro, social e ambiental. A construção dos estados de mundo ocorre, então, de maneira exploratória, geralmente utilizando simulações de Monte Carlo. Cada estado de mundo deve conter todas as características relevantes para a tomada de decisão, o que, no caso de SAUAs e sistemas hídricos, normalmente inclui informações como vazão de rios, nível de reservatórios, taxas de evapotranspiração, e projeções de demanda por água. Cada um desses dados, por sua vez, deve ser gerado de forma a reproduzir fidedignamente as condições do sistema em estudo, o que envolve decisões acerca dos métodos empregados para produção dessas informações.

No âmbito da aplicação de SD, é importante tecer algumas considerações sobre a geração de séries temporais sintéticas utilizadas na construção dos cenários explorados, como séries de vazão e evaporação, que neste trabalho serão abordadas como incertezas bem caracterizadas. A construção de séries sintéticas para variáveis hidrológicas é fundamental no planejamento a longo prazo de sistemas hídricos, pois permite aos tomadores de decisão discutir estratégias de gestão adequadas aos possíveis estados de mundo do sistema em estudo. No âmbito de abordagens adaptativas resistentes a incertezas profundas, tais discussões envolvem a geração de milhares de séries sintéticas e análises exploratórias do comportamento de

estratégias de planejamento e gestão dentro desses cenários. Isso exige a geração de um grande número de séries em que é necessário a preservação de características dos dados históricos (como a sazonalidade), a correlação intraanual e também a correlação interanual desses registros (Kirsch *et al.*, 2013). A capacidade de produzir séries sintéticas com ruídos que reflitam a ocorrência de mudanças climáticas também é valorizada. Ao longo dos anos, diversos estudos buscaram aplicar técnicas para geração de séries temporais estocásticas que reproduzam as relações de dependência temporal presentes em séries hidrológicas, e cada tipo de modelagem apresenta suas vantagens e desvantagens.

Dentre os métodos paramétricos mais conhecidos, estão os modelos autorregressivos e os modelos de médias móveis, que podem ser integrados e associados à análise de componentes sazonais, resultando em modelos autorregressivos integrados de médias móveis sazonal – SARIMA. Modelos SARIMA geralmente são capazes de reproduzir com sucesso considerável as estruturas de correlação dos dados históricos (Detzel, 2015; Salas *et al.*, 2006). Contudo, ainda que obtenham séries hidrológicas com erros estatísticos aceitáveis, esses modelos podem não captar possíveis aspectos não estacionários de algumas variáveis hidrológicas (Martini Filho, 2018), e nesses casos acabam por gerar séries sintéticas sem variabilidade interanual, sem refletir a dinâmica de uma série hidrológica real.

Em relação a modelos não paramétricos, um dos métodos mais antigos é conhecido por *Bootstrap*, que consiste na construção de séries com informações obtidas a partir da amostragem aleatória dos registros históricos de um sistema. Esse método possui simplicidade considerável, contudo pode apresentar dificuldade em refletir a autocorrelação dos dados históricos (Efron, 1979). A técnica de *moving blocks bootstrap* busca suprir essa lacuna, realizando amostragens dos registros históricos por blocos de dados, de maneira que a autocorrelação das séries sintéticas aumente proporcionalmente ao tamanho dos blocos de amostragem. Contudo, quanto maior o tamanho desses blocos, maior a reprodução direta da série histórica, sendo aconselhável avaliar em cada aplicação o risco de se incorrer na replicação extensa dos registros passados (Srinivas e Srinivasan, 2005). Outra proposta, desenvolvida por Kirsch *et al.* (2013) e referida como Gerador de Vazões (*StreamFlow Generator*, em inglês) se dispõe a gerar séries sintéticas que reflitam as funções de autocorrelação dos dados históricos, além de representar a sazonalidade e a dinâmica de variação intra e interanual presente nesses registros. Para tanto, os pesquisadores adaptaram o método de Ruído Gaussiano Fracionário (*Fractional Gaussian Noise* em inglês, sigla

FGN), formatando os registros históricos na forma de matrizes e aplicando técnicas de manipulação dessas estruturas de forma a manter a correlação dentro de cada ano de projeção, e também entre anos seguidos. O resultado são séries sintéticas representativas de condições reais do sistema, com variações intra e interanuais que refletem a dinâmica presente nos registros históricos. Maiores detalhes dos processos envolvidos na aplicação do Gerador de Vazões serão descritos na Metodologia deste trabalho.

Frente à diversidade de técnicas disponíveis para construção de séries temporais sintéticas, a escolha do método mais adequado para simulações hidrológicas dependerá da ponderação das vantagens e desvantagens de cada um deles, especialmente frente aos objetivos do estudo em questão. Nesse sentido, e tendo em vista a intenção deste trabalho de aplicar técnicas DMDU para análise exploratória de cenários, a prioridade é que as séries sintéticas geradas reflitam estados de mundo realistas ao longo de todo o horizonte temporal simulado, sem a necessidade de associá-los a distribuições de probabilidade de ocorrência.

Além da geração de séries sintéticas que reflitam as dinâmicas do sistema, a simulação de cenários em aplicações DMDU também exige a inclusão das incertezas profundas presentes no contexto em estudo. A identificação desses fatores – muitas vezes negligenciados ou tratados como incertezas bem caracterizadas – e a definição de seus intervalos de variação são atividades que devem ser executadas de maneira cuidadosa, idealmente envolvendo atores com amplo conhecimento do sistema em estudo. A amostragem de valores de cada uma das incertezas profundas para inclusão nos cenários do sistema deve utilizar técnicas de seleção estocástica apropriadas, cabendo destaque para o método de Amostragem Hipercubo Latino (*Latin HyperCube Sampling* – sigla LHS, em inglês), inicialmente proposto por McKay *et al.* (1979). Em linhas gerais, esse método divide o espaço de valores possíveis em estratos de domínio com igual probabilidade de ocorrência, selecionando aleatoriamente um ponto por estrato, cobrindo de forma mais homogênea todo o espaço amostral.

Outra atividade de grande relevância no planejamento de sistemas hídricos e SAUAs com incertezas profundas consiste na construção dos portfólios (ou políticas), que representam propostas de tolerância e controle de riscos de falha do sistema, associados a ações de gestão de curto e longo prazo, acionadas caso tais limites toleráveis sejam ultrapassados. Em diversas abordagens DMDU, tais propostas têm seu desempenho avaliado dentro dos diversos estados de mundo produzidos nas simulações, visando à seleção das estratégias

ótimas. Algumas aplicações se valem de portfólios (ou políticas) específicas nas simulações, enquanto outras utilizam algoritmos evolucionários (EA), para gerar de maneira exploratória propostas de solução para avaliação e otimização. EA empregam princípios de seleção natural, utilizando operadores aleatórios para simular mutações e recombinações que resultam em novos indivíduos (soluções) em uma população, que competem para serem escolhidos em um processo de seleção regido por uma função de adequação específica do problema estudado (Nicklow *et al.*, 2010).

A seleção das melhores soluções (políticas) requer a adoção de uma perspectiva multiobjetivo, tendo em vista que sistemas hídricos e SAUAs são complexos e possuem diversos atores com interesses e objetivos distintos. Isso é possível graças ao desenvolvimento de EAs que consideram múltiplas funções de seleção, conhecidos como algoritmos evolucionários multiobjetivo (MOEAs). O resultado da seleção de políticas utilizando MOEAs é um conjunto de soluções ótimas, cada uma com um perfil de desempenho particular em relação aos objetivos de interesse, mas que possuem performance superior às demais em ao menos um dos critérios de seleção. Esse conjunto de soluções é conhecido como frente não dominada ou frente ótima de Pareto (Nicklow *et al.*, 2010).

Diversos trabalhos já integraram abordagens DMDU, programas de simulação de cenários e MOEAs, visando a construção de estratégias adaptativas e resistentes a incertezas profundas para sistemas hídricos e SAUAs (Gold *et al.*, 2019; Trindade *et al.*, 2017; Huskova *et al.*, 2016; Smith *et al.*, 2016; Matrosov *et al.*, 2015; Herman *et al.*, 2014). Cabe destacar que muitas dessas aplicações valem-se especificamente da abordagem RDM, no método conhecido como MORDM. Nesse método não há definição prévia das políticas de planejamento, apenas das ações disponíveis para sua composição. A combinação de ações dentro de uma política é feita de maneira exploratória, e o desempenho de cada portfólio gerado é avaliado mediante os diversos estados de mundo considerando uma perspectiva multiobjetivo. Resumidamente, as etapas que compõem a técnica MORDM são (Kasprzyk *et al.*, 2013):

- Formulação do modelo (ou problema) do sistema: consiste na construção do modelo representativo do sistema, incluindo seus componentes chave: estruturação espacial dos principais elementos relacionados ao abastecimento de água, métricas de risco que devem direcionar a tomada de decisão, ações de gestão de riscos de curto e longo prazo disponíveis

para compor estratégias de planejamento (portifólios), variáveis que compõem os cenários (estados de mundo) possíveis para o futuro do sistema;

- Geração de alternativas: representa a fase de otimização, em que EAs constroem diferentes políticas (em termos de tolerância a riscos e de ações de curto e longo prazo que podem ser adotadas para geri-los). A performance dos portifólios é avaliada de maneira multiobjetivo frente aos milhares de cenários construídos na fase anterior, e são selecionadas aquelas políticas que tiveram melhor desempenho que as demais em ao menos um critério analisado, retornando assim uma frente aproximada de Pareto de políticas ótimas;

- Análise de incertezas e robustez: cada solução do conjunto definido na etapa anterior é submetida a estados de mundo mais desafiadores, que incluem variáveis de incertezas profundas. As análises dessa fase buscam encontrar as soluções mais robustas da frente aproximada de Pareto, que apresentam desempenho satisfatório em uma grande variedade de estados de mundo (possibilidades de futuro para o sistema);

- Análise de cenários: a performance do conjunto de soluções é analisada, buscando-se definir quais incertezas profundas contribuem mais para mudanças de desempenho e falhas do sistema.

Algumas aplicações da metodologia MORDM fazem uso de algoritmos baseados em classificação de requisitos para auxiliar a análise das performances e vulnerabilidades de planos de gestão de sistemas de abastecimento urbano de água (Herman *et al.*, 2014; Trindade *et al.*, 2020). Dentre tais algoritmos, estão aqueles fundamentados no Método de Regras de Indução Paciente – *Patient Rule Induction Method*, sigla PRIM (Friedman e Fisher, 1999), no Método de Árvore de Classificação e Regressão – *Classification and Regression Tree*, sigla CART (Breiman *et al.*, 1984 *apud* Marchau *et al.*, 2019) e em Árvores Impulsionadas Por Gradiente, sigla GBT (Freund & Schapire, 1999).

Um avanço importante da metodologia MORDM consiste no método *DU Pathways*, que incorpora incertezas profundas já na fase de geração de alternativas, gerando políticas mais robustas e resistentes a cenários extremos (Trindade *et al.*, 2019). A estrutura de *DU Pathways* combina sistemas de decisão flexíveis e baseados no monitoramento de risco, conceitos de políticas dinâmicas e adaptativas, e a incorporação de mecanismos de retroalimentação de informações a respeito da evolução temporal dos estados de mundo ao longo do horizonte de planejamento (Trindade *et al.*, 2019). As principais etapas da estrutura *DU Pathways* são:

- Identificar políticas de performance ótima em diversas possibilidades de futuro e suas relações de compromisso, considerando uma perspectiva de múltiplos objetivos de partes interessadas;
- Definir e avaliar a robustez das políticas, considerando cenários futuros mais desafiadores e diversos;
- Identificar condições que controlam a robustez das políticas;
- Analisar opções de infraestrutura mais estratégicas.

Diversos programas de simulação já foram desenvolvidos para geração de cenários de sistemas hídricos, apoiando a aplicação de métodos como MORDM e *DU Pathways*. Dentre eles, podem ser citados: Modsim (Triana e Labadie, 2006), *Water Evaluation and Planning*, WEAP (Sieber, 2006), *Interactive River-Aquifer Simulation*, IRAS (Matrosov *et al.*, 2011), Riverware (Zagona *et al.*, 2001) e Pywr (Tomlinson *et al.*, 2020). Contudo, as aplicações tradicionais de tais programas focam na busca pelos cenários com maior probabilidade de ocorrência, para então construir estratégias de gestão adequadas a esses cenários. Por outro lado, conforme já discutido, as abordagens DMDU se valem desses e de outros programas para simular estados de mundo em caráter exploratório, buscando estratégias para adaptação ao maior número de cenários possíveis (Trindade *et al.*, 2020).

Assim, apesar de permitir a avaliação de diversos aspectos do planejamento a longo prazo para abastecimento urbano de água, tais programas possuem fatores que ainda limitam sua aplicação em abordagens adaptativas de gestão para SAUAs, dentre eles: a falta de flexibilidade em representar a percepção de estados de mundo que envolvam balanço hídrico, a inacessibilidade ou restrição de acesso ao código fonte dos programas, as restrições na representação das incertezas que envolvem sistemas hídricos, especialmente incertezas profundas; e a dificuldade em incluir nos exercícios de planejamento ações de curto e longo prazo simultaneamente (Trindade *et al.*, 2020).

WaterPaths

As limitações supracitadas incentivaram o desenvolvimento do *WaterPaths*, um programa de simulações estocásticas que visa a apoiar tomadas de decisão e planejamento adaptativo em sistemas de abastecimento urbano de água. Esse programa foi desenvolvido no âmbito do projeto do então doutorando Bernardo Trindade, no Departamento de Engenharia Civil e

Ambiental da Universidade de Cornell, nos Estados Unidos. Além de permitir a representação eficiente e flexível de sistemas hídricos envolvendo diversas partes interessadas, *WaterPaths* fornece suporte computacional para realizar otimizações multiobjetivo e análises exploratórias, permitindo a aplicação de técnicas DMDU (Trindade, 2019).

Por meio desse programa, os tomadores de decisão são capazes de racionalizar as complexidades de um sistema de abastecimento urbano de água com múltiplos atores e incertezas profundas. Também são capazes de criar, otimizar e avaliar planos adaptativos de longo prazo para esses contextos. Outra vantagem do *WaterPaths* é sua flexibilidade computacional – código de relativa simplicidade, fácil execução em desktops, sistema de nuvens ou máquinas de alta performance – e adaptabilidade, já que permite o ajuste dos parâmetros originais para aplicação à realidade de várias localidades (Trindade, 2019). *WaterPaths* possui foco na aplicação do panorama *DU Pathways*, sendo capaz de apoiar o processo de tomada de decisão em cenários de incerteza profunda, incorporando incertezas profundas já na primeira fase de sua estrutura (otimização), e resultando em políticas da frente aproximada de Pareto mais robustas (Trindade *et al.*, 2017; Trindade *et al.*, 2020). Devido às vantagens na aplicação de princípios DMDU, este foi um dos principais recursos computacionais utilizados neste trabalho. A fim de facilitar a compreensão das etapas metodológicas desenvolvidas nesta pesquisa por intermédio de *WaterPaths*, os principais aspectos de sua lógica de operação são apresentados a seguir.

WaterPaths pode operar em dois módulos distintos: Módulo Avaliação de Políticas e Módulo Otimização (Figura 3.2). No primeiro, o programa toma os dados de entrada que caracterizam o sistema em estudo – incluindo os estados de mundo possibilidades de futuro) compostos por séries sintéticas de vazão, evaporação e demanda – e analisa de forma multiobjetiva o desempenho de políticas pré-definidas, quando submetidas aos diversos estados de mundo. Dessa forma, uma simulação corresponde a 1.000 execuções, e cada execução representa a avaliação do portfólio em um cenário de mundo distinto.

No segundo modo de operação, o programa realiza os mesmos exercícios de construção de cenários do primeiro módulo, com uma simulação correspondendo a 1.000 execuções (avaliação do portfólio em um estado de mundo). Contudo, as políticas a serem avaliadas são geradas de forma exploratória, a partir da combinação de limites específicos de

tolerância a risco de falha do sistema, ações de gestão de curto prazo – adoção de racionamento, gestão de demandas e transferência de água entre sistemas produtores – e ações de gestão de longo prazo – construção ou ampliação de reservatórios, estações de tratamento e novas captações. Caso sejam ultrapassados os limites de tolerância à falha definidos para aquela política, são adotadas as ações de curto ou longo prazo associadas a cada limite.

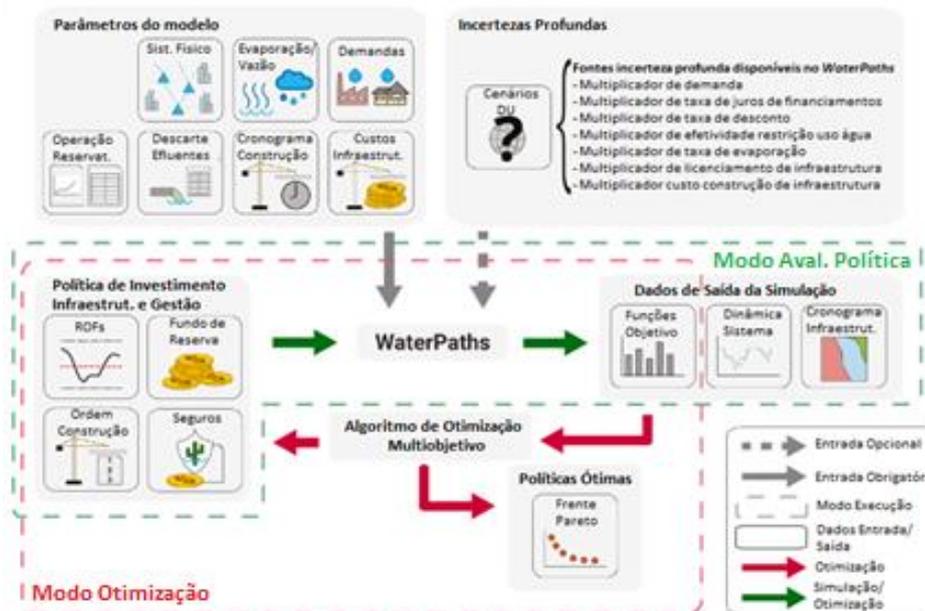


Figura 3.2 - Fluxo e módulos de Operação do Programa *WaterPaths*. Fonte: Adaptado de Trindade *et. al.* (2020)

Cabe ressaltar que cada uma das políticas testadas, independente do módulo de operação do programa, buscam atingir certos objetivos, expressos quantitativamente por meio de Funções Objetivo (FOs). Essas funções são a base da avaliação multiobjetiva realizada na aplicação de *DU Pathways* pelo *WaterPaths*, e buscam refletir os interesses das partes envolvidas e afetadas pela operação do sistema. Seus valores são calculados considerando o desempenho do portfólio nos milhares de estados de mundo em que foi testado. A configuração padrão do *WaterPaths* inclui as seguintes FOs:

- Confiabilidade do fornecimento: reflete a capacidade de determinada política em atender à demanda por água, uma vez que corresponde à quantidade de semanas, dentro do horizonte de planejamento, cujo volume armazenado nos reservatórios se mantém acima de 20% da capacidade máxima de armazenamento;

- Frequência de restrição: quantidade de semanas em que foram adotadas medidas de restrição do uso de água (campanhas de conscientização, tarifas de contingência e/ou racionamento);
- Valor presente líquido do custo de infraestrutura: representa o valor presente líquido das infraestruturas escolhidas para implementação no horizonte de planejamento de um estado de mundo;
- Custo anual médio: corresponde ao custo anual de operação do sistema de abastecimento, incluindo parcelas de financiamento para investir em novas infraestruturas, custos a manutenção do sistema como um todo, e também os custos associados com a aplicação de medidas de mitigação de secas (transferência de água entre sistemas produtores e racionamento);
- Custo do pior primeiro percentil: quantifica o grau de variabilidade do saldo de despesas e receitas da companhia. Essa FO é relevante para monitorar o grau de vulnerabilidade financeira da companhia, influenciada sobretudo pelas perdas de receita com aplicação de medidas de restrição de uso de água e ações de transferência de água entre sistemas produtores distintos.

Maiores detalhes acerca das Funções Objetivo definidas como padrão para a operação do *WaterPaths* podem ser consultados em Giacomazzo (2020), Trindade (2019) e no Apêndice deste trabalho.

Conforme já indicado, a geração de diversos portfólios – que são opções de políticas de gestão ou de soluções para o sistema – e sua avaliação multiobjetiva dentro dos estados de mundo são realizadas através do uso de MOEAs, e resultam em uma frente ótima de Pareto ou soluções não dominadas, ou seja, um conjunto de políticas que apresenta desempenho superior às demais em ao menos um dos critérios de avaliação selecionados (Trindade *et al.*, 2020). *WaterPaths* aceita facilmente o emprego de outros algoritmos evolucionários para o processo de otimização multiobjetivo, mas utiliza como padrão para otimização o algoritmo *Master-Worker Borg Multiobjective Optimization Evolutionary Algorithm* (MS Borg MOEA), que recorre a vários operadores de pesquisa para evolução das soluções. A probabilidade de aplicação de cada um deles é adaptada com base na capacidade de produção de políticas com melhor performance, o que, junto com outros aspectos operacionais, aumenta a eficiência, velocidade e confiabilidade de MS Borg MOEA (Hadka e Reed, 2012; Hadka *et al.*, 2013). Assim como outros MOEAs, esse algoritmo retorna uma frente

aproximada de Pareto de soluções (políticas) ótimas, também conhecidas como soluções não dominadas.

Os dados de entrada utilizados na operação do *WaterPaths* merecem atenção especial, devido à importância que possuem na representação da realidade do SAUA em estudo, e conseqüentemente na avaliação das políticas mais adequadas para sua gestão. Dessa forma, a seguir serão tecidas considerações mais cuidadosas acerca dos dados de entrada do programa, que podem ser divididos da seguinte maneira: dados que caracterizam os estados de mundo para o sistema, parâmetros de avaliação de desempenho de estratégias de planejamento avaliadas, valores limite de tolerância de falha do sistema, ações de gestão de curto e longo prazo, incertezas bem caracterizadas e incertezas profundas. Os primeiros dados de entrada indicados são obrigatórios, compondo as informações mínimas necessárias para simulação de cenários dentro do programa, e são compostos pelas séries de demanda por água, pelas séries sintéticas de vazão dos afluentes dos reservatórios e das captações a fio d'água, e pelas séries sintéticas de evaporação dos reservatórios.

Particularmente no caso dos dados de vazão e evaporação, cabe destacar a importância da utilização de métodos de geração de séries hidrológicas que reflitam realisticamente as características físicas do sistema, sem vinculação de probabilidades de ocorrência a nenhuma delas. Dentre os diversos métodos disponíveis para construção de séries temporais, visando ao fim específico de geração exploratória de cenários hidroclimáticos alternativos, cabe destacar o método *StreamFlow Generator*, proposto em Kirsch *et al.* (2013). Essa técnica se apoia em princípios não paramétricos, e utiliza manipulação de matrizes de registros históricos e decomposição de Cholesky para gerar diversas séries sintéticas com longo horizonte temporal, ao mesmo tempo que preserva a sazonalidade e as correlações intra e interanual presente nos dados históricos.

Avançando as considerações em relação a dados de entrada, caso o programa seja operado no Módulo Otimização/Simulação, devem ser informadas as ações de gestão de curto e longo prazo a serem consideradas para construção dos portfólios de planejamento. Nesse sentido, alguns comentários sobre tais medidas são pertinentes. As ações de gestão de curto prazo disponíveis envolvem a transferência de água entre sistemas produtores distintos, a adoção de racionamento e a gestão de demanda (incluindo implementação de tarifas de contingência, quando necessário), medidas que já provaram ser úteis não apenas para garantir o

abastecimento da população em situações de escassez hídrica, mas também para postergar a necessidade de implementação de novas infraestruturas (Trindade 2019; Zeff *et al.*, 2016). Entretanto, tais medidas podem acarretar custos não previstos e queda na arrecadação de receita das companhias de abastecimento, sendo importante considerar a possibilidade de adoção combinada de instrumentos financeiros para proteção de sua sustentabilidade econômica. Com esse intuito, *WaterPaths* possibilita a utilização de seguros contra secas e fundos de contingência – que correspondem a uma poupança acionável em momentos de instabilidade econômica, e aqueles sendo contratados junto a seguradoras para garantia de cobertura em eventos de estiagem. Maiores detalhes sobre tais instrumentos podem ser obtidos em Trindade (2019).

Em relação às medidas de gestão de longo prazo, essas estão associadas sobretudo à construção de infraestrutura para ampliar o abastecimento da população, compreendendo a implementação de novas estações de tratamento e reservatórios, além da ampliação das instalações já existentes. Tendo em vista que esse tipo de medida normalmente envolve a adoção de financiamentos ao longo de anos e até décadas, elementos financeiros como taxas de juros e taxas de desconto devem ser avaliados com cautela, podendo ser encarados como incertezas profundas ou bem caracterizadas, conforme a realidade do estudo de caso.

Um dos principais destaques de *WaterPaths* se refere à sua capacidade de criar cenários com incertezas profundas dentro do processo de simulação. Nesse sentido, faz-se necessário classificar as condições presentes no SAUA como incertezas profundas ou bem caracterizadas. Dentre esses fatores, estão o prazo de licenciamento das infraestruturas a serem instaladas, o custo e o tempo associados à sua construção, a eficácia da adoção de medidas de restrição de uso junto a usuários (acionamento, tarifas de contingência que penalizam o consumo excessivo), e o crescimento da demanda por água. Caso seja considerado incerteza profunda, cada um desses fatores deverá ser representado por um valor amostrado aleatoriamente dentro de um intervalo predeterminado, e integrará um vetor que representa todas as incertezas profundas do sistema. Por outro lado, se for definido como incerteza bem caracterizada, será representado por um valor ou série temporal obtidos a partir de métodos estatísticos específicos. Cabe indicar que tanto os vetores de incertezas profundas quanto as incertezas bem caracterizadas deverão ser geradas externamente ao *WaterPaths*, para posteriormente serem inseridos como dados de entrada.

Outro elemento de grande importância do programa se refere à dinâmica temporal de adoção de novas ações dentro de um determinado plano, que é guiada pelos riscos de falha (RdFs) e seus respectivos valores limites. Os RdFs representam a tolerância ao risco de falha do sistema e, quando ultrapassam limites aceitáveis, acionam a adoção de novas medidas de gestão. Os RdFs definidos como modo *default* do programa são a probabilidade de queda do nível dos reservatórios que abastecem o sistema a um valor crítico (inferior a 20%) nas T semanas seguintes ao momento da análise, período dentro do qual supõe-se a ocorrência de cenários hidrológicos equivalentes aos últimos 50 anos de registros históricos (Trindade *et al.*, 2020). Assim, cada política testada terá diferentes limites para os RdFs e, conseqüentemente, tolerâncias a risco distintas. Originalmente, o programa calcula RdFs de curto prazo e de longo prazo de maneiras distintas. Dentro do planejamento de curto prazo, RdFs são calculados com T correspondendo a 52 semanas, e para o planejamento de longo prazo, RdFs são calculados com T equivalente a 78 semanas. Cada RdF de curto prazo, caso ultrapasse seu respectivo limite tolerável, acionará uma medida de gestão de curto prazo (transferência de água, racionamento, tarifas de contingência). O mesmo raciocínio é válido para RdFs de longo prazo, que adicionalmente observam uma ordem predefinida de opções de infraestrutura disponíveis para instalação.

A natureza dos RdFs que pautam a adoção de novas ações de gestão dentro do *WaterPaths* está atrelada ao balanço hídrico das infraestruturas presentes no sistema, que por sua vez se relaciona intimamente aos estados de mundo simulados. Assim, seguindo uma ordem montante-jusante, a fórmula da Equação 3.1 é aplicada para todos os reservatórios do SAUA em estudo, considerando intervalos de tempo semanais:

$$x_a^{sc+1} = x_a^{sc} + VA^{sc} + DE^{sc} + DRM^{sc} - EP^{sc} \cdot AR(x_a^{sc}) - VE^{sc} - D^{sc} - DR^{sc} \quad (3.1)$$

em que x_a^{sc+1} corresponde ao volume de água estocado no reservatório na semana posterior à semana corrente, VA representa a vazão afluyente ao reservatório, DE corresponde à descarga total de efluentes no reservatório, DRM representa a descarga de reservatórios de montante (se houver), EP é a taxa de evaporação (adimensional), AR corresponde à área do reservatório em função de seu volume, VE representa a vazão ecológica à jusante, DR é a demanda por água do reservatório em questão, e D é a descarga desse mesmo reservatório, padronizada em um valor nulo exceto no caso de o reservatório estar cheio.

Por meio do balanço hídrico apresentado, é possível obter semanalmente os RdFs de curto prazo, cujos valores deverão permanecer abaixo de seus respectivos valores críticos

(específicos para cada política), caso contrário são disparadas novas medidas de mitigação de seca no curto prazo, como gerenciamento de demandas e transferência de água bruta ou tratada entre instalações do sistema. A cada início de ano de uma simulação, o RdF de longo prazo também é calculado, e caso ultrapasse o valor limite da política que está sendo analisada, serão adotadas medidas estruturais de planejamento de longo prazo previstas nessa estratégia de gestão, como construção ou ampliação de reservatórios de abastecimento de água (Trindade *et al.*, 2020).

A dinâmica descrita e ilustrada na Figura 3.3, é genuinamente adaptativa, uma vez que a adoção de novas ações de planejamento é regida pelo acompanhamento dos estados de mundo revelados no decorrer de uma simulação, o que permite a construção de políticas também adaptativas. Porém, cabe ressaltar que o cálculo dos valores de RdFs ao longo de todo o horizonte temporal de simulação exige que se tenha pelo menos 50 anos de dados históricos, o que pode representar um desafio à parte para sistemas que carecem de monitoramento de registros hidrológicos.

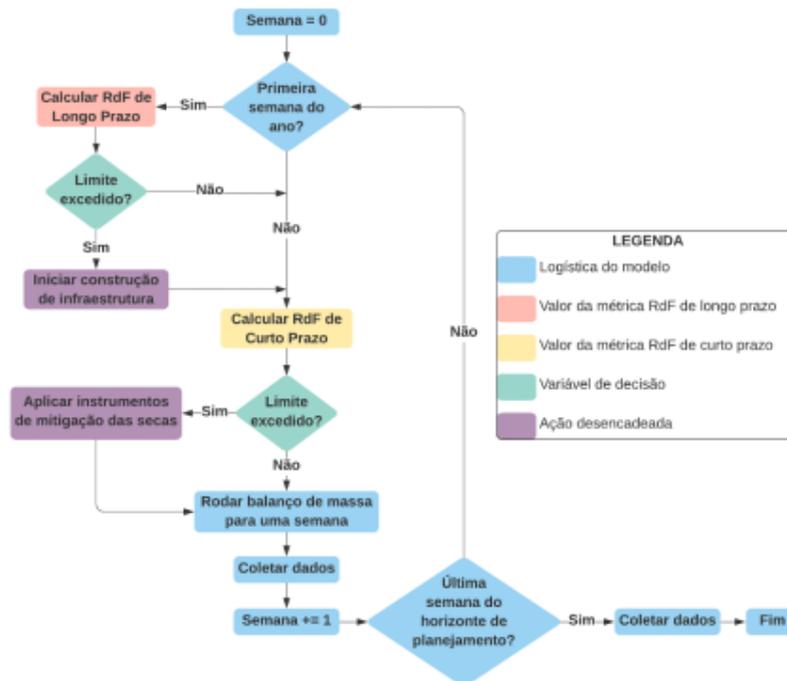


Figura 3.3 – Dinâmica de adoção de novas ações de planejamento com base em RdFs.
Fonte: Giacomazzo (2020)

Para o estudo de caso deste trabalho, essa questão foi tratada em duas frentes de esforços: a primeira voltada para as séries de vazão, se valendo de análises de regressão que se apoiaram em informações de estações hidrológicas próximas aos pontos de interesse para preencher e

estender as séries temporais, conforme proposto por Souza, 2022. A segunda frente de esforço, voltada aos dados de evaporação, consistiu na extensão das séries temporais de interesse utilizando o método de Kirsch *et al.* (2013), a ser descrita na Metodologia deste trabalho. A obtenção de 50 anos de registros históricos será descrita com maior detalhe também na Metodologia deste trabalho.

As diversas políticas a serem testadas pelo *WaterPaths* são expressas em termos numéricos, justamente através da escolha de valores limites de RdFs, que diferem de uma política para outra. Assim, cada portfólio terá um valor específico para RdFs de curto e longo prazo, apresentando tolerância a riscos variadas, de forma a acionar ações de curto e longo prazo com frequências distintas.

Inicialmente, *WaterPaths* foi aplicado em uma região da Carolina do Norte, nos Estados Unidos, conhecida como *Research Triangle* (Trindade, 2019). Essa área possui diversos municípios, abastecidos por um mesmo sistema composto por 4 unidades produtoras de água – Durham, Chapel/Carrboro, Cary e Raleigh, onde estudos anteriores indicaram haver vulnerabilidades significativas, riscos de racionamento e prejuízos financeiros à concessionária de abastecimento, especialmente em um cenário de longo prazo. Soma-se a isso a heterogeneidade de critérios de gestão que cada unidade produtora de água adota, e a dificuldade em integrar o planejamento e os interesses de todos eles. As problemáticas apresentadas estimularam a aplicação do programa *WaterPaths* à realidade desse sistema, visando à construção de um planejamento de longo prazo integrado e adaptativo, além de robusto a incertezas, especialmente incertezas profundas. Os resultados desse estudo podem ser resumidos em quatro pontos principais: a análise sistemática de incertezas nos processos de simulação e otimização foi essencial para a geração de políticas robustas, que apresentassem um resultado satisfatório em diversos estados de mundo; a adoção de medidas de curto prazo associadas a instrumentos financeiros são capazes de postergar o momento em que é necessário acionar medidas de infraestrutura; o crescimento da demanda é a condição de incerteza que mais influenciou o desempenho das políticas e a construção de novas infraestruturas; e o planejamento integrado e a construção de infraestruturas de uso compartilhado permitiram que todas as unidades produtoras atendessem as restrições e condições regulatórias impostas (Trindade *et al.*, 2019).

Um cenário que onde também é possível aplicar os princípios DMDU é o sistema de abastecimento de água urbano do Distrito Federal. A ocupação desordenada do solo, a degradação ambiental da região, o aumento da população urbana, as estiagens cada vez mais frequentes e prolongadas, a regulação de tarifas de abastecimento de água e as mudanças na regulação dos serviços de saneamento básico são algumas das condições que justificam o planejamento desse sistema utilizando abordagens adaptativas e que considerem a existência de incertezas profundas (GDF, 2017b).

O primeiro estudo que utiliza tais princípios no espaço urbano do Distrito Federal é recente, desenvolvido no âmbito do projeto de mestrado da então aluna Andressa Pereira Giacomazzo, concluído em dezembro de 2020, no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH) da Universidade de Brasília (UnB). Os resultados desse estudo indicaram a possível necessidade de investimento em expansão da capacidade de oferta de água para o SAUA do DF nos próximos anos, além do papel importante das ações de curto prazo na postergação do acionamento de construção de infraestrutura. O trabalho também recomenda novas aplicações do *WaterPaths* ao sistema de abastecimento urbano de água do Distrito Federal, ressaltando a importância da utilização de modelos alternativos para construção das séries sintéticas de vazão e evaporação, e da construção de novos métodos de identificação e avaliação das incertezas profundas presentes nesse contexto².

² Conforme descrito no item 3.2.3, esses itens compõem os dados de entrada necessários para operação do programa *WaterPaths*.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: DISTRITO FEDERAL (DF) DO BRASIL

Os objetivos desta pesquisa envolvem a busca por portfólios adaptativos e resistentes a incertezas profundas aplicáveis ao SAUA do DF. Assim, é importante conhecer as particularidades desse sistema e as características do contexto no qual ele está inserido, especialmente no que tange aos fatores que influenciam seu planejamento a longo prazo. A seguir, será apresentada uma caracterização geral do Distrito Federal, de seu sistema de abastecimento urbano de água, e os principais aspectos da crise hídrica histórica ocorrida entre 2016 e 2018.

O Distrito Federal localiza-se na Região Centro-Oeste do Brasil, ocupando porção do Planalto Central do país e apresentando formações geológicas de chapadas e chapadões, com altitudes variando entre 950 e 1.400 metros. A vegetação predominante é o Cerrado e o clima, segundo a classificação de Koppen, é Tropical, com forte sazonalidade e duas estações bem delimitadas: um período chuvoso e quente, entre outubro e março, e outro seco e com temperaturas mais amenas, de abril a setembro (Companhia de Planejamento do Distrito Federal - CODEPLAN, 2017a). Cabe tecer a consideração de que esse tipo de clima torna fundamental o planejamento adequado do sistema de abastecimento de água urbano, frente à ocorrência de longos períodos de estiagem.

A região do Distrito Federal está localizada em uma região divisora de águas, sendo drenada por rios de pequeno e médio porte que integram três das mais importantes bacias hidrográficas da América do Sul: Paraná, São Francisco e Tocantins/Araguaia. Conforme ilustrado na Figura 4.1, os corpos hídricos do Distrito Federal estão agrupados em sete regiões hidrográficas – São Bartolomeu, Lago Paranoá, Descoberto, Maranhão, Preto, Corumbá e São Marcos (Gonçalves, 2012).

A forma de ocupação do solo do Distrito Federal é um aspecto que merece atenção: em apenas quarenta anos, a ocupação prevista para o Plano Piloto não só foi ultrapassada, como também estimulou o polinucleamento urbano, caracterizado pela formação das “cidades satélites”, a expansão da conurbação urbana e o crescimento das periferias. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apontam que em menos de 60 anos a

população do Distrito Federal está próximo de alcançar a marca de 3 milhões de habitantes (IBGE, 2023), tendo quase dobrado de tamanho nas últimas três décadas, ao mesmo tempo em que a parcela de população que vive em zonas rurais reduziu (CODEPLAN, 2017a).

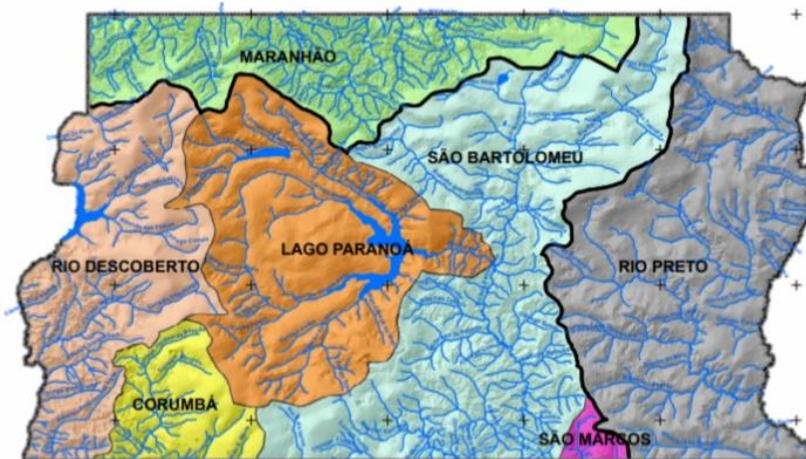


Figura 4.1 - Regiões Hidrográficas do DF. In: Mapa Hidrográfico do DF, elaborado pela Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do DF (Adasa)

Segundo a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal – Adasa – e outras instituições (2018), diversas ocupações foram desenvolvidas de maneira informal, sem registros de propriedade e sem conexão regular com as infraestruturas de abastecimento de água, esgoto e drenagem que caracterizam uma ocupação urbana planejada. Além de acelerada, a ocupação do solo no Distrito Federal possui distribuição heterogênea e desigual.

Em sua fundação na década de 1960, o território do Distrito Federal foi dividido em oito Regiões Administrativas (RAs), chegando a trinta e uma em 2016, nem todas com suas poligonais devidamente demarcadas. Segundo a CODEPLAN (2015 *apud* GDF, 2017a), à época do Censo de 2010 as cinco RAs mais populosas do DF eram Brasília (Plano Piloto), Taguatinga, Sobradinho, Ceilândia e Samambaia, com pouco menos de 54% da população do DF, enquanto as RAs Paranoá, Núcleo Bandeirante, Lago Sul, Lago Norte e Candangolândia concentravam menos de 8% da população desse ente federativo.

A dinâmica de distribuição de renda é marcada pela desigualdade entre as regiões administrativas, podendo haver variações superiores a 10 vezes entre as RAs de maior e de menor renda domiciliar, conforme apresentado na Figura 4.2. Tendo em vista a relação entre o nível de renda e a maior utilização de recursos para obtenção de conforto, é esperado que

a condição socioeconômica da população influencie o consumo de água. Esse fato é confirmado na Figura 4.3, que apresenta o consumo *per capita* por RA nos anos de 2017 e 2018 (Adasa, 2019).

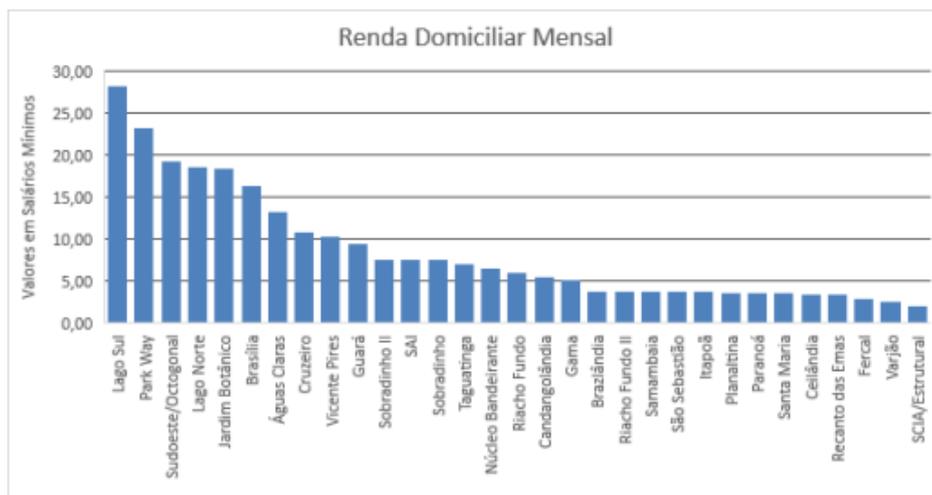


Figura 4.2 – Renda domiciliar média mensal das RAs do DF. Fonte: CODEPLAN (2015), *apud* GDF (2017a)

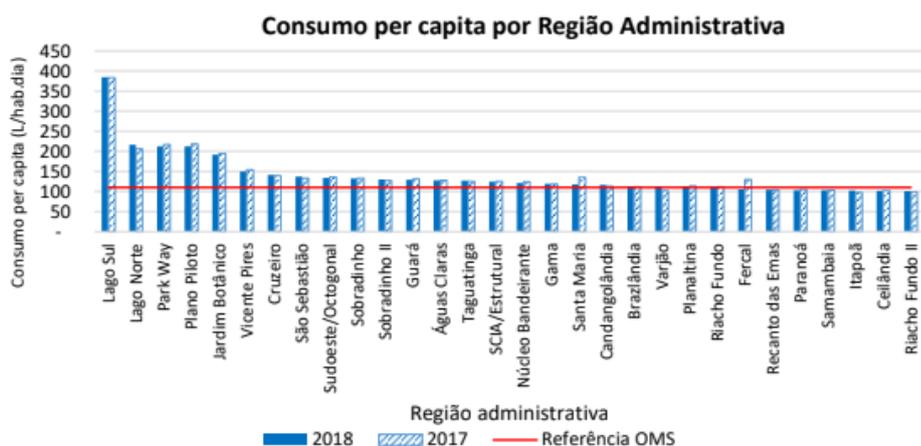


Figura 4.3 – Consumo *per capita* de água por RA nos anos de 2017 e 2018. Fonte: Adasa, 2019

A Figura 4.4 apresenta a distribuição espacial das RAs conforme agrupamentos de renda, de consumo de água *per capita* e de densidade populacional. Por meio dela, pode-se verificar a concentração das faixas de maior poder aquisitivo (e conseqüentemente de consumo de água) na porção centro-sul do território do DF, sendo atendidas pelo Sistema Produtor Torto-Santa Maria. Por outro lado, diversas RAs com maior densidade populacional, menor consumo de água *per capita* e menor poder aquisitivo são atendidas pelo Sistema Produtor Descoberto.

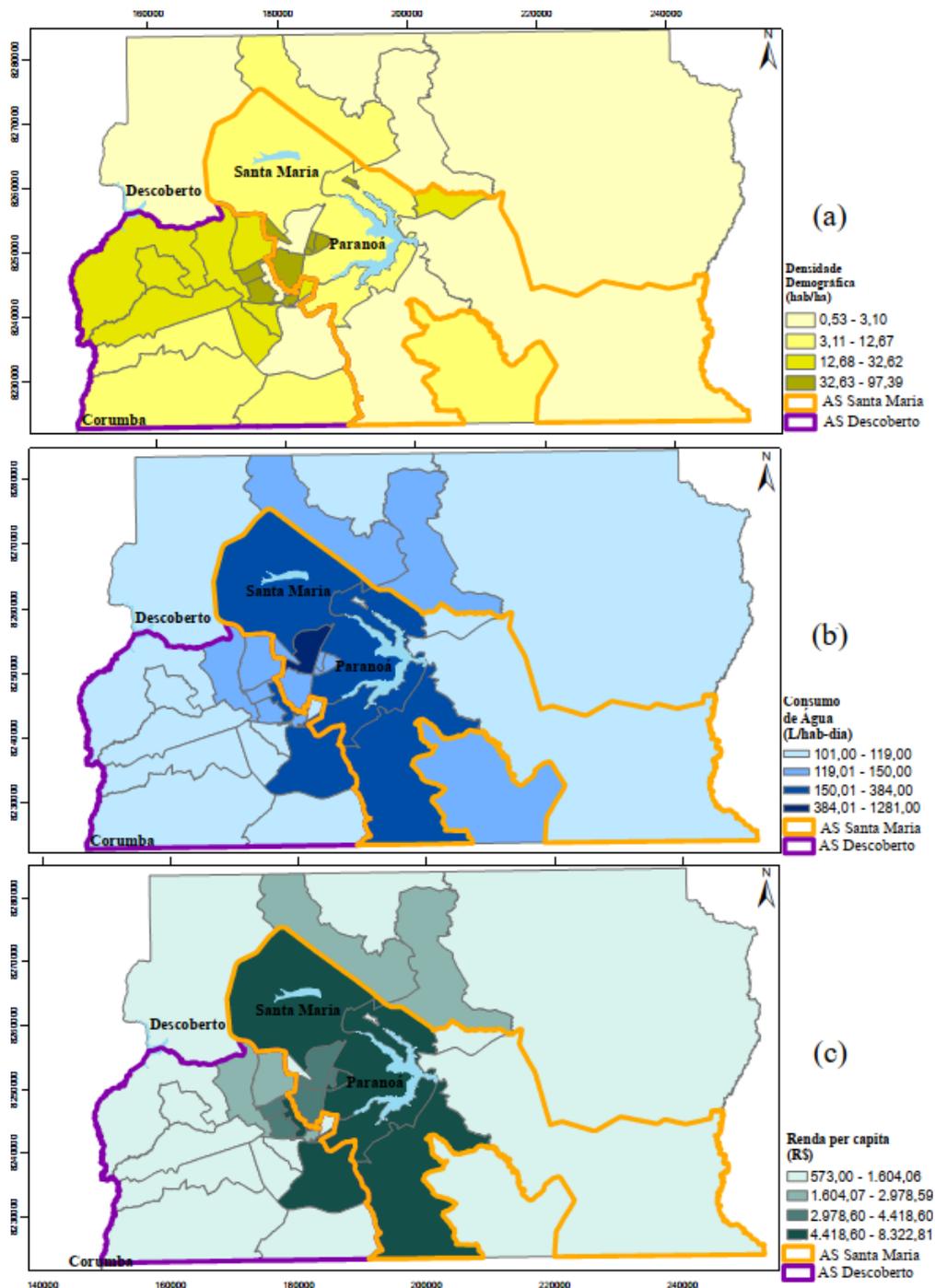


Figura 4.4 – Distribuição espacial das RAs conforme (a) densidade populacional, (b) consumo de água *per capita*, (c) renda. Fonte dos dados: Portal Sisdia-DF, Adasa (2018) e Codeplan (2018)

4.1. INFRAESTRUTURA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DO DISTRITO FEDERAL

Um Sistema de Abastecimento de Água é dividido em Sistema Produtor de Água, que abrange as estruturas desde a captação até o tratamento, e em Sistema Distribuidor de Água,

com a Estação de Tratamento de Engenho das Lajes, com as Unidades de Tratamento Simplificado do Catetinho Baixo e Ponte de Terra, e 3 Unidades de cloração de poços profundos que complementam o fornecimento de água desse Sistema.

O Sistema Torto-Santa Maria também leva o nome de suas principais fontes de água (Barragem Santa Maria e a captação a fio d'água do Ribeirão do Torto) e em 2017 passou a receber a contribuição de duas novas captações, no Lago Paranoá e no Ribeirão Bananal, além da possibilidade de transferência de água para o Sistema Descoberto. Conta com a ETA Brasília – a maior desse sistema, construída na década de 1960 – e com as Estações de Tratamento de Água do Paranoá e do Lago Sul, que tratam as captações complementares Cachoeirinha e Cabeça do Veado, além da Unidade de Tratamento Simplificado Taquari. Em 2016, esse Sistema já abastecia as áreas urbanas do Plano Piloto, Lago Norte, Paranoá, Itapuã, Lago Sul, Jardim Botânico, Setor Habitacional Mangueiral, Cruzeiro, Sudoeste, Octogonal, SIA e Estrutural, e também já possuía infraestrutura de transferência de água para os Sistemas São Sebastião e Sobradinho-Planaltina.

O Sistema de Abastecimento Sobradinho-Planaltina possui alta complexidade operacional, devido à grande quantidade de captações superficiais e subterrâneas, o que exige muitos reservatórios temporários e unidades de tratamento. Abastece as Regiões Administrativas de Sobradinho I e II, Vale do Amanhecer e Planaltina. Cabe ressaltar que, por ser independente das captações das Barragens Descoberto e Santa Maria, esse Sistema não foi alvo do racionamento adotado durante a crise hídrica do DF entre 2016 e 2018. Contudo, por possuir captações superficiais a fio d'água sem acumulação, sofre grandes reduções de disponibilidade hídrica durante os períodos de estiagem.

O Sistema São Sebastião é estruturado em captações subterrâneas de água, sendo composto por 37 poços tubulares profundos e 4 Unidades de Tratamento Simplificado. Possui interligação com o Sistema Torto-Santa Maria para eventuais reforços no abastecimento. Esse Sistema fornece água apenas para a área urbana de São Sebastião e para o Complexo Penitenciário da Papuda.

Por fim, o Sistema Brazlândia é subdividido em duas partes independentes: uma formada por captações superficiais – cuja água é tratada na ETA de Brazlândia e abastece a área urbana de mesmo nome – e outra composta por poços profundos – que abastece o Núcleo

Habitacional INCRA 8. Por depender em parte de captações superficiais a fio d'água, esse Sistema também possui alta vulnerabilidade ao desabastecimento, uma vez que em períodos de estiagem sofre grandes reduções de disponibilidade hídrica.

Segundo a Adasa e outras instituições (2018), os Sistemas descritos atendiam, em conjunto, à demanda da população do DF, com uma produção média de 7.896 L/s em 2016, o que à época correspondia a 82% da capacidade instalada de 9.662 L/s. Apesar disso, a interação de diversos fatores (apresentados no item subsequente) que pressionam a operação do SAUA do DF levaram à ocorrência de grave crise hídrica entre os anos de 2016 e 2018.

4.2. CRISE HÍDRICA NO DISTRITO FEDERAL ENTRE 2016 E 2018

A crise hídrica no Distrito Federal entre os anos de 2016 e 2018 possui natureza multifacetada, e a contribuição relativa de cada uma de suas causas pode ser interpretada de formas distintas a depender dos objetivos da análise. Este item busca incitar a reflexão sobre as diversas complexidades que envolvem o SAUA do DF e os desafios na sua gestão a longo prazo, sem a pretensão de apontar de maneira definitiva os fatores que levaram à grave situação vivenciada por esse sistema.

O primeiro fator que merece atenção se refere à ocorrência de períodos severos e prolongados de estiagem entre os anos de 2015 e 2018, acompanhado pela redução brusca da disponibilidade hídrica dos sistemas produtores de água descritos. De acordo com os registros da rede de monitoramento hidrológico do DF, o triênio 2015-2018 apresentou totais de chuva entre 800 e 1.400 mm/ano, enquanto as médias anuais normalmente variam de 1.200 a 1.600 mm/ano. As regiões que geralmente apresentam maiores índices pluviométricos foram aquelas com menor quantidade de chuva entre 2015 e 2018: de 20% a 30% abaixo da média histórica. Tal situação, além de severa, perdurou por anos seguidos, atingindo maior criticidade no ano hidrológico 2016-2017. Uma das regiões do território do DF mais atingidas foi a Barragem do Descoberto, onde o total pluviométrico no ano em questão alcançou apenas 894 mm/ano, o menor valor já registrado desde o início dos monitoramentos, em 1979 (Adasa *et al.*, 2018).

As vazões dos corpos hídricos que alimentam as fontes de captação de água refletiram as estiagens, apresentando queda de 20% a 50% em todo o território do DF. Em relação aos

reservatórios mais importantes para o fornecimento de água, entre 2015 e 2018 observou-se queda de 20% a 40% nas vazões afluentes à Barragem do Descoberto e ao Reservatório Santa Maria, que juntos representavam à época mais de 80% do abastecimento urbano de água do Distrito Federal. A situação também foi grave nos sistemas dependentes de captação a fio d'água, sem reservatórios capazes de amortecer os impactos de períodos de estiagem prolongada (Adasa *et al.*, 2018).

Dentro desse contexto, é pertinente reafirmar a influência que a ocupação do solo possui na manutenção de mananciais e reservatórios para abastecimento de água. No caso do Distrito Federal, conforme já citado, a ocupação urbana de muitas regiões se deu de maneira desordenada e acelerada, trazendo consigo diversas consequências naturais – desmatamento e redução das matas ciliares, aumento da impermeabilização do solo e com ela o aumento de enchentes e do assoreamento de córregos e nascentes, redução da infiltração e dos níveis dos lençóis freáticos, e a consequente redução da recarga dos corpos hídricos superficiais.

Outra consequência é a dificuldade de conectar as áreas ocupadas irregularmente à infraestrutura urbana de distribuição de água e de outros serviços de saneamento, gerando ligações clandestinas cujo consumo dificilmente consegue ser controlado e considerado no âmbito de medidas de restrição de uso (GDF, 2017b). Uma particularidade no caso do Distrito Federal que é digna de menção é o fato de as bacias que mais contribuem com o abastecimento urbano serem também fonte de água para atividades de agricultura, sobretudo pequenos produtores de frutas e hortaliças, gerando conflitos de uso e mais uma condição que pressiona esse recurso já escasso.

Além disso, algumas discussões no meio técnico questionam a previsibilidade ou não da ocorrência das situações vivenciadas no Distrito Federal. Ainda nesse ínterim existem críticas associadas ao atraso na execução das obras relacionadas ao Sistema Produtor Corumbá IV, causados por fatores como a necessidade de ajustes e correções no projeto executivo (Tribunal de Contas da União – TCU, 2018).

Soma-se a essas condições elementos que podem apresentar pouca ou nenhuma previsibilidade, como a definição de tarifas para abastecimento, a efetividade de medidas de racionamento e o consumo crescente de água por parte da população e das atividades industriais, comerciais e agrícolas. Assim, o planejamento adaptativo resistente a incertezas

profundas representa uma alternativa importante de ser considerada para reduzir o risco de falhas e evitar o colapso do sistema de abastecimento urbano de água do Distrito Federal.

Em relação às medidas de caráter corretivo adotadas à época para combate aos altos riscos de desabastecimento, destacam-se (GDF, 2017b): regulação de recursos hídricos e serviços de abastecimento de água, alocação negociada de água, implantação de tarifas de contingência, acompanhamento do volume útil dos reservatórios, aumento da fiscalização do uso de recursos hídricos, redução de perdas e vazamentos, adoção de racionamento, investimento em novas fontes de captação e transferência de água (Lago Norte, córrego Bananal e reservatório Corumbá IV), e ações de educação ambiental.

A aplicação dessas medidas, associado ao aumento da precipitação e recuperação dos níveis dos reservatórios em 2018, permitiu encerrar as ações de racionamento e declarar o fim da situação de escassez hídrica em dezembro do mesmo ano. Frente às medidas apresentadas, percebe-se que o enfrentamento de uma crise hídrica envolve uma gestão multidisciplinar, envolvendo áreas como infraestrutura, comunicação, educação, fiscalização, regulação e economia (GDF, 2017b).

Além disso, a situação de escassez vivenciada no Distrito Federal entre 2016 e 2018 confirma a necessidade de planejamento a longo prazo que considere estratégias mais robustas e adaptativas, ou seja, que apresentem desempenho satisfatório em diversos estados de mundo possíveis e que sejam capazes de se adaptar mediante ocorrência de eventos não previsíveis ou difíceis de serem estimados. Dentro desse processo de planejamento, é importante estudar a fundo o sistema envolvido e todas as suas complexidades, e considerar ações bem definidas e detalhadas, que incluam informações sobre prazos de execução e interações com os diversos agentes e atores do sistema de abastecimento.

Conforme já descrito, a abordagem DU *Pathways* e o programa *WaterPaths* são ferramentas utilizadas especificamente para os fins indicados – planejamento adaptativo a longo prazo de SAUAs em contextos de incertezas profundas – e foram utilizados neste estudo para construção de planos de abastecimento urbano de água no Distrito Federal com tais características. Considerando as recomendações da primeira aplicação do *WaterPaths* no

Distrito Federal³, este trabalho pretende, além de avançar nas análises de performance das políticas adaptativas, também aplicar métodos alternativos para definição de importantes dados de entrada necessários à operação do programa, de forma a refletir a realidade do espaço urbano em estudo. Dentre esses dados, estão as séries sintéticas de vazão e evaporação que compõem a caracterização física dos cenários, e a classificação das condições de incerteza em profundas ou bem caracterizadas.

³ Conforme descrito no item 3.2.3, a primeira aplicação do *WaterPaths* no Distrito Federal ocorreu no âmbito do programa de mestrado do PTARH/UnB, em projeto desenvolvido pela então mestranda Andressa Pereira Giacomazzo.

5. METODOLOGIA

Este trabalho possui como núcleo central a elaboração e análise de propostas de planejamento de longo prazo, adaptativo e resistente a incertezas profundas, para o SAUA do DF. Para tanto, a metodologia deste trabalho buscou aplicar a estrutura *DU Pathways* (descrita no item 3.2.3 da Revisão Bibliográfica) para o Distrito Federal, sendo apresentada na Figura 5.1.

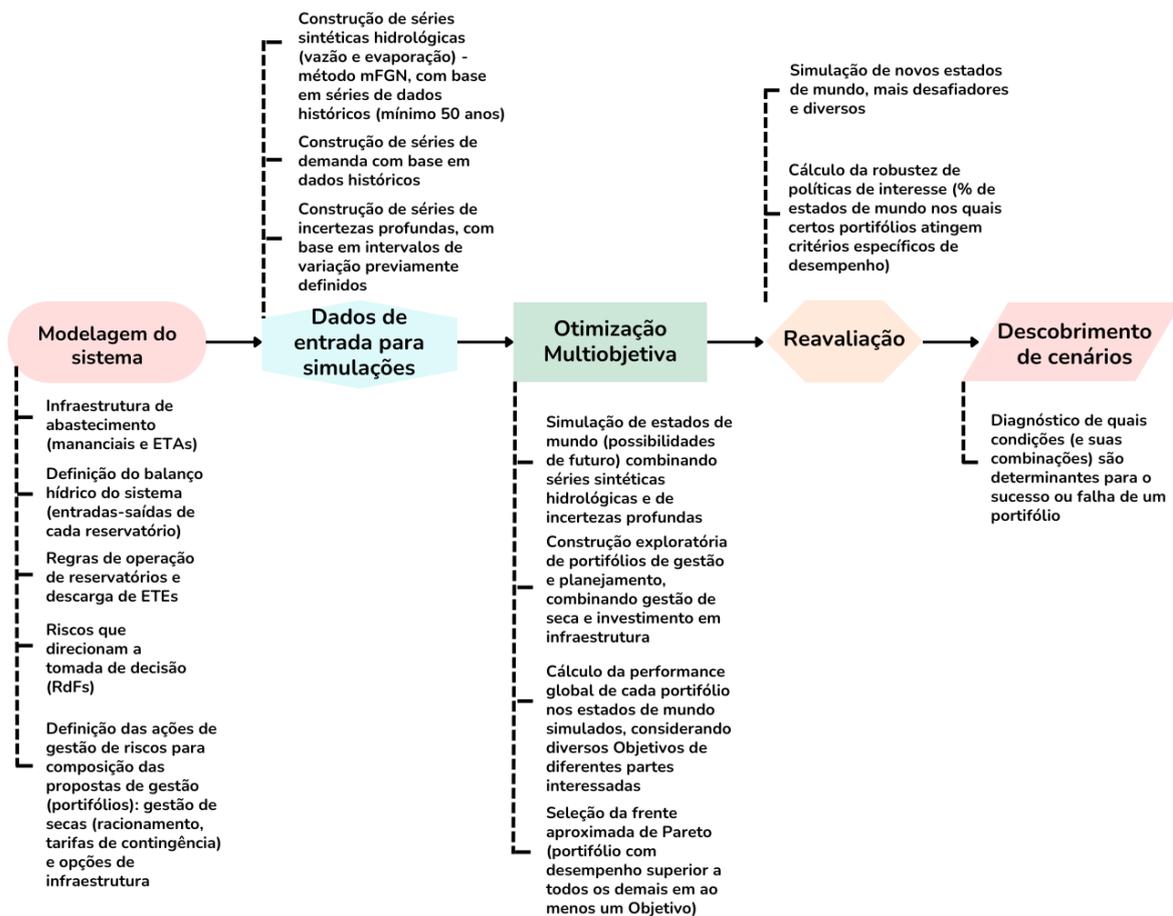


Figura 5.1 – Fluxograma metodológico desta pesquisa

A primeira etapa desta pesquisa, anterior à aplicação das etapas de *DU Pathways*, correspondeu à produção e consolidação de dados representativos da realidade do SAUA do DF, cabendo destaque para a geração de séries temporais sintéticas de vazão, evaporação e demanda, e a definição de fatores de incertezas profundas (FIPs). Esses dados subsidiaram a construção de milhares de estados de mundo, para testar de forma exploratória propostas de políticas, que combinam medidas de gestão de secas e restrição de uso de água com investimentos em infraestrutura para expansão do SAUA.

Tal processo de testagem correspondeu à segunda etapa metodológica – otimização multiobjetiva – e buscou selecionar as políticas que performassem de maneira satisfatória nas mais diversas possibilidades de futuro. Para viabilizar a execução desta etapa, o programa *WaterPaths* foi utilizado. O resultado dessa fase, uma frente de aproximada de Pareto de políticas, foi avaliada em termos de relações de compromisso frente aos objetivos almejados por diferentes partes interessadas.

Posteriormente, as políticas ótimas passaram por um processo de reavaliação, no qual essas estratégias de planejamento são submetidas a uma variedade ainda maior de cenários (com incertezas profundas) possíveis. Os resultados foram avaliados sob métricas de performance, robustez e arrependimento, conceitos descritos em seção específica. Por fim, foi realizado o processo de Análise de Cenários, buscando identificar condições do sistema que mais influenciam o desempenho de políticas no sucesso ou falha da operação e gestão do SAUA.

Frente à contextualização apresentada, a seção de Metodologia deste documento está estruturada em 4 subitens, que buscam descrever detalhadamente cada uma das etapas elencadas acima. O primeiro subitem trata dos processos para definição dos dados que caracterizaram do SAUA do DF e permitiram a construção dos diversos estados de mundo utilizados nas demais etapas. O segundo e terceiro subitens tratam do processo de Otimização Multiobjetiva e Reavaliação de políticas da frente aproximada de Pareto, respectivamente, enquanto o quarto subitem descreve a etapa final de análise de cenários.

É importante ressaltar que as etapas desenvolvidas neste trabalho, em especial as que envolvem a operação do *WaterPaths* e a análise dos resultados gerados, exigiram a utilização de computadores de alta performance, detentores de recursos de paralelização computacional que permitiram o processamento de milhares de dados e simulações de forma simultânea. Os computadores de alta performance utilizados neste trabalho, denominados *The Cube* e *Hopper*, foram disponibilizados e operados em parceria com o grupo de pesquisa do Professor Patrick Reed, da Universidade de Cornell, localizada em Ithaca, Estados Unidos.

Também é importante indicar que os esforços deste estudo foram concentrados nos Sistemas Produtores Descoberto e Santa Maria/Torto (Figura 5.2), que representam mais de 80% do abastecimento urbano de água do Distrito Federal (Adasa *et al.*, 2018). Assim, a abstração

do SAUA para fins de modelagem seguiu o disposto na Figura 5.3, considerando dois agrupamentos (áreas de serviço, AS) com perfis socioeconômicos e processos históricos de ocupação distintos: AS Descoberto, com limites geográficos coincidentes com o Sistema Produtor Descoberto; e AS Santa Maria, com limites geográficos coincidentes com o Sistema Produtor Santa Maria. Cabe indicar que configuração das principais estruturas e características das AS foram adaptadas de Giacomazzo (2020).

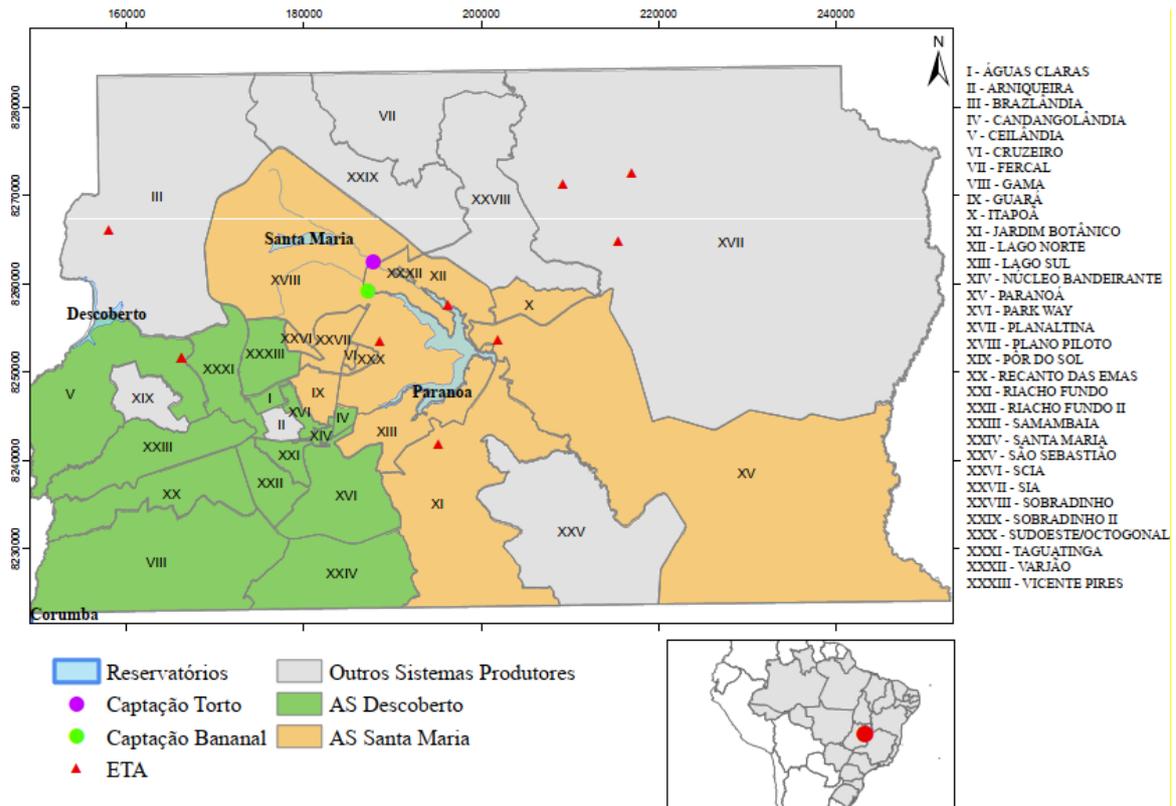


Figura 5.2 – Localização das AS Descoberto e AS Santa Maria dentro do SAUA do DF

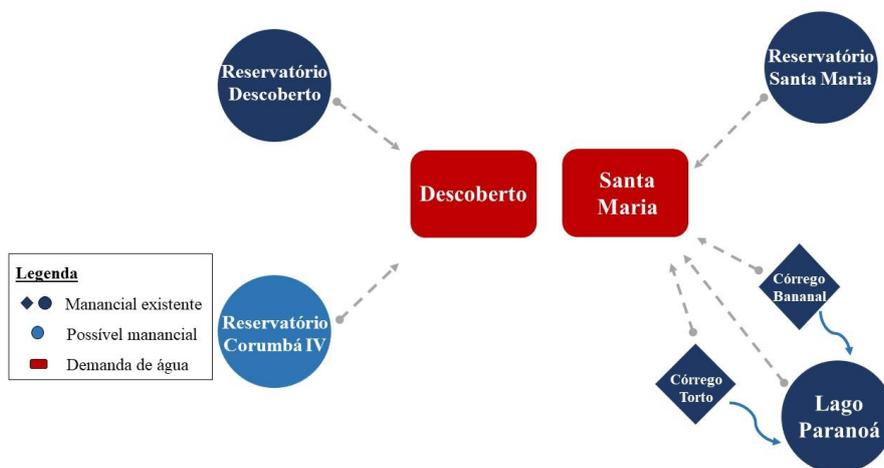


Figura 5.3 – Abstração conceitual do SAUA do DF utilizada para modelagem no *WaterPaths*

5.1. GERAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA *WATERPATHS*

Um dos fatores fundamentais para a correta utilização do *WaterPaths* é a definição adequada dos dados de entrada requeridos pelo modelo, considerando toda complexidade envolvida na representação do SAUA em estudo, de forma a construir uma aplicação representativa de sua dinâmica. Dentre essas informações, destacam-se: as séries de evaporação e vazão que caracterizam as condições hidroclimáticas do sistema, as projeções de demanda de água, a identificação e a classificação das incertezas atuantes no sistema.

Nesse sentido, cabe indicar que a estruturação dos dados de entrada do programa observou as recomendações da primeira aplicação DMDU no Distrito Federal, explicitadas em Giacomazzo (2020). Dessa forma, foram empregados novos métodos para construção das séries sintéticas de vazão e evaporação. Também foram utilizados novos recursos para aperfeiçoar a identificação das condições de incerteza profunda do sistema, e de seus limites de variação. A seguir serão apresentados os métodos utilizados para construção de cada tipologia de dados de entrada.

5.1.1. Séries Sintéticas de Vazão e Evaporação

As séries sintéticas de vazão e evaporação são dados obrigatórios para as simulações exploratórias de cenários durante a fase de otimização multiobjetiva proposta por *DU Pathways*, já que são elas – juntamente com as séries de demanda por água e os fatores de incerteza profunda – que caracterizam as condições do mundo em que cada portfólio de planejamento e gestão será testado. Por sua vez, esses cenários representam possíveis estados de mundo para o sistema, formados por séries climáticas (vazão e evaporação) geradas de forma sintética para produzir condições hidrológicas variadas. Assim, esta etapa metodológica teve por objetivo a construção de milhares de séries de vazão e evaporação de igual extensão temporal, dividida em intervalos semanais, para inserção no *WaterPaths*.

O método considerado mais adequado para aplicação neste trabalho é conhecido como *StreamFlow Generator* desenvolvido por Kirsch *et al.* (2013), que utiliza uma adaptação da técnica FGN denominada mFGN. Esse método gera séries temporais sintéticas e estocásticas de vazão que replicam os padrões de correlação temporal e espacial presentes nos registros históricos, além de possuir potencial para produção de séries sintéticas que reflitam

fenômenos relacionados às mudanças climáticas (Kirsch *et al.*, 2013). Os passos iniciais do método mFGN são comuns ao método FGN. Essas e as demais etapas de mFGN descritas no trabalho de Kirsch *et al.* (2013) serão apresentadas a seguir, sendo que neste trabalho o método mFGN será denominado Gerador de Vazões.

A base de dados utilizada no Gerador de Vazões consiste em uma matriz contendo todos os registros hidrológicos históricos da localidade para a qual se deseja construir séries sintéticas, e que é organizada com frequência semanal. Dessa forma, os itens de uma mesma linha correspondem aos dados das semanas (1 a 52) de um mesmo ano, e os elementos de uma mesma coluna correspondem aos dados de uma mesma semana para anos distintos. A primeira etapa do método parte da tomada do logaritmo dessa matriz, gerando a matriz \hat{Y} . O próximo passo consiste na padronização de \hat{Y} , para aproximá-la a uma distribuição sem tendências, do tipo Normal (0,1), conforme apresentado na Equação 5.1:

$$Y_{i,j} = (\hat{Y}_{i,j} - \bar{Y}_j) / \sigma_j \quad (5.1)$$

em que \bar{Y}_j corresponde à média da coluna j de $\hat{Y}_{i,j}$ e σ_j ao desvio padrão dessa mesma coluna. Após obter a matriz Y , procede-se à geração de uma matriz intermediária M , sendo que cada termo $M_{i,j}$ é retirado com reposição da sequência $[1,2,\dots,N]$, sendo N o número de anos de dados históricos disponíveis. A partir de M , a matriz X é construída pelo processo de *bootstrap*, representado na relação da Equação 5.2:

$$X_{i,j} = Y_{(M_{i,j}),j} \quad (5.2)$$

A princípio, os dados de X não estão correlacionados entre si, o que é tratado por meio da criação de uma matriz Z , utilizando a Equação 5.3:

$$Z = XQ \quad (5.3)$$

em que Q é uma matriz obtida pela decomposição de Cholesky representada na Equação 5.4:

$$\text{Corr}(Y) = QQ^T \quad (5.4)$$

onde Q e sua transposta Q^T são matrizes triangulares superiores e inferiores, respectivamente, e $\text{Corr}(Y)$ corresponde a uma matriz em que cada item de posição (i,j) representa o valor de correlação entre a coluna i e a coluna j da matriz Y .

Um entrave importante do método FGN é que a geração de séries sintéticas (vetor z) a partir de Z possui menores índices de correlação que as séries históricas, representadas pela matriz Y . Isso se justifica pelo fato de Q – e consequentemente Z – se originar da matriz $\text{Corr}(Y)$, que possui apenas dados de correlação intraanual (entre elementos de um mesmo ano) e não

interanual. Dessa forma, dados da mesma semana de anos diferentes não possuem correlações similares aos dados históricos, o que é particularmente limitante para construção de séries sintéticas de longa extensão, como é o caso deste trabalho. O método mFGN trata essa limitação por meio de uma técnica de manipulação de matrizes, representada na Figura 5.4, que reorganiza os dados da matriz Y de forma a expressar correlações interanuais, repassadas às matrizes X e Z .

Primeiramente, a matriz Y é convertida em um vetor de linha única, y , e dele são retirados os dados das primeiras e das últimas 26 semanas, dando origem ao vetor y' . Em seguida, y' é reformulado na matriz Y' , de mesmo formato que Y , contendo em cada coluna registros de uma semana específica para todos os anos de observação. A diferença é que Y' possui 52 semanas a menos de dados que Y , o que altera a ordem das semanas em cada coluna, de forma que em uma mesma linha tenham-se dados de anos subsequentes. Essa manipulação possibilita que a construção de $\text{Corr}(Y')$ inclua dados de correlação de anos consecutivos, permitindo capturar correlações interanuais, que poderão ser transmitidas às matrizes Q' e Z' .

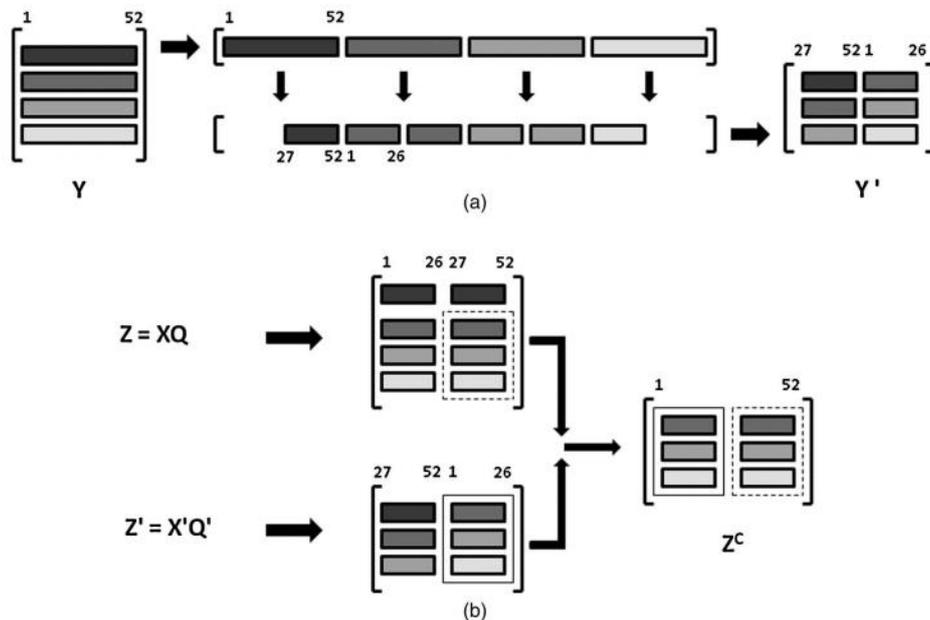


Figura 5.4 – Manipulação de matrizes pelo método mFGN. Fonte: Kirsch *et al.* (2013)

Seguindo o raciocínio supracitado, as Equações 5.3 e 5.4 são aplicadas duas vezes: uma para produzir as matrizes Q e Z , e uma segunda vez, após manipulação da matriz Y em Y' e X em X' , para produzir as matrizes Q' e Z' . Apesar de Z e Z' possuírem relações distintas entre as colunas e as semanas de dados que elas representam, essas matrizes podem ser

combinadas em uma terceira matriz Z^C que, quando convertida em um vetor de linha única z^c , gera séries temporais sintéticas que possuem correlação tanto intra quanto interanual. A Figura 5.4 também apresenta a forma com a qual Z e Z' devem ser combinadas para gerar Z^C .

A etapa final do método mFGN é a reversão da padronização dos dados em Z^C , para que esses tenham a mesma distribuição estatística dos dados históricos. Assim, tendo como referência a Equação 5.1, cada célula de Z^C é multiplicada pelo desvio padrão da coluna j correspondente, em seguida adiciona-se a esse valor a média da mesma coluna.

As operações para aplicação do método mFGN foram realizadas a partir de códigos construídos no programa *Matlab*, e a análise das séries geradas (apresentada nos Resultados deste trabalho) foi realizada com auxílio de figuras construídas em código *Python*.

Extensão e preenchimento de séries históricas

Conforme indicado no item 3.2.3, a dinâmica de cálculo de RdFs – que expressam a tolerância ao risco aceita por cada plano ou política – dentro do *WaterPaths* exige a disponibilidade de ao menos 50 anos de registros hidrológicos históricos, o que pode representar um desafio para sistemas hídricos que carecem de monitoramento contínuo e cujo início tenha ocorrido há poucas décadas. A existência de grande quantidade de dados históricos também é vantajosa para aplicação da técnica de Kirsch *et al.* (2013), empregada neste trabalho para geração de séries sintéticas de vazão e evaporação, uma vez que se trata de um método não paramétrico, que se baseia no comportamento estatístico dos dados disponíveis para geração de séries sintéticas que reproduzam os padrões hidrológicos do sistema em estudo. A estruturação de códigos de programação para aplicação dessa técnica também exige que não haja falhas nas séries históricas utilizadas.

Para o caso do SAUA do DF, os dados hidrológicos utilizados como base – tanto para cálculo dos RdFs quanto para geração de séries sintéticas – corresponderam às vazões afluentes e de evaporação do Reservatório Descoberto, do Reservatório Santa Maria, do Reservatório Paranoá e do Reservatório Corumbá, além dos dados de vazão dos córregos Bananal e Torto, que compõem a captação a fio d'água do Sistema Produtor Santa Maria/Torto. As estações

hidrológicas relacionadas a esses dados estão espacialmente distribuídas conforme apresentado na Figura 5.5, e descritas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

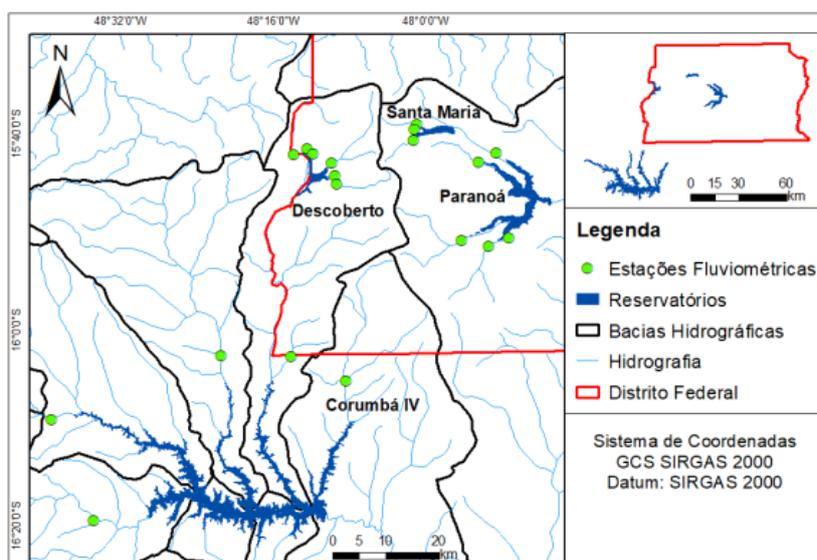


Figura 5.5 – Estações fluviométricas utilizadas no presente estudo. Fonte: Giacomazzo (2020)

Tabela 5.1 – Fontes dos dados hidrológicos de vazão utilizados neste trabalho

Área de Serviço	Reservatório	Estação	Identificação ANA*	Operador	Extensão da série (mês/ano)
Descoberto	Descoberto	Descoberto Chácara	60435000	Caesb	05/1978 - 03/2021
		Chapadinha Aviário	60435100	Caesb	05/1978 - 03/2021
		Olaria	60435150	Caesb	10/1985 - 03/2021
		Rodeador	60435200	Caesb	06/1978 - 03/2021
		Ribeirão das Pedras	60435400	Caesb	05/1978 - 03/2021
		Capão Comprido	60435300	Caesb	01/1979 - 03/2021
	Corumbá	Areias	60433000	Caesb	08/1995 - 05/2016
Santa Maria	Santa Maria	Santa Maria	60477200	Caesb	11/1965-05/2021
		Bananal	60477600	Caesb	01/2002 - 12/2020
	Paranoá	Torto	60477400	Caesb	09/1978 - 04/2018
		Riacho Fundo	60478400	Caesb	01/2003 - 03/2021
		Gama	60478500	Caesb	01/1971 - 12/2020
		Bananal	60477600	Caesb	01/2002 - 12/2020
		Cabeça de Veado	60478600	Caesb	12/1970 - 03/2021
	-	Bananal	60477600	Caesb	01/2002 - 12/2020
-	Torto	60477300	Caesb	01/1971 - 12/2020	

*ANA: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

Tabela 5.2 – Fontes dos dados hidrológicos de evaporação utilizados neste trabalho

Área de Serviço	Reservatório	Fonte dos dados	Extensão da série (anos)
Descoberto	Descoberto	ANA (2021)	01/2000-12/2019
	Corumbá IV	ANA (2021)	01/2003-12/2019
Santa Maria	Santa Maria	ANA (2021)	01/2004-12/2019
	Paranoá	ANA (2021)	01/2003-12/2019

Diversas das estações hidrológicas elencadas possuíam séries com tamanho insuficiente (inferior a 50 anos) ou com dados ausentes em alguns períodos temporais, sendo necessário nesses casos recorrer a técnicas de preenchimento de falhas e extensão de registros hidrológicos para obtenção de séries temporais com tamanho e representatividade satisfatórios.

Para obtenção de séries de vazão com 50 anos de extensão e dados contínuos, este trabalho recorreu ao método desenvolvido por Souza (2022), por intermédio do *software* Ferramenta de Apoio a Estudos Hidrológicos (FERAH), que constrói séries históricas preenchidas e estendidas a partir da seleção de modelos de regressão pautada em análises espaço-temporais e de valoração máxima da informação hidrológica disponível. Essa técnica pode ser sintetizada em 7 etapas:

1. Selecionam-se as “n” estações fluviométricas contidas na região de interesse que apresentem um tamanho mínimo de dados sem falhas na amostra;
2. Dentro de n, realiza-se uma avaliação espaço temporal: seleciona-se uma estação “i” (das n estações selecionadas na etapa 1) e avalia-se quais estações “j” apresentam um tamanho mínimo comum de dados;
3. Para as “j” estações que atenderam aos critérios 1 e 2, são testados modelos de regressão;
4. Verifica-se para todas as “k” combinações de estações e modelos, $k=j \times p$, onde “p” é o número de modelos de regressão, aqueles que atenderam ao critério mínimo de desempenho, critério este expresso por um coeficiente de determinação (r^2) mínimo admissível para aceitação de uma determinada combinação estação-modelo;
5. Ordenam-se as “k” combinações de modo decrescente de valores de r^2 ;
6. Para cada data diária que se deseja estender ou preencher uma falha da estação “i” em análise verifica-se, dentre todas as “k” combinações ordenadas, se alguma ou quais delas apresentam valores existentes nessa data e, caso exista pelo menos uma possibilidade, a combinação com melhor desempenho será utilizada na extensão ou no preenchimento do valor para essa data;
7. Repete-se a etapa 2 a 7 para todas as outras estações selecionadas para fins de extensão e preenchimento.

Seguindo a metodologia supracitada, com o auxílio do programa FERAH, foi possível obter séries de vazão satisfatórias (com 50 anos de dados históricos diários e contínuos), as quais foram utilizadas tanto para cálculo de RdFs quanto para obtenção das séries sintéticas de

vazão a partir do método de Kirsch *et al.* (2013). Cabe indicar que no caso dos reservatórios Santa Maria e Corumbá IV, o reduzido número de estações com quantidade mínima de dados de vazão levou à aplicação complementar de uma metodologia empírica comumente empregada para transferência de informações hidrológicas (Santos *et al.*, 2013), visando a obter valores totais de vazão afluente a esses reservatórios compatível com a realidade e com suas dimensões. Dessa forma, para as estações afluentes aos reservatórios Santa Maria e Corumbá IV, obteve-se a relação vazão/área de drenagem. Em seguida, multiplicou-se essa relação (ou sua média, no caso das duas estações do reservatório Santa Maria) pela área de drenagem total afluente a cada um dos mananciais, obtendo-se uma vazão única afluente a cada um dos reservatórios.

Os dados de evaporação (bruta média diária, expressa em milímetros de coluna d'água) para os reservatórios alvo deste estudo – Reservatórios Descoberto e Corumbá da AS Descoberto, e Reservatórios Santa Maria e Paranoá da AS Santa Maria – foram obtidos em consulta a dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Contudo, as séries históricas disponíveis possuíam frequência mensal e extensão inferior a 20 anos de dados. Frente à indisponibilidade de dados mais consistentes que permitissem a aplicação do método de Souza (2022), foi necessário recorrer à extensão da série histórica utilizando o próprio método de Kirsch *et al.* (2013), seguindo duas etapas principais:

1. Alteração da frequência de dados de mensal para diária, considerando como premissa aceitável que a evaporação média diária é constante para todos os dias dentro de um mesmo mês;
2. Utilização dos dados diários para geração de uma série sintética por reservatório pelo método de Kirsch *et al.* (2013) que complementasse a respectiva série histórica original e formasse uma nova série com extensão de 50 anos de dados, a qual foi utilizada para cálculo de RdFs e para geração das séries sintéticas de evaporação através do método de Kirsch *et al.* (2013).

5.1.2. Projeções de Demanda de Água

As projeções de demanda de água tiveram como referência o tratamento dado em Giacomazzo (2020), que teve como base a projeção de crescimento populacional do Distrito Federal por Região Administrativa até o ano de 2060, realizada pelo IBGE. O procedimento foi revisitado, considerando-se aceitável para os fins deste trabalho manter, ao longo do

horizonte simulado, os valores constantes das seguintes variáveis: taxa de crescimento da população (0,045% ao ano), consumo *per capita* e percentual de perdas na distribuição de água. Assim, as séries sintéticas de consumo de água foram obtidas por meio de nova execução do método desenvolvido por Giacomazzo (2020), cujos princípios gerais serão descritos a seguir.

- 1) Estimativa da projeção populacional semanal das Regiões Administrativas do Distrito Federal, para o período 2021-2060, com base no estudo do IBGE intitulado “Projeções da População – Brasil e Unidades da Federação: revisão 2018” (IBGE, 2018). Esse estudo apresentou a projeção populacional do Distrito Federal até 2060 mais recente à época da execução desta etapa da pesquisa. Assim, retirou-se dessa projeção a parcela referente à população rural, seguido pela desagregação da população urbana por RAs e por semana;
- 2) Cálculo do consumo de água *per capita* semanal médio por RA, tendo como base os valores médios da série de três anos (julho/2013 a junho/2016) apresentada no Plano Distrital de Saneamento Básico (GDF, 2017a). Cabe indicar que os valores de consumo não consideraram variações sazonais na demanda por água;
- 3) Obtenção da série de demanda de referência para cada AS, representada pela soma das demandas das RAs inclusas em cada uma delas (Descoberto ou Santa Maria). As demandas em cada uma das RAs são obtidas multiplicando-se a projeção populacional semanal pelo consumo *per capita* obtido no passo 2;
- 4) Geração das 1.000 séries de demanda para cada AS, considerando a aplicação do método LHS e a variação aleatória de fatores escalares que reflitam a variação de crescimento de demanda entre 77% e 190% - valor arbitrado em Giacomazzo (2020) e cuja manutenção foi considerada razoável em termos de variação possível para as projeções de demanda por água, e por esse motivo adotado também neste trabalho. A partir dos métodos descritos, foram geradas 1.000 séries sintéticas de demanda, com horizonte temporal de 2086 semanas (ou 40 anos).

5.1.3. Seleção e Definição de Intervalos de Incertezas Profundas

Conforme descrito no item 3.2.3, a classificação de incertezas em bem caracterizadas e profundas mostra-se relevante para avaliação da robustez das políticas ótimas construídas por meio da fase de otimização dentro da estrutura DU *Pathways*. Uma incerteza é tida como bem caracterizada quando é possível definir distribuições de probabilidade de sua

ocorrência, e quando se conhece bem suas características e comportamento (Trindade, 2019). Caso não seja viável determinar esses fatores, ou mesmo quando as partes interessadas e os especialistas não conhecem ou não concordam sobre a dinâmica do sistema, os possíveis resultados ou os desdobramentos do futuro, a incerteza será caracterizada como profunda (Trindade *et al.*, 2020).

A consideração de incertezas profundas exige não apenas a identificação de um fator como pertencente a essa categoria de incertezas, mas também a delimitação de um intervalo numérico dentro do qual essa incerteza poderá variar estocasticamente. Diante de tais exigências, é importante entender a visão das principais partes interessadas no SAUA do DF para identificar quais fatores se enquadram como incertezas profundas e definir seus limites de variação.

Portanto, neste trabalho, a definição dos itens descritos acima se apoiou em informações coletadas junto a especialistas das principais instituições responsáveis pela regulação e pela operação do SAUA do DF – Adasa e Caesb, respectivamente. Nesse sentido, foram agendadas diversas reuniões *online* ou presenciais, objetivando discutir o rol de incertezas profundas presentes no SAUA do DF, e seus respectivos intervalos de variação. Um segundo objetivo foi buscar entender as várias perspectivas sobre a gestão de riscos dentro da operação do sistema em estudo, permitindo um entendimento mais completo do contexto da pesquisa, bem como apresentar às instituições responsáveis por sua operação e regulação novas abordagens para enfrentar o desafio de planejamento e gestão de SAUAs considerando horizontes de longo prazo.

A partir das informações obtidas nos processos de consulta a técnicos e especialistas, foram construídos 1.000 vetores de incertezas profundas (Ψ_{IP}), cada um composto por todos os fatores definidos, contendo valores amostrados de forma aleatória dentro faixas de variação determinadas para cada condição FIP. O processo de amostragem foi realizado via método LHS (aplicado em ambiente de programação *Python*) de forma a garantir a seleção aleatória e homogênea de valores dentro do espaço amostral.

5.1.4. Outros dados de entrada

Os demais dados de entrada necessários à operação do *WaterPaths* – opções de ação de curto prazo (Tabela 5.3) e longo prazo (Tabela 5.4) que podem ser adotadas no âmbito dos portfólios para gestão de riscos; custos financeiros de cada ação de curto e longo prazo a ser considerada; prazos de implantação e licenciamento de cada infraestrutura em potencial; dados de seguros financeiros e fundos de contingência – foram mantidos conforme as definições realizadas em Giacomazzo (2020).

Tabela 5.3 – Ações de gestão de curto prazo disponíveis para mitigação de secas nas AS

Medida de gestão de curto prazo
Realização de campanhas de uso consciente da água
Aplicação de tarifas de contingência
Adoção de racionamento de água
Transferência de água (bruta ou tratada) entre sistemas

Tabela 5.4 – Ações disponíveis para gestão de riscos de falha de longo prazo nas AS.
Adaptado de Giacomazzo (2020)

	Infraestrutura	Descrição	Custo (milhões R\$)	Tempo de licenciamento (anos)	Aporte de água(L/s)
Descoberto	Corumba - 1ª fase	Implantação de novo Sistema Produtor	276,50	0	1.400
	Corumba - 2ª fase	Ampliação da capacidade de produção associada à ETA Valparaíso	222,10	0	1.400
	Corumba - 3ª fase	Ampliação da capacidade de produção da ETA Valparaíso e implantação de novas adutoras de água bruta	251,40	5	1.200
	Elevação do nível d'água da barragem Descoberto	Alteamento da crista do vertedouro da barragem em 1,5 m	7,50	0	400
Santa Maria	Paranoá - 1ª fase	Construção da ETA Lago Sul na porção sul do Lago Paranoá	60,30	0	700
	Paranoá - 2ª fase	Ampliação da capacidade de produção da ETA Lago Sul	60,30	0	700
	Paranoá - 3ª fase	Ampliação da capacidade de produção da ETA Lago Sul e Lago Norte	60,30	0	700

5.2. OTIMIZAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE POLÍTICAS ÓTIMAS

Uma vez definidos e consolidados, os dados de entrada solicitados pelo *WaterPaths* foram utilizados para construção de estados de mundo, cada um composto por uma série de vazão, uma série de evaporação, uma série de demanda de água e por um vetor contendo todos os

fatores de incertezas profundas, amostrado dos 1.000 vetores Ψ_{IP} . Para cada estado de mundo, a combinação do vetor de incerteza profunda aos vetores de vazão, evaporação e demanda ocorreu de maneira aleatória, assumindo-se que não existia correlação entre esses elementos, dinâmica apresentada na Figura 5.6.

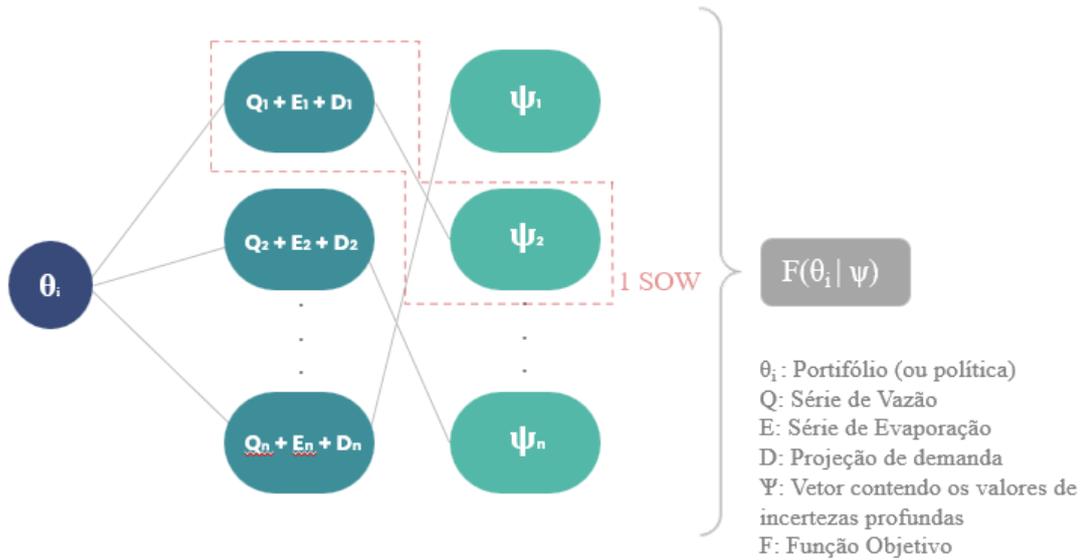


Figura 5.6 – Processo de construção de cenários e de avaliação de cada política θ construída pelo algoritmo evolucionário.

A operação do Módulo de Otimização do programa se iniciou com a construção das políticas a serem testadas. Cabe reforçar que o programa interpreta um portfólio ou política θ como uma combinação de tolerâncias a riscos de curto e longo prazo – expressas matematicamente por variáveis decisórias – que, se ultrapassadas, acionam ações de gestão de secas ou de construção de infraestruturas. A relação matemática que representa uma política θ está indicada na Equação 5.5:

$$\theta = [\theta_{gr}, \theta_{\Delta gr}, \theta_{gt}, \theta_{cafc}, \theta_{ci}, OCI] \quad (5.5)$$

em que θ_{gr} corresponde ao limite de tolerância a risco que acionam restrições leves de uso da água (campanhas educacionais e tarifas de contingência), $\theta_{\Delta gr}$ corresponde ao limite para acionamento de restrições severas ao uso da água (acionamento e tarifas de contingência), θ_{gt} representa o limite que aciona solicitações de transferência de água a outros sistemas produtores, θ_{cafc} consiste no limite que aciona contribuições a um fundo de contingência financeira para mitigação de crises hídricas, θ_{ci} corresponde ao limite que aciona a construção ou expansão de infraestruturas relacionadas ao armazenamento ou tratamento de água, e OCI representa a ordem de preferência para construção das infraestruturas. Os limites de tolerância são comumente denominados de “gatilhos”, uma vez que quando atingem

determinado valor, acionam a implementação de alguma ação de gestão, de curto ou de longo prazo.

Considerando a formulação matemática da Equação 5.5, o processo de otimização consiste na utilização de um algoritmo MOEA (no caso deste estudo, MS Borg MOEA) para gerar, de forma exploratória, propostas de solução, cuja performance é mensurada de maneira multiobjetiva, quando cada portfólio é submetido aos milhares de estados de mundo produzidos pela combinação de séries de vazão, evaporação, demanda e incertezas profundas. A aplicação de uma política a um estado de mundo consiste em uma execução, e uma simulação será formada por 1.000 execuções (aplicação de uma mesma política a 1.000 estados de mundo distintos), dinâmica também apresentada na Figura 5.6. O resultado final da performance de uma política em uma simulação é representado pela média de desempenho dentre todos os estados de mundo testados, para cada critério (FO) considerado. A representação matemática do cálculo de cada FO em uma simulação é apresentada no Apêndice A deste documento.

A seleção das políticas com melhor performance é realizada também por meio de análise multiobjetiva, mas de maneira distinta, matematicamente expressa nas Equações 5.6 e 5.7:

$$\theta^* = \operatorname{argmin}_{\theta} F \quad (5.6)$$

em que

$$F = \begin{bmatrix} -f_{conf} \\ f_{fr} \\ f_{vpl} \\ f_{cam} \\ f_{cPPP} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

onde a Função F consolida todos os objetivos (ou FOs) considerados relevantes para as partes interessadas do SAUA em estudo. Dessa forma, f_{conf} corresponde à confiabilidade, ou seja, à porcentagem de anos dentro das execuções em que o sistema operou sem que seus reservatórios atingissem volumes inferiores a 20% de sua capacidade máxima. A função f_{fr} representa a frequência de restrição, ou seja, a quantidade de anos, dentre todas as execuções, em que foi necessário adotar medidas de restrição de uso da água. O critério f_{vpl} consiste no valor presente líquido do custo das infraestruturas a serem instaladas no futuro, sendo avaliada em todas as execuções da simulação. A função f_{cam} corresponde ao custo anual médio de operação do sistema, sendo calculado pela média dos custos anuais médios de operação em todas as execuções da simulação. Por fim, f_{cPPP} representa os custos anuais

considerando o pior percentil de atuação das políticas, expressando o maior custo de operação do sistema, dentre todas as execuções, considerando o pior percentil de custos para o conjunto de execuções.

Conforme indicado na Equação 5.6, a lógica para seleção das políticas ótimas (ou não dominadas, ou frente aproximada de Pareto) busca minimizar o valor global de F , a saber:

- Confiabilidade (CONF): busca-se o valor máximo dentre todas as políticas;
- Frequência de restrição (FR): busca-se o valor mínimo dentre todas as políticas;
- Valor presente líquido do custo de infraestrutura (VPL): busca-se o valor mínimo dentre todas as políticas;
- Custo anual médio de operação do sistema (CAM): busca-se o valor mínimo dentre todas as políticas;
- Custo do pior primeiro percentil (CPPP): busca-se o valor mínimo dentre todas as políticas.

Ao utilizar os recursos do algoritmo evolucionário multiobjetivo MS Borg MOEA, foi possível gerar opções de políticas e selecionar as não dominadas, ou seja, aquelas com melhor desempenho que todas as demais em ao menos uma FO. Assim, o programa construiu uma frente aproximada de Pareto de políticas ótimas, compostas por soluções de compromisso, cada uma possuindo um perfil particular de performance para as diversas FOs.

Cabe lembrar que a fase de otimização proposta neste trabalho baseia-se no método *DU Pathways*, proposta por Trindade *et al.* (2019), uma adaptação de MORDM que incorpora incertezas profundas nos cenários utilizados já na fase de otimização, gerando políticas mais robustas e resistentes a esse tipo de incerteza. Em contrapartida, a estrutura clássica de MORDM incorpora incertezas profundas apenas na fase de reavaliação.

A análise dos resultados desta etapa buscou investigar relações de compromisso das políticas da frente aproximada de Pareto, resultado do processo de otimização multiobjetiva. Nesse sentido, a performance das soluções estratégicas foi segregada por AS, buscando identificar possíveis disparidades na vulnerabilidade e capacidade de adaptação entre elas, devido a diferenças socioeconômicas. A dinâmica temporal do desempenho das políticas também foi estudada, bem como quais e quando as opções de infraestrutura foram acionadas ao longo das semanas de simulação. Os resultados e análises desenvolvidos neste trabalho também foram investigados sob a perspectiva do impacto que novos dados de entrada podem ter no

perfil de desempenho das políticas geradas durante o processo de otimização, comparativamente aos métodos e dados hidrológicos utilizados em Giacomazzo (2020).

5.3. REAVALIAÇÃO

A aplicação de princípios DMDU envolve uma mudança do paradigma “prever e agir”, para abordagens que foquem em descobrir quais condições levam o sistema a falhar, e quais ações de gestão são mais adequadas a cada possibilidade de mundo futuro, aumentando a capacidade de adaptação (Walker *et al.*, 2013b). Em termos de simulações computacionais, da abordagem *DU Pathways* e do uso do *WaterPaths*, tal mudança pode ser traduzida em um processo de reavaliação das políticas da frente aproximada de Pareto, que teste tais estratégias em cenários mais desafiadores, os quais também incluem incertezas profundas. Para tanto, foi necessário produzir 1.000 novas séries sintéticas de vazão, evaporação, demanda e FIPs seguindo os mesmos processos metodológicos já descritos neste trabalho. Vale ressaltar que o processo de combinação de tais séries diferiu em relação à fase de otimização: na reavaliação, cada associação vazão-evaporação-demanda foi combinada com todos os vetores DU construídos, gerando um número de testagens bem superior àquelas realizadas na primeira fase de operação do *WaterPaths* (Figura 5.7). O cálculo de performance de cada política permaneceu o mesmo, sendo contabilizado em termos das cinco Funções Objetivo e considerando o conjunto de cenários aos quais cada política foi submetida.

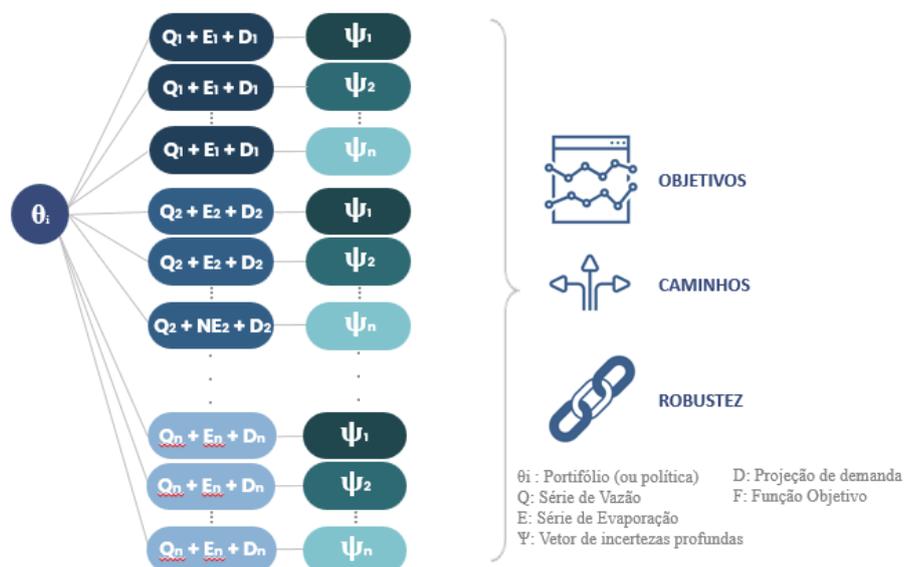


Figura 5.7 – Processo de construção de cenários para Reavaliação da Frente Ótima de Pareto

Os resultados gerados na fase de Reavaliação foram analisados sob três perspectivas distintas. A primeira delas, o nível de satisfação (Starr, 1963), representa a parcela de estados de mundo em que uma determinada política foi capaz de atingir certos níveis de performance, formulação matemática expressa nas Equações 5.8 e 5.9:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Lambda_{\theta,j} \quad (5.8)$$

em que

$$\Lambda_{\theta,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } F(\theta) \leq \Phi_j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.9)$$

onde Φ representa um vetor com os critérios de performance desejados. Tendo em vista a ausência de aplicações desse tipo em realidades brasileiras, inicialmente foram utilizados critérios já empregados na Literatura Internacional (Gold *et al.*, 2022; Herman *et al.*, 2015; Trindade *et al.*, 2019) – sendo eles confiabilidade superior a 90%, frequência de restrição inferior a 20% e pior percentil de custos inferior a 10% da receita annual.

Posteriormente, a robustez foi explorada de maneira alternativa, avaliando duas políticas de destaque e como a mudança nos critérios de satisfação podem alterar a aceitabilidade de performance de cada uma delas. Em seguida, a robustez das políticas foi avaliada sob a perspectiva de duas métricas de arrependimento.

O primeiro tipo de arrependimento (tipo I), avalia quanto a performance de uma certa política se desvia de sua própria performance em um estado de mundo referencial (Herman *et al.*, 2015), medindo as consequências que premissas incorretas sobre o futuro podem ter sob o desempenho de uma certa política. A relação matemática que expressa o arrependimento tipo I está representada nas Equações 5.10 e 5.11:

$$R1 = \max_i [D_{i,90}; P(D_i \leq D_{i,90})] = 0.90 \quad (5.10)$$

$$R1 = \max_i [D_{i,90}; P(D_i \leq D_{i,90})] = 0.90 \quad D_{i,j} = F(\theta)_{i,j} - F(\theta)_i^b \quad (5.11)$$

onde $F(\theta)_i^b$ representa o valor da FO i no estado de mundo referencial e $F(\theta)_{i,j}$ representa o valor da FO i calculada no estado de mundo j (Herman *et al.*, 2015).

A segunda métrica de arrependimento (tipo II), mede a diferença entre a performance da melhor política em um estado de mundo e a performance de uma certa política nesse mesmo estado de mundo, buscando expressar o impacto de escolha de uma política não adequada

(Savage, 1951). A relação matemática do arrependimento tipo II é apresentada nas Equações 5.12 e 5.13.

$$R2 = \max_i [D_{i,90}; P(D_i \leq D_{i,90})] = 0.90 \quad (5.12)$$

$$D_{i,j} = F(\theta)_{i,j} - \min_{\theta} F(\theta)_{i,j} \quad (5.13)$$

onde $\min_{\theta} F(\theta)_{i,j}$ representa a melhor FO i tomada dentre todas as políticas θ em um certo estado de mundo j .

5.4. ANÁLISE DE CENÁRIOS

A etapa final desta pesquisa buscou mapear quais condições ou estados de mundo são determinantes para sucesso ou falha das políticas testadas. Essa avaliação visa mapear regiões de incerteza (e de combinações entre incertezas) que devem ser evitadas ou buscadas em caso de uma certa política ser selecionada para implementação. Para tanto, fez-se uso do recurso conhecido por Análise de Cenários, que utiliza aprendizado de máquinas e mineração de dados para mapear quais combinações de FIPs geram vulnerabilidades e falhas na performance de soluções (Groves & Lempert, 2007; Bryant & Lempert, 2010; Jafino & Kwakkel, 2021). Em termos gerais, tais recursos avaliam todas as combinações de incertezas nos cenários simulados durante a etapa de Reavaliação, e desempenho correspondente para cada política analisada, classificando a relevância de cada incerteza (e de seus valores) para a falha ou sucesso das estratégias de planejamento testadas.

Neste trabalho, para execução da Análise de Cenários foi aplicada a técnica GBT (Freund and Schapire, 1999), um método de aprendizado de máquinas baseado em dinâmicas de árvores de decisão que prevê a probabilidade de sucesso ou falha de uma política. A escolha dessa técnica se deu, sobretudo, devido a sua capacidade de mapear e identificar regiões não lineares de sucesso/falha de maneira visualmente interpretável.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo se inicia com a apresentação das séries sintéticas de vazão e evaporação, seguida pela apresentação dos demais dados utilizados para construção de alternativas de futuro que sejam realistas para a realidade do SAUA do DF, subsidiando a operação do programa *WaterPaths*. Posteriormente, serão apresentados os resultados do processo de otimização multiobjetiva (frente aproximada de Pareto de políticas otimizadas), juntamente com discussões relacionadas ao desempenho de algumas políticas.

Em seguida, apresenta-se os resultados do processo de reavaliação das políticas não dominadas em cenários mais diversos e potencialmente mais desafiadores. Por fim, são efetuadas análises relacionadas à robustez das soluções e discussões acerca das condições que mais influenciam a operação do sistema e sua performance (análise de cenários).

6.1. DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA *WATERPATHS*

Esta seção apresenta análises das séries sintéticas de vazão, evaporação e demanda desenvolvidas para subsidiar a construção de estados de mundo nas etapas de otimização multiobjetiva e reavaliação, por meio do programa *WaterPaths*. Em seguida, são apresentadas as incertezas profundas empregadas nesta pesquisa para representar o SAUA do DF, acompanhadas de seus intervalos de variação e valores de referência. A partir desses três últimos elementos, foram construídos os vetores de incertezas profundas incorporados nos cenários futuros construídos nas fases de otimização multiobjetiva e reavaliação.

6.1.1. Séries sintéticas de vazão e evaporação

Conforme descrito na Metodologia deste trabalho (item 5.1.1), a aplicação do método de Souza (2022) por meio do programa FERAH permitiu a obtenção de séries de vazão com 50 anos de extensão, cujas estações de monitoramento estão relacionadas na Tabela 5.1 e na Figura 5.5, e que puderam ser utilizadas como referência da realidade hidrológica observada nas AS.

A partir desses dados, foram construídas séries de vazão única afluente a cada um dos reservatórios da AS Descoberto – reservatórios Descoberto e Corumbá IV – e da AS Santa Maria – reservatórios Santa Maria e Paranoá, além de uma vazão representativa do conjunto de captações a fio d’água dos ribeirões Torto e Bananal, que fazem parte da AS Santa Maria.

Assim, foram obtidas 5 séries representativas do histórico de vazão, e a cada uma delas foi aplicado o método descrito no item 5.1.1 para geração de mil séries sintéticas para cada fase de operação do *WaterPaths*, com extensão temporal de 2086 semanas (40 anos), conforme ilustrado nas Figuras 6.1 a 6.5. Uma análise inicial permite verificar variabilidade intra e interanual das séries hidrológicas ao longo de toda a extensão temporal de 40 anos, fato favorável para utilização dos dados em análises exploratórias de cenários.

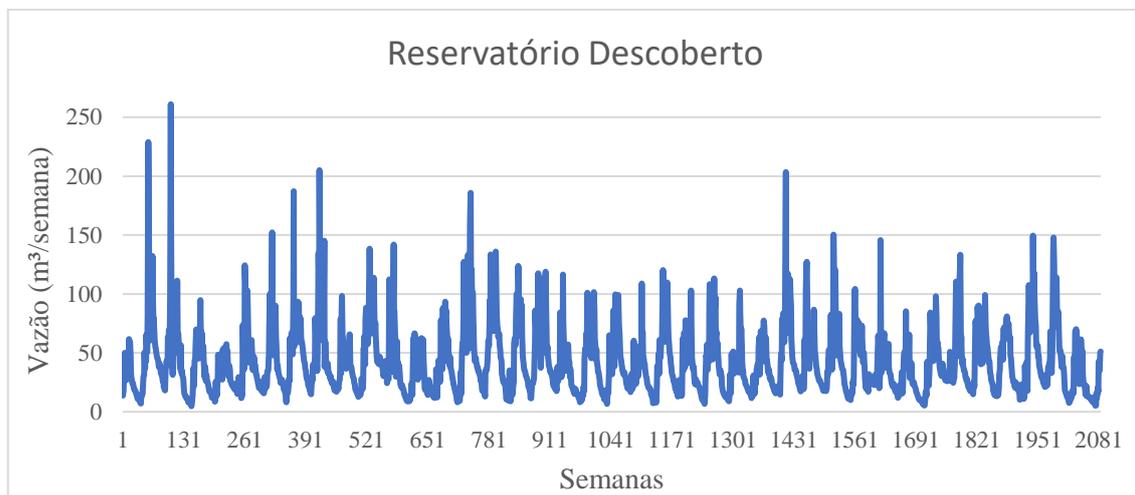


Figura 6.1 – Exemplo de série sintética de vazão afluente ao Reservatório Descoberto, com duração de 40 anos (2086 semanas)

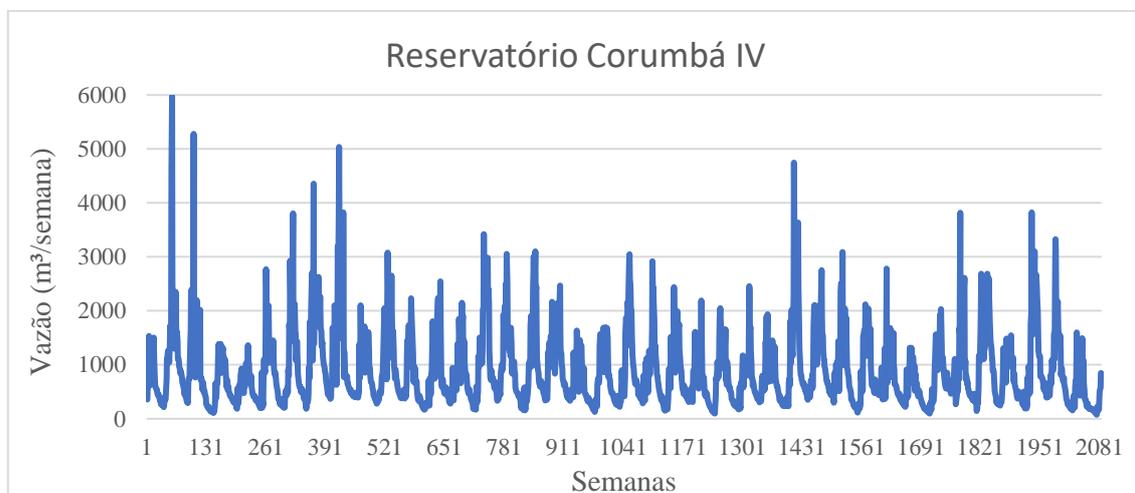


Figura 6.2 – Exemplo de série sintética de vazão afluente ao Reservatório Corumbá IV, com duração de 40 anos (2086 semanas)

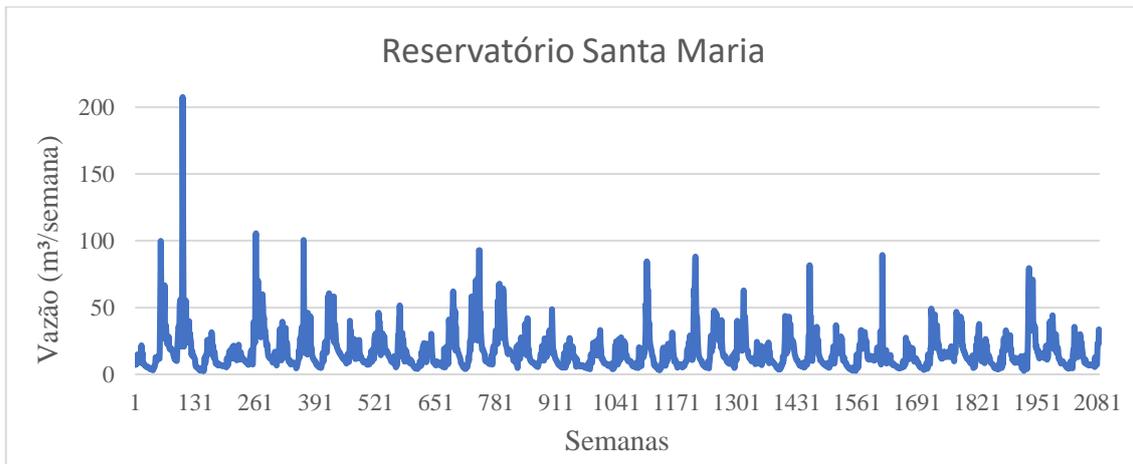


Figura 6.3 – Exemplo de série sintética de vazão afluente ao Reservatório Santa Maria, com duração de 40 anos (2086 semanas)

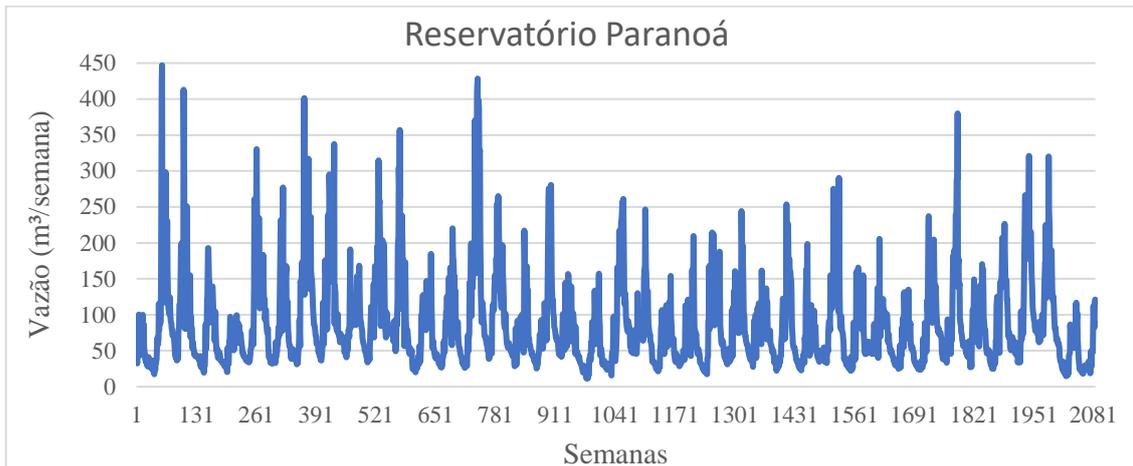


Figura 6.4 – Exemplo de série sintética de vazão afluente ao Lago Paranoá, com duração de 40 anos (2086 semanas)

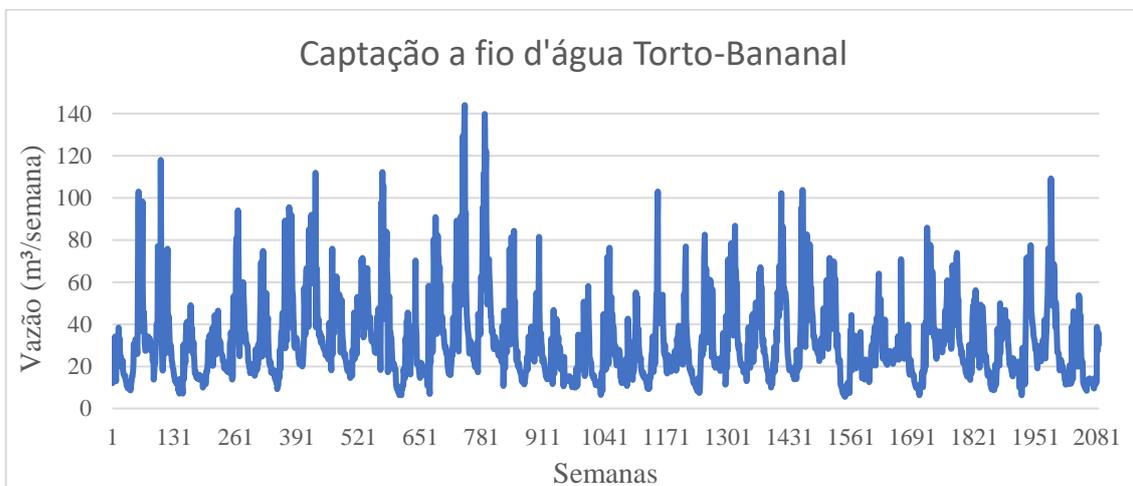


Figura 6.5 – Exemplo de série sintética gerada para a captação a fio d'água representativa dos córregos Torto e Bananal, com duração de 40 anos (2086 semanas)

A seguir, são apresentados resultados de avaliações realizadas com 100 amostras de séries sintéticas de vazão geradas para cada manancial, comparando-as com os registros históricos. Essas análises buscaram verificar se o método empregado (Gerador de Vazões) foi capaz de gerar séries sintéticas que reproduzem as características estatísticas das séries históricas, ao mesmo tempo que expandem a variabilidade dos cenários hidrológicos possíveis em relação ao histórico observado. Foram produzidas curvas permanência para todos os anos de todas as séries sintéticas, comparando-as aos dados históricos (Figura 6.6).

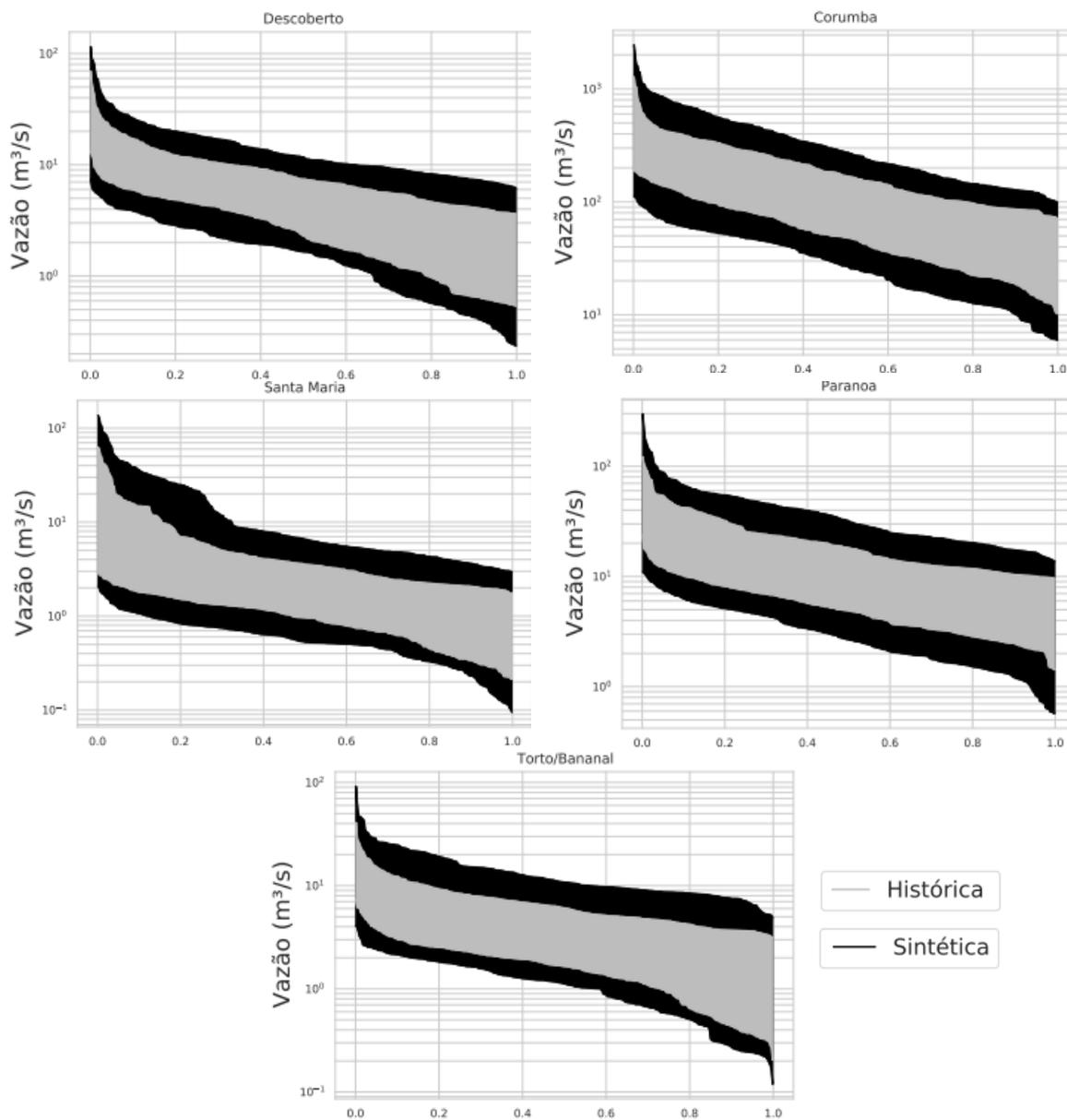


Figura 6.6 – Curvas de probabilidade de excedência para as fontes de água dos Sistemas Descoberto e Santa Maria/Torto

Para todas as fontes de água, os dados sintéticos (preto) reconstroem com sucesso os padrões de vazão observados para os dados históricos (cinza), e expandem o intervalo de vazões possíveis, já que alcançam valores superiores e inferiores mais extremos – fato esse desejável para os objetivos desta pesquisa, que pretende testar estratégias de planejamento em cenários os mais diversos e desafiadores possíveis, respeitando a realidade do sistema em estudo.

Além disso, os dados sintéticos também não aparentam possuir vieses, já que a expansão de extremos não possui direção preferencial definida. Por fim, os dados sintéticos também aparentam reproduzir a distribuição intraanual de vazão, já que suas curvas de probabilidade de excedência possuem formato similar à curva dos dados históricos.

A avaliação da aderência das séries sintéticas às características estatísticas históricas também pôde ser realizada por meio da análise do comportamento de parâmetros estatísticos dos dados sintéticos, como os momentos de primeira e segunda ordem. Para tanto, os dados sintéticos foram organizados de maneira anual, o mesmo sendo feito para os registros históricos. A partir dessa divisão foram construídos gráficos do tipo *boxplot* contendo dados mensais acumulados de vazão, média e desvio padrão, tanto das informações históricas quanto dos dados sintéticos (Figuras 6.7 a 6.11).

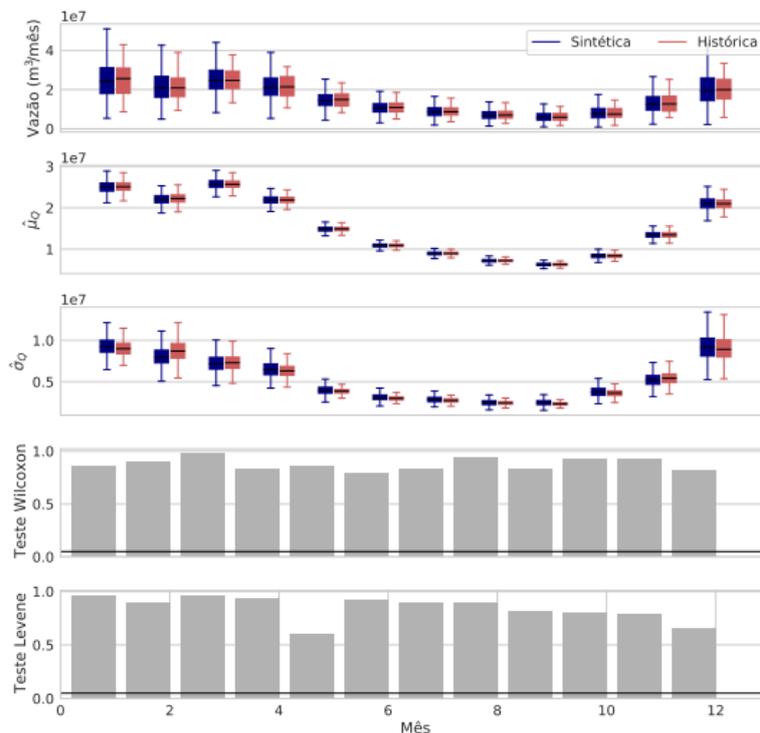


Figura 6.7 – Análises estatísticas das séries sintéticas das vazões afluentes ao Reservatório Descoberto

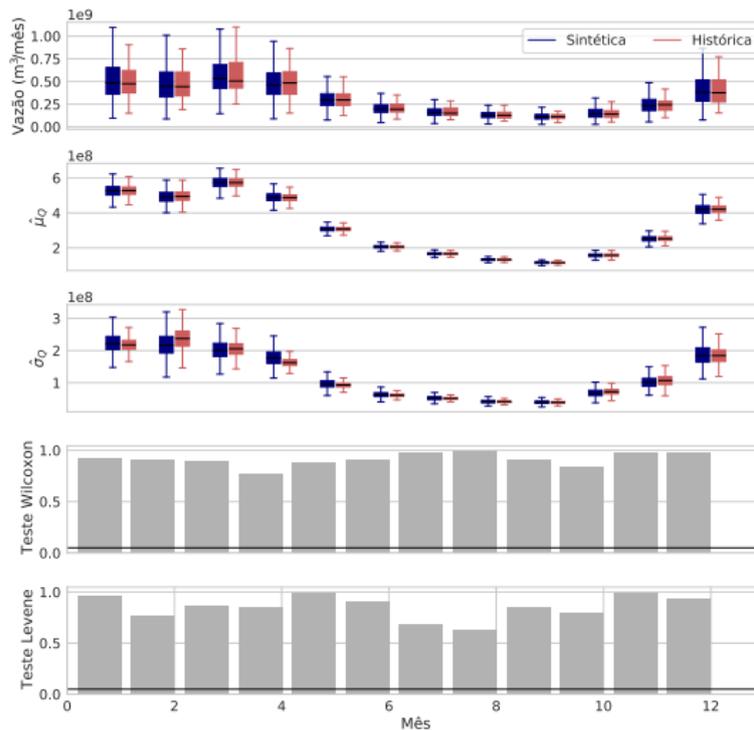


Figura 6.8 – Análises estatísticas das séries sintéticas das vazões afluentes ao Reservatório Corumbá IV

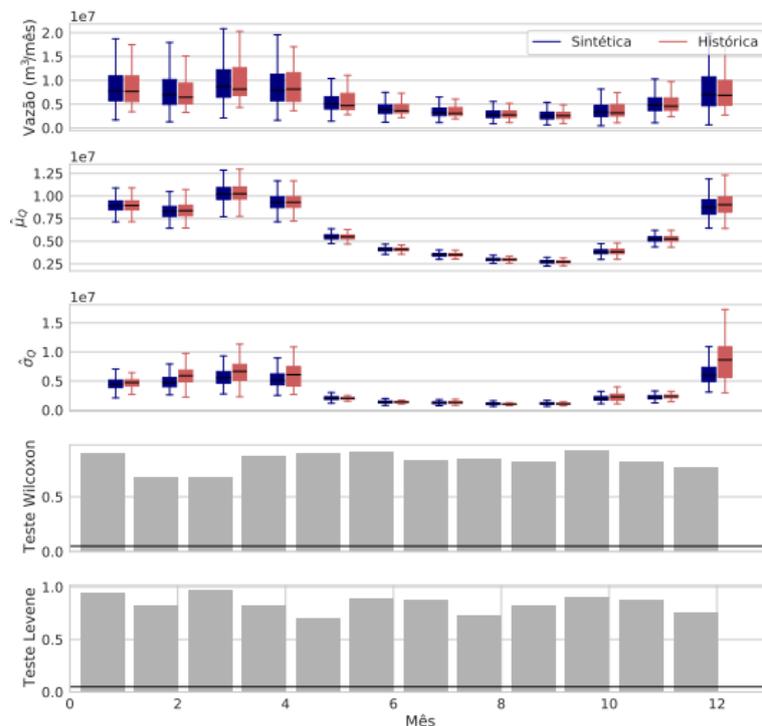


Figura 6.9 – Análises estatísticas das séries sintéticas das vazões afluentes ao Reservatório Santa Maria

Por meio das figuras é possível verificar que as séries sintéticas (azul) possuem comportamento estatístico consideravelmente similar aos dados históricos (magenta), o que é confirmado também pela execução de testes de hipótese não paramétricos (soma dos postos

de Wilcoxon, e Levene), que em todos os casos indicam que os momentos de primeira e segunda ordem das séries sintéticas não são estatisticamente distintos desses parâmetros obtidos para os dados históricos (caso em que p-valor seria superior a 0,05).

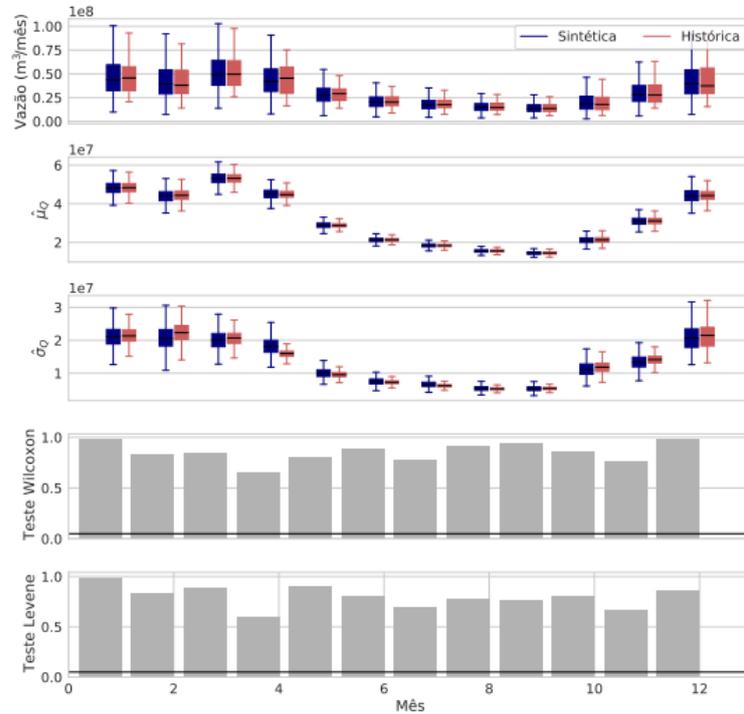


Figura 6.10 – Análises estatísticas das séries sintéticas das vazões afluentes ao Lago Paranoá

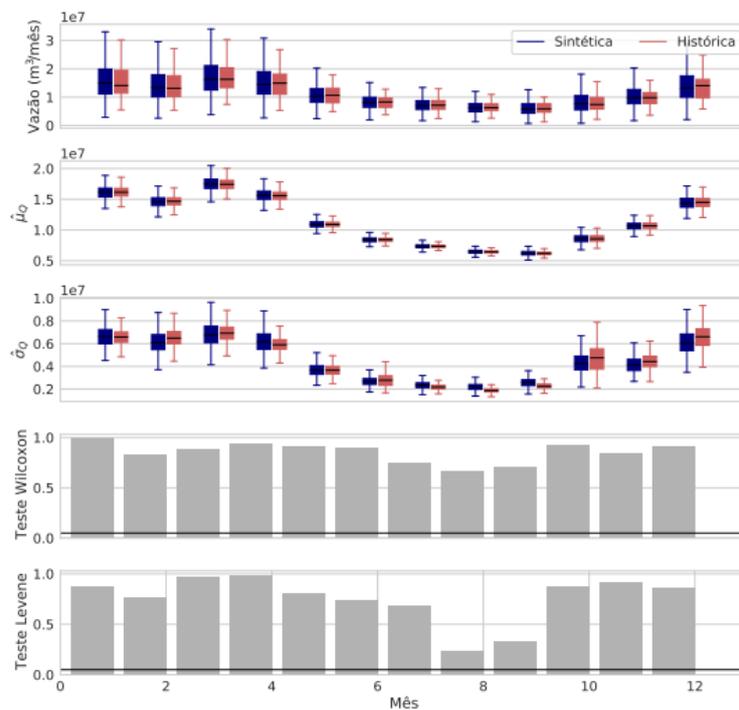


Figura 6.11 – Análises estatísticas das séries sintéticas de vazões do conjunto Bananal/Torto

Os dados hidrológicos de vazão construídos neste estudo também foram comparados com as séries sintéticas de mesma natureza geradas em Giacomazzo (2020), produzidas a partir da aplicação do modelo clássico de decomposição de séries temporais. As diferenças identificadas no perfil das séries geradas em cada uma das pesquisas devem ser consideradas ao analisar os portfólios de gestão selecionados nas fases de otimização e reavaliação pelo *WaterPaths*.

A adequação dos métodos empregados pelos autores é uma análise que não cabe a este trabalho, tendo em vista a aplicação, neste estudo, de métodos de preenchimento de falhas e extensão de dados temporais que robusteceram os próprios dados históricos utilizados, tornando-os distintos daqueles utilizados como base para o trabalho desenvolvido em Giacomazzo (2020). A intenção de tal análise consiste, portanto, em investigar possíveis mudanças nos cenários hidrológicos utilizados como dados de entrada, e o potencial impacto que elas podem ter no desempenho das políticas otimizadas dentro do SAUA do DF.

Dessa forma, a Figura 6.12 apresenta o perfil curvas de permanência das séries sintéticas geradas nas duas pesquisas, que de maneira geral indicam maior dispersão dos valores de vazão das séries deste trabalho, se comparada às séries geradas em Giacomazzo (2020). Um ponto de particular atenção é o nítido viés das séries produzidas nesta pesquisa, que possuem valores inferiores mais extremos para o reservatório Descoberto, o Lago Paranoá e a vazão conjunta Bananal/Torto, sendo mais acentuados para a primeira fonte. Isso indica a geração de cenários mais desafiadores para esses mananciais, no que tange à gestão de estiagens.

As Figuras 6.13 a 6.17 apresentam o perfil estatístico das séries sintéticas de vazão semanal geradas neste estudo (em amarelo) e em Giacomazzo (2020) em verde, por meio de gráficos *box-plot* de distribuição dos dados e de suas médias (μ). Merecem destaque os valores mínimos mais extremos na estação seca associados ao reservatório Descoberto (de forma mais acentuada), ao Lago Paranoá e à captação a fio d'água Bananal-Torto (de forma menos acentuada), quando se analisam as séries sintéticas geradas neste trabalho.

Por outro lado, é possível identificar vazões máximas maiores durante a estação chuvosa para os reservatórios Corumbá e Santa Maria quando são avaliadas as séries sintéticas produzidas no presente estudo.

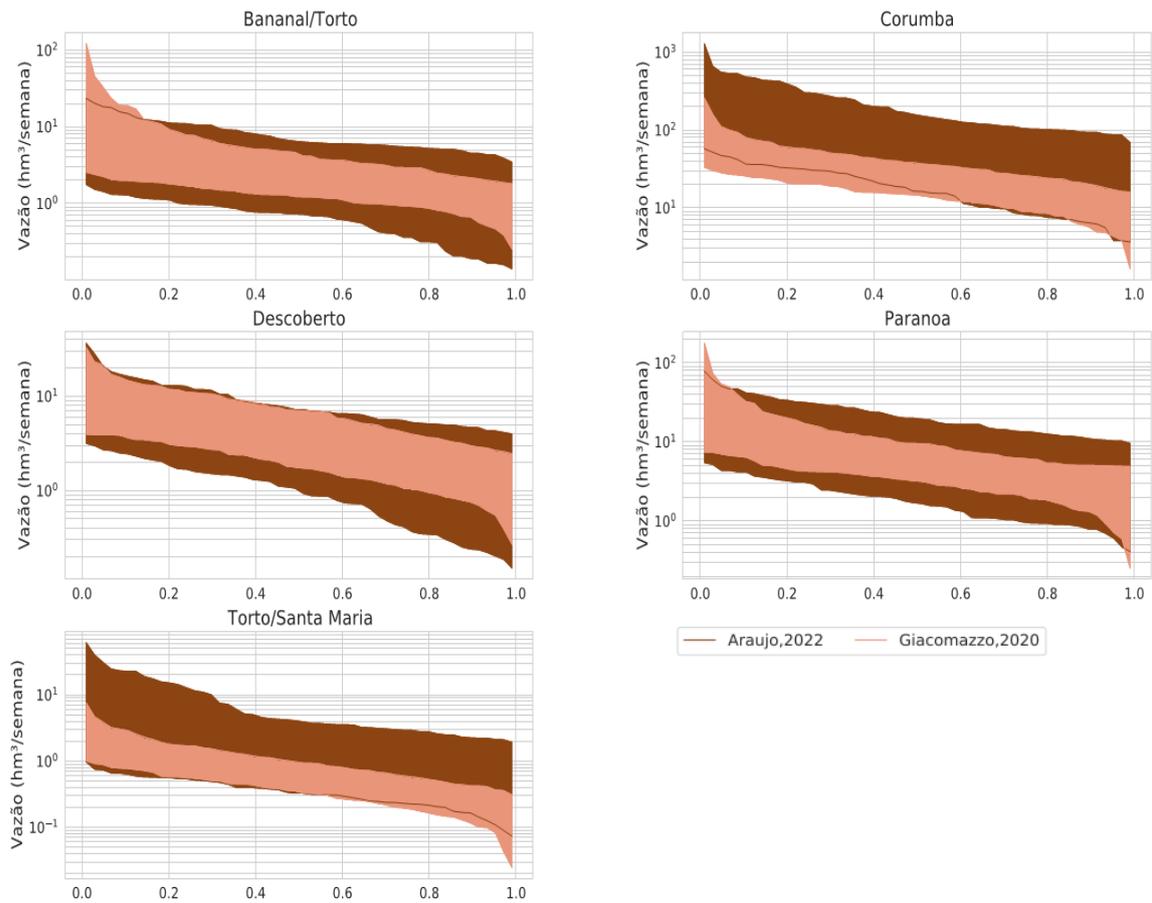


Figura 6.12 – Curvas de probabilidade de excedência comparativas entre as séries sintéticas de vazão de Giacomazzo (2020) e do presente trabalho

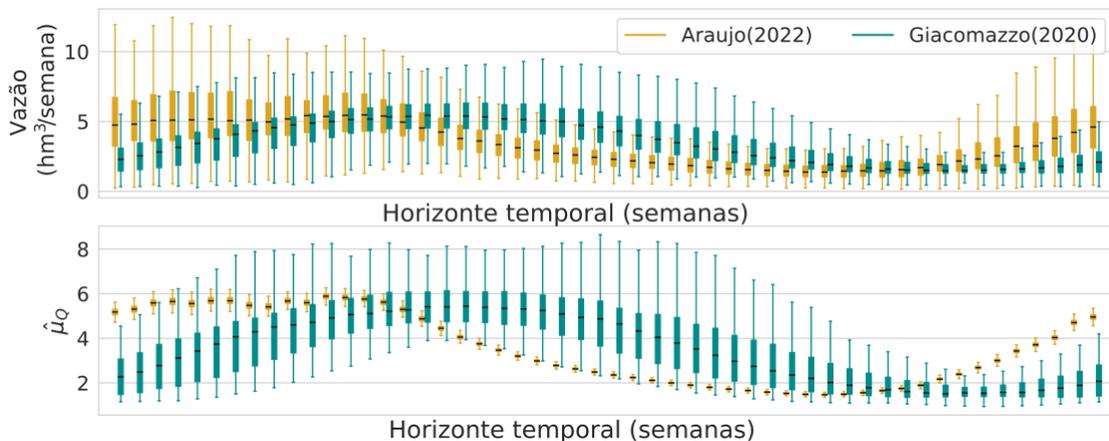


Figura 6.13 – Análises comparativas das séries sintéticas de vazão para o Reservatório Descoberto

Em relação às séries sintéticas de evaporação, conforme indicado no item 5.1.1 deste trabalho, a indisponibilidade de séries históricas com grande horizonte temporal levou à aplicação do próprio método de Kirsch *et al.* (2013) para extensão da série histórica e obtenção de 50 anos de dados para serem utilizados como base na geração de séries sintéticas. A seguir é apresentada uma série sintética amostrada do conjunto de 1.000 séries

geradas para cada um dos reservatórios das AS Descoberto e Santa Maria (Figuras 6.18 a 6.21).

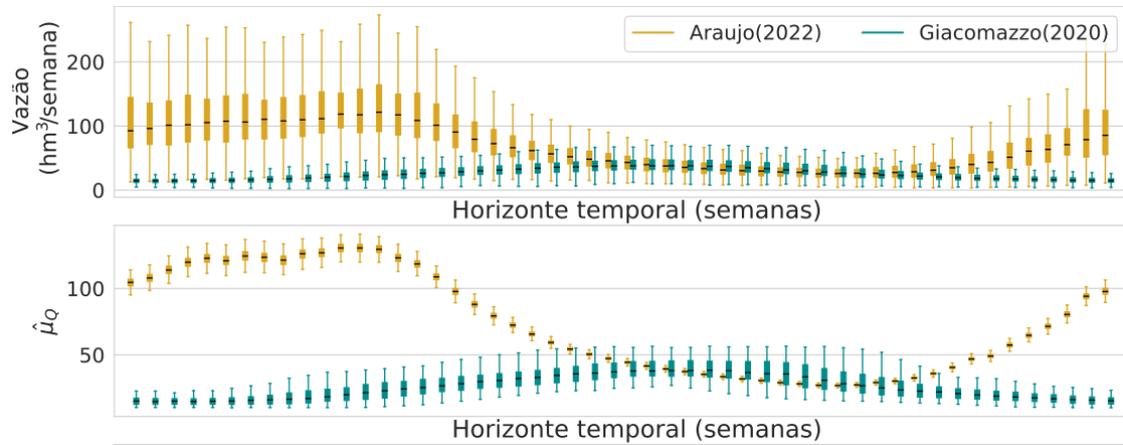


Figura 6.14 – Análises comparativas das séries sintéticas de vazão para o Reservatório Corumbá

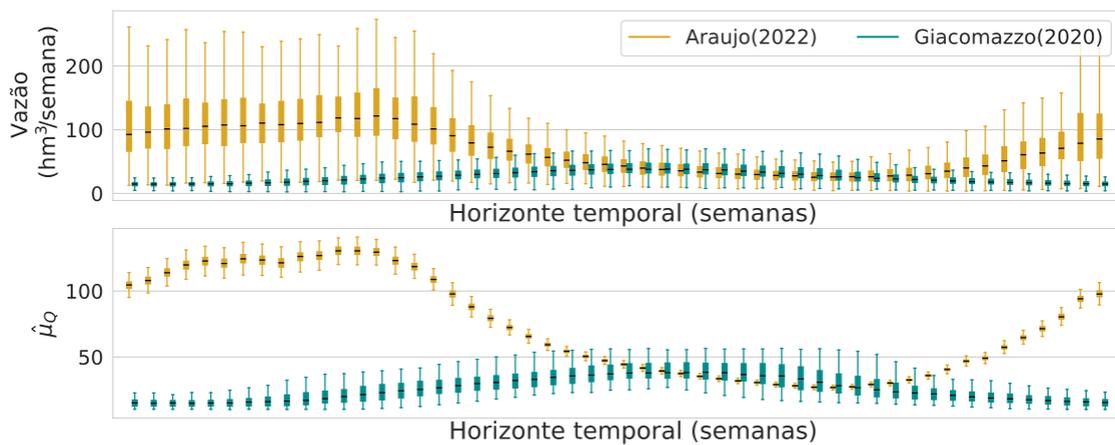


Figura 6.15 – Análises comparativas das séries sintéticas de vazão para o Reservatório Santa Maria

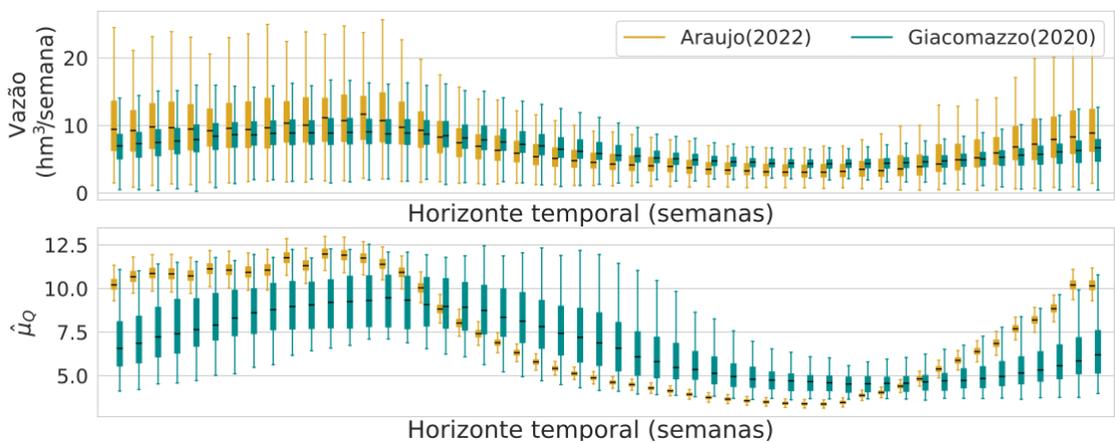


Figura 6.16 – Análises comparativas das séries sintéticas de vazão para o Lago Paranoá

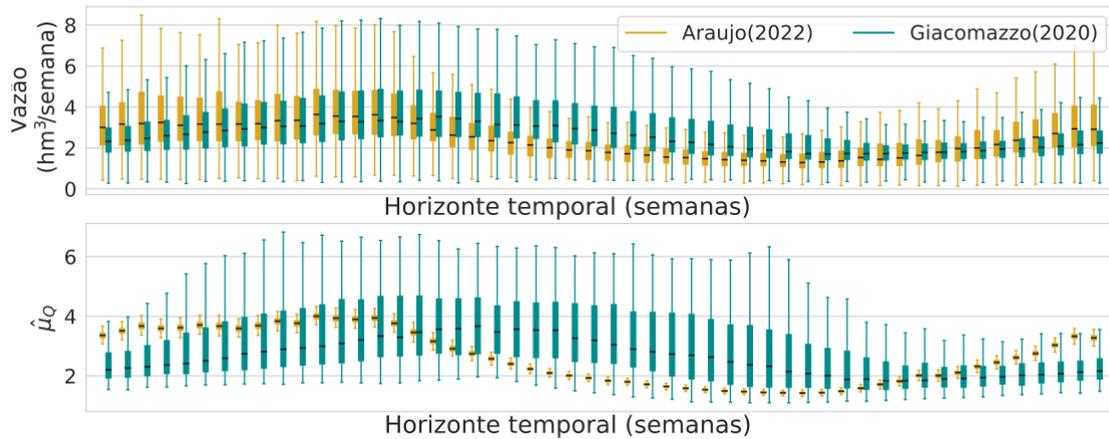


Figura 6.17 – Análises comparativas das séries sintéticas de vazão para o conjunto Bananal/Torto

Ainda que a variabilidade dos dados de evaporação para os quatro reservatórios seja consideravelmente limitada, pondera-se que para os fins deste trabalho as séries sintéticas de evaporação possuem comportamento representativo dessa variável dentro das AS. Sendo assim, considerou-se aceitável a utilização das séries sintéticas produzidas dentro da operação do *WaterPaths* em suas fases de otimização e reavaliação.

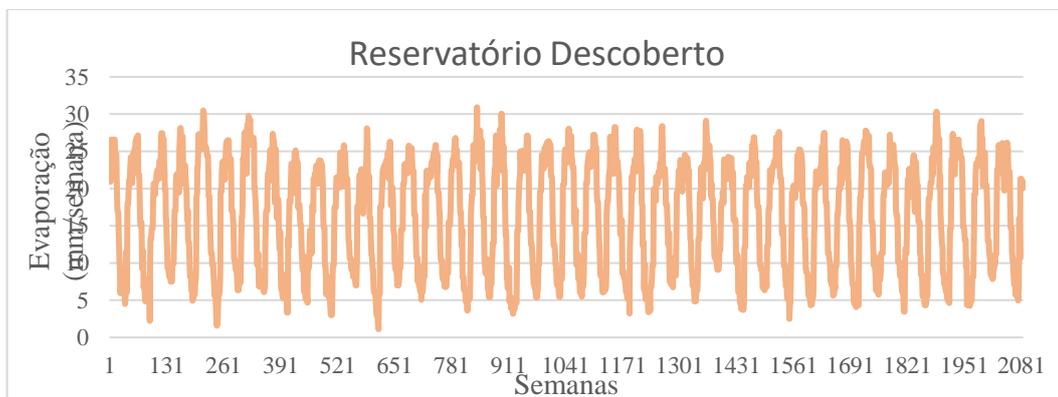


Figura 6.18 – Exemplo de série sintética evaporação para o Reservatório do Descoberto, com duração de 40 anos (2086 semanas)

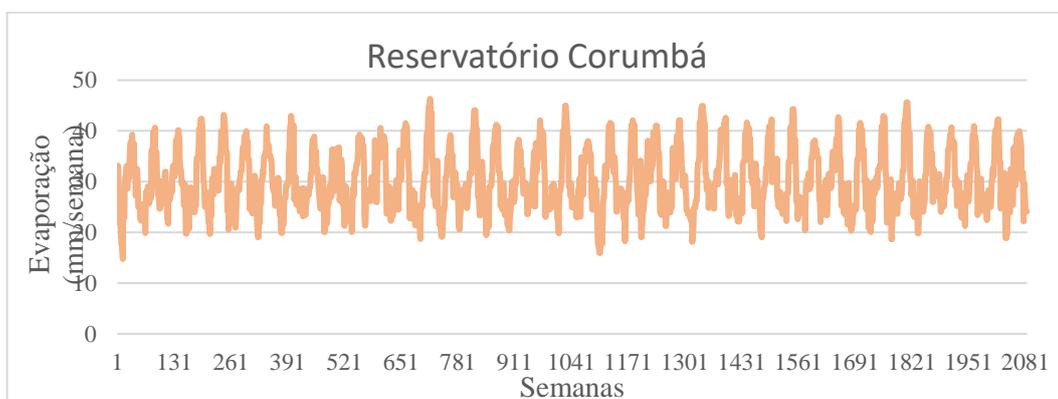


Figura 6.19 – Exemplo de série sintética evaporação para o Reservatório do Corumbá, com duração de 40 anos (2086 semanas)

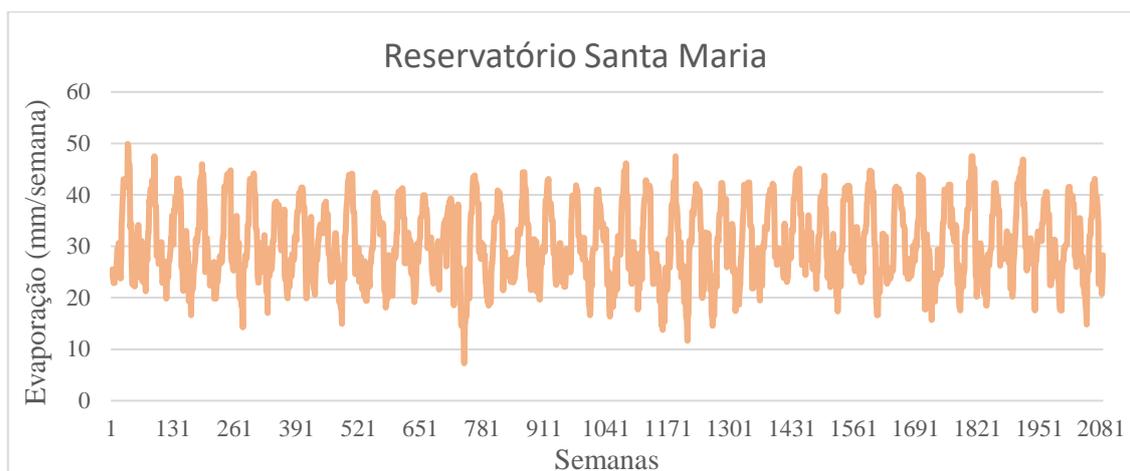


Figura 6.20 – Exemplo de série sintética evaporação para o Reservatório Santa Maria, com duração de 40 anos (2086 semanas)

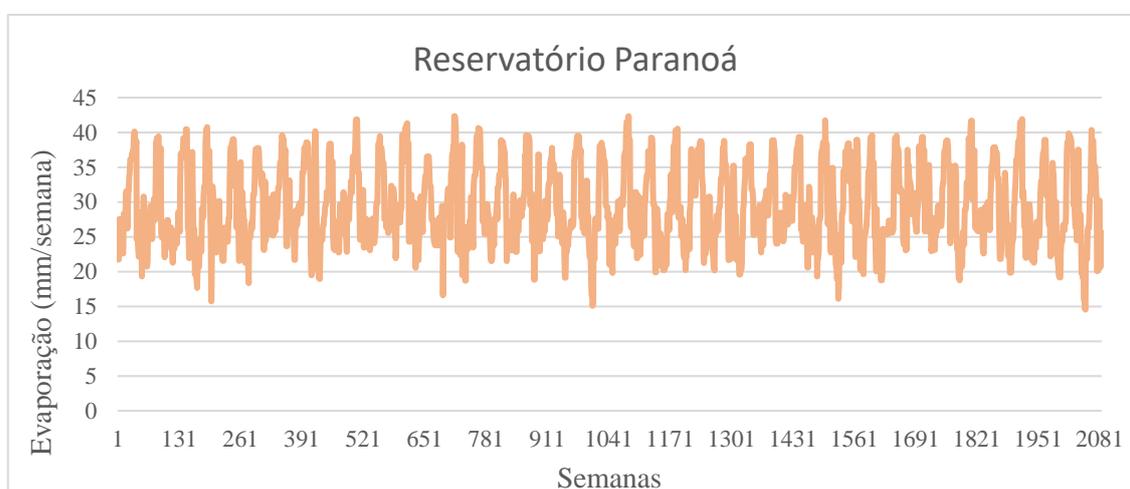


Figura 6.21 – Exemplo de série sintética evaporação para o Lago Paranoá, com duração de 40 anos (2086 semanas)

A validação das séries sintéticas geradas seguiu os mesmos princípios descritos para avaliação das séries de vazão (avaliação das curvas de permanência dos dados históricos e das séries geradas, e análise de seu comportamento estatístico, frente aos dados observados). Dessa maneira, procede-se diretamente à análise das figuras produzidas: a Figura 6.22 apresenta as curvas de permanência para séries sintéticas dos quatro reservatórios, e para todos os casos foi constatado que os dados sintéticos apresentam maior variabilidade que os registros históricos, não possuem vieses e seguem o formato da curva de probabilidade dos dados históricos.

Contudo, cabe a ressalva em relação ao formato “quadriculado” tanto dos dados históricos quanto dos dados sintéticos. Isso provém da decomposição simplificada dos dados históricos

mensais em dados diários, tomando-se como premissa que a taxa de evaporação média diária poderia ser considerada constante dentro de um mesmo mês.

O resultado corresponde a dados diários e semanais acumulados de menor variabilidade se comparados às séries de vazão já apresentadas, contudo não se considera que haja comprometimento da qualidade das séries sintéticas geradas para os fins deste trabalho.

As análises estatísticas por meio de gráficos *boxplot* e dos testes de hipótese Wilcoxon e Levene (Figuras 6.23 a 6.26) para todos os reservatórios também indicam que as taxas de evaporação sintéticas possuem o mesmo comportamento estatístico que os dados históricos, e os momentos de primeira e segunda ordem das séries sintéticas não são estatisticamente distintos dos padrões históricos.

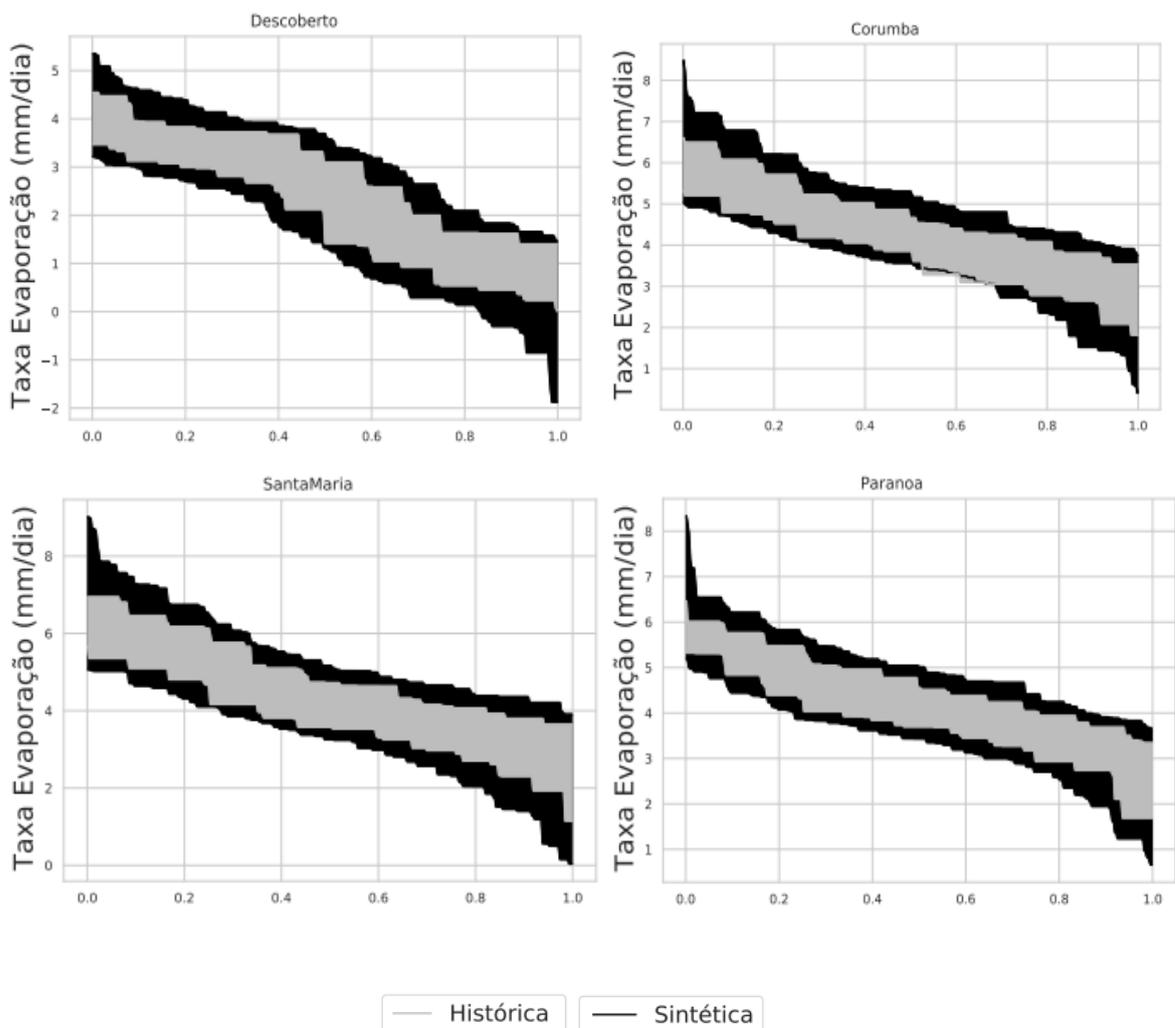


Figura 6.22 – Curvas de probabilidade de excedência os reservatórios Descoberto, Corumbá, Santa Maria e Paranoá

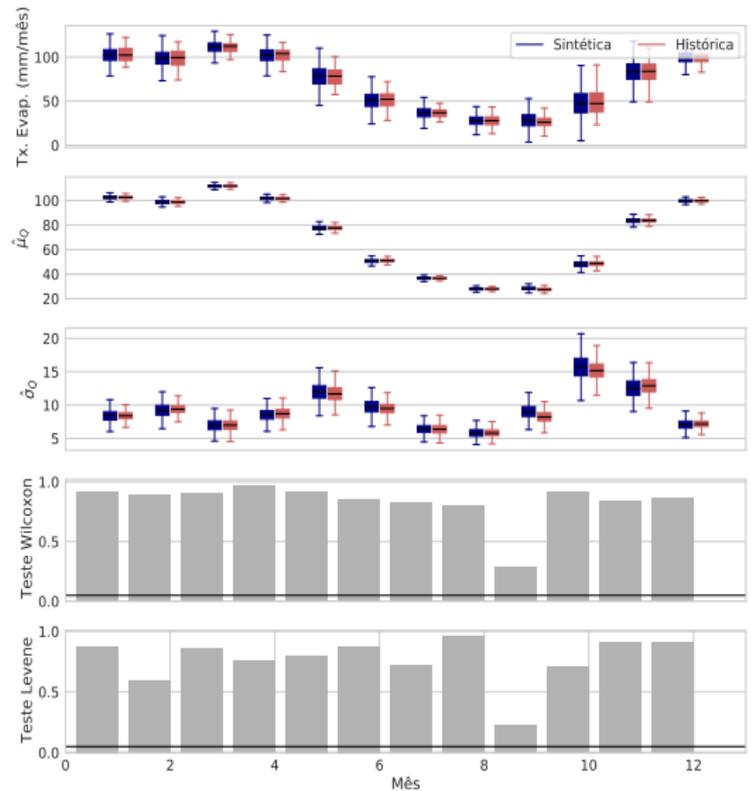


Figura 6.23 – Análises estatísticas das séries sintéticas de evaporação do Reservatório Descoberto

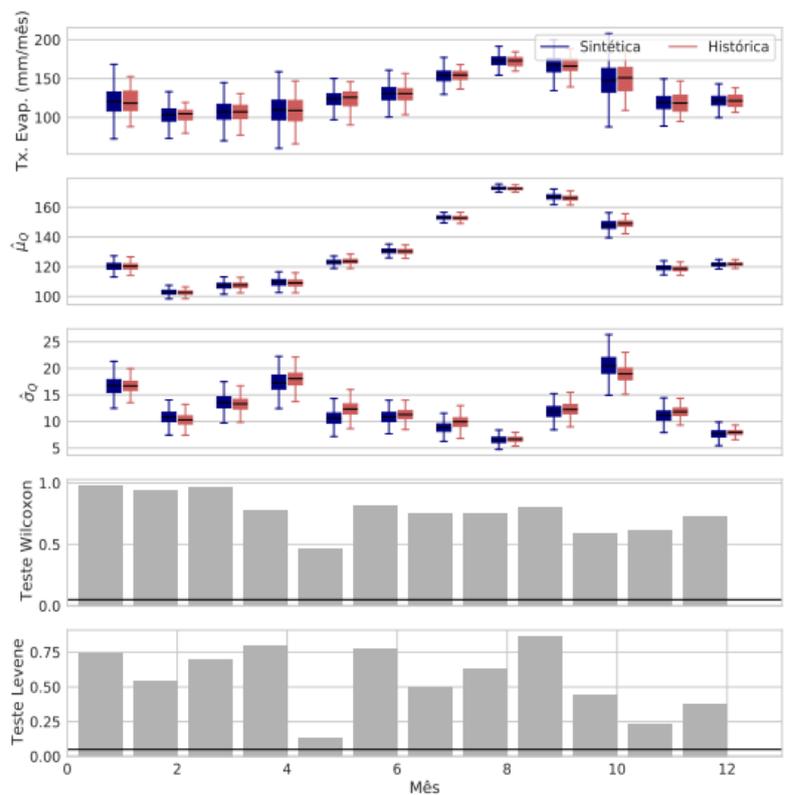


Figura 6.24 – Análises estatísticas das séries sintéticas de evaporação do Reservatório Corumbá IV

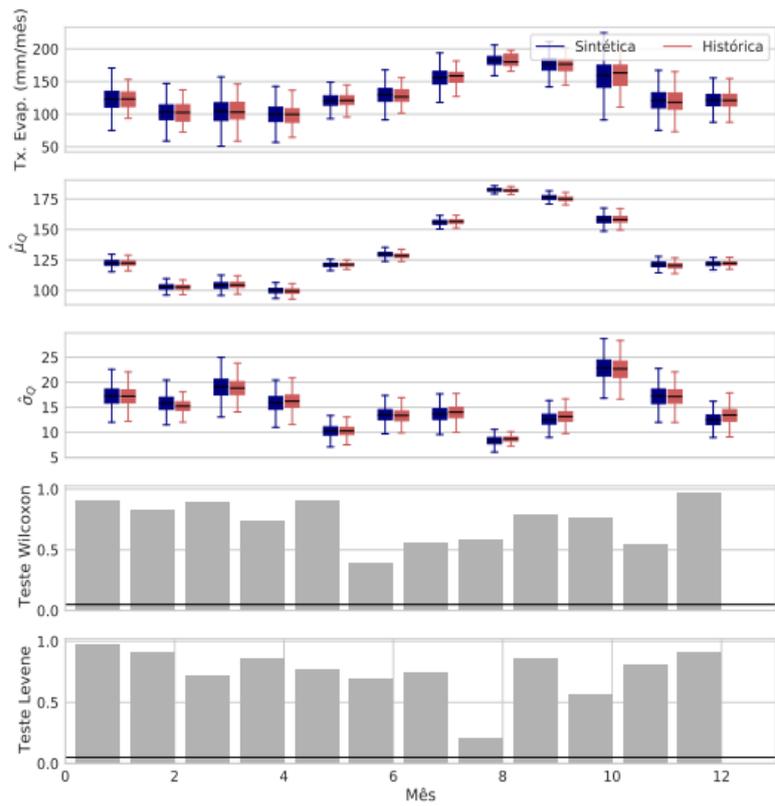


Figura 6.25 – Análises estatísticas das séries sintéticas de evaporação do Reservatório Santa Maria

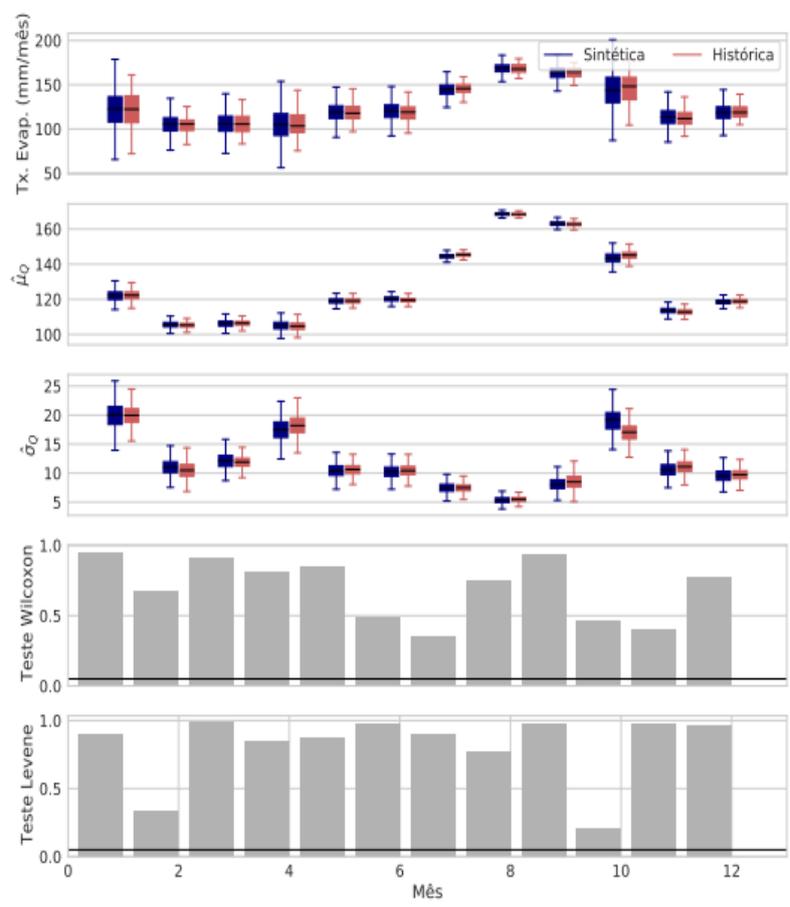


Figura 6.26 – Análises estatísticas das séries sintéticas de evaporação do Lago Paranoá

A avaliação das séries sintéticas de evaporação contemplou também a comparação com as séries de mesma natureza geradas em Giacomazzo (2020), seguindo raciocínio análogo àquele apresentado para os dados de vazão. A Figura 6.27 apresenta a distribuição de probabilidade das bases geradas, por meio do qual percebe-se o predomínio de valores superiores de evaporação nas séries sintéticas deste trabalho, à exceção dos dados associados ao reservatório Descoberto.

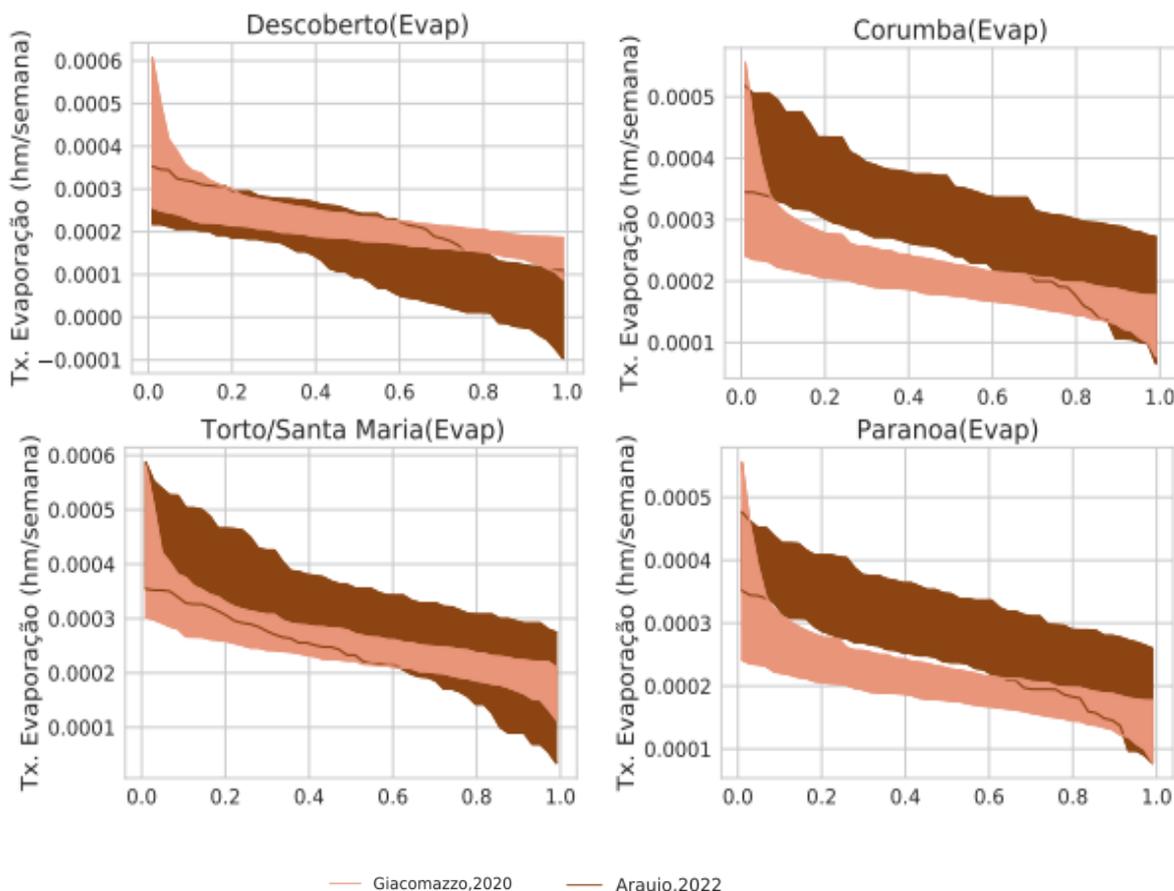


Figura 6.27 – Curvas de probabilidade de excedência comparativas entre as séries sintéticas de vazão de Giacomazzo (2020) e do presente trabalho

As Figuras 6.28 a 6.31 confirmam, através de gráficos *box-plot* de distribuição dos dados brutos e de seus momentos de primeira ordem (média dos dados para cada mês observado), a predominância de maiores taxas de evaporação nas séries sintéticas construídas no âmbito deste trabalho, à exceção daquelas associadas ao reservatório do Descoberto. Dessa forma, os estados de mundo construídos utilizando as séries sintéticas de evaporação produzidas pelo Gerador de Vazões tendem a ser mais desafiadores, na medida em que levam a maiores perdas de volume hídrico nos reservatórios devido às maiores taxas de evaporação.

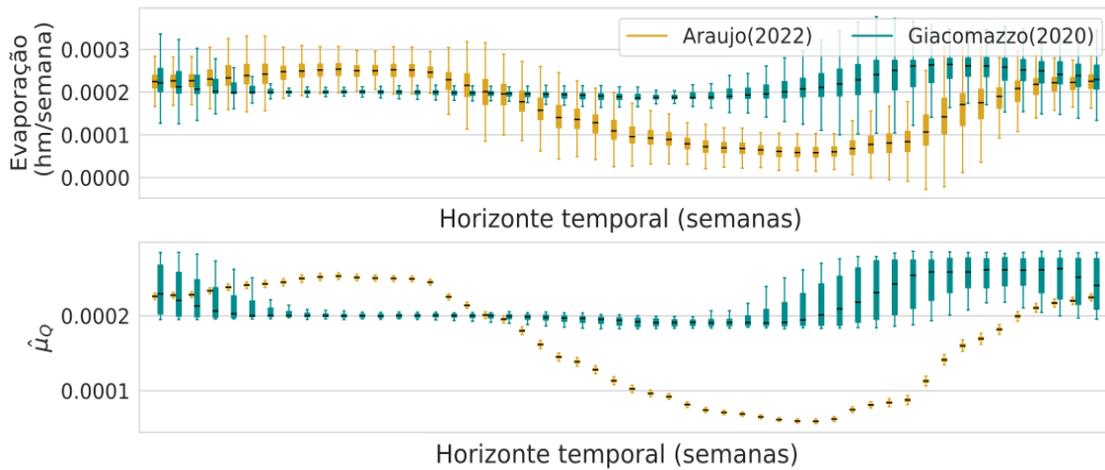


Figura 6.28 – Análises comparativas das séries sintéticas de evaporação para o Reservatório do Descoberto

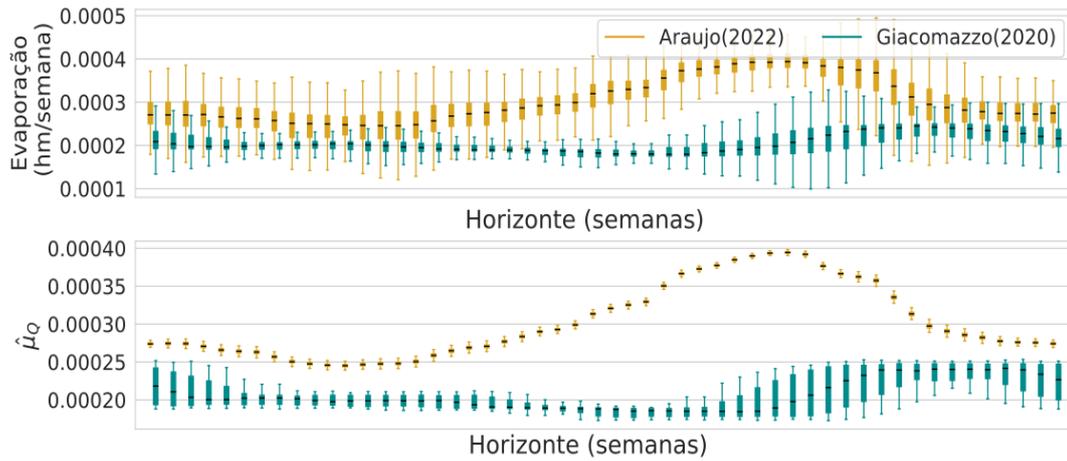


Figura 6.29 – Análises comparativas das séries sintéticas de evaporação para o Reservatório Corumbá

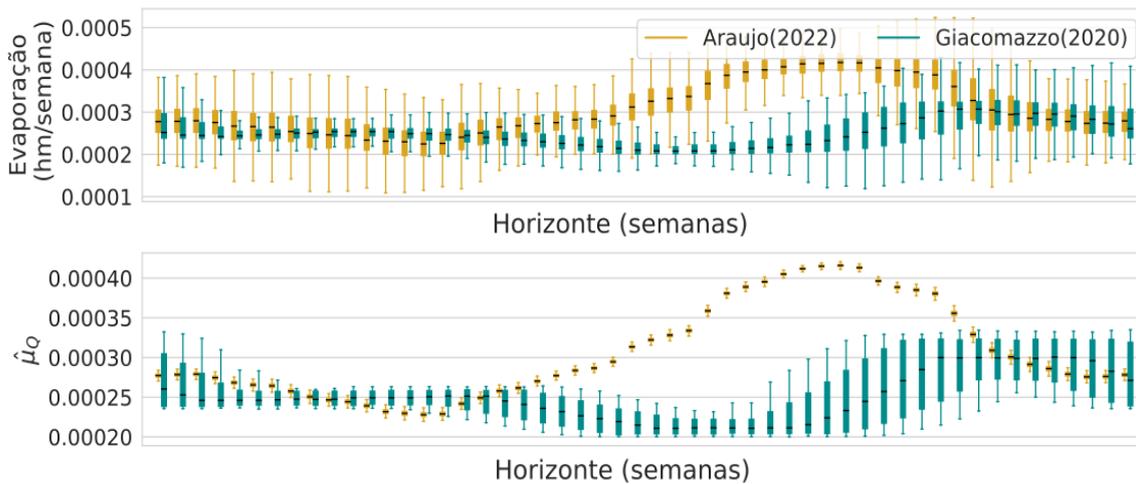


Figura 6.30 – Análises comparativas das séries sintéticas de evaporação para o Reservatório Santa Maria

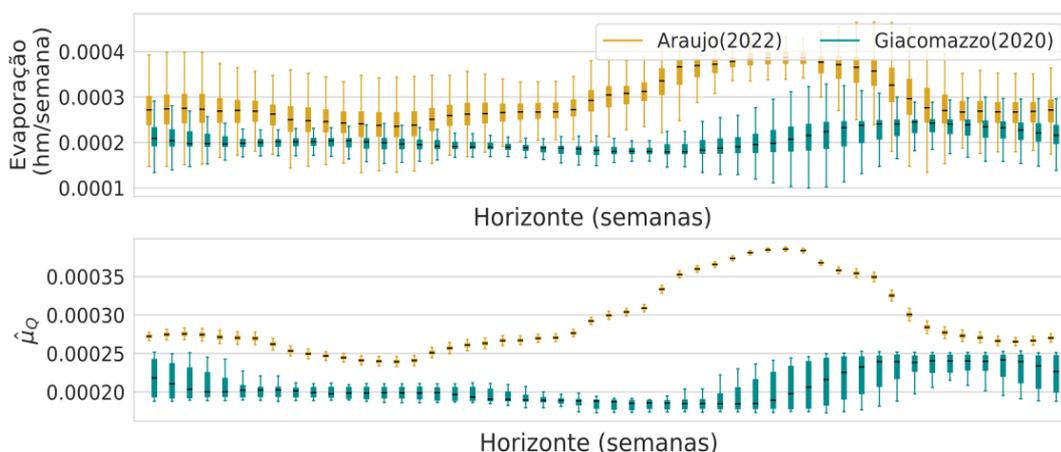


Figura 6.31 – Análises comparativas das séries sintéticas de evaporação para o Lago Paranoá

6.1.2. Séries sintéticas de demanda

Conforme a metodologia descrita no item 5.1.3, a demanda de referência foi obtida, tendo como base projeções de crescimento populacional segregada por Região Administrativa do Distrito Federal. A demanda de referência está apresentada na Tabela 6.1, por AS.

Tabela 6.1 – Projeção de demanda por água entre 2021-2060, por AS

Ano	Demanda Anual de água (hm ³)		Ano	Demanda Anual de água	
	Descoberto	Santa Maria		Descoberto	Santa Maria
2021	130.16	77.34	2041	159.20	94.54
2022	134.29	79.75	2042	160.04	95.04
2023	135.99	80.76	2043	160.84	95.52
2024	137.66	81.75	2044	161.58	95.96
2025	139.28	82.71	2045	162.26	96.36
2026	140.86	83.66	2046	162.90	96.74
2027	142.38	84.55	2047	163.49	97.09
2028	143.88	85.44	2048	164.03	97.41
2029	145.33	86.31	2049	164.52	97.70
2030	146.74	87.14	2050	164.96	97.96
2031	148.10	87.95	2051	165.10	97.99
2032	149.41	88.73	2052	165.68	98.39
2033	150.67	89.48	2053	165.97	98.56
2034	151.90	90.21	2054	166.21	98.70
2035	153.09	90.91	2055	166.40	98.82
2036	154.23	91.59	2056	166.54	98.90
2037	155.33	92.24	2057	166.38	98.75
2038	156.37	92.86	2058	166.66	98.97
2039	157.35	93.45	2059	166.65	98.97
2040	158.30	94.01	2060	166.589	98.93

A partir da demanda de referência, foi possível gerar milhares de séries sintéticas para emprego como dados de entrada do *WaterPaths*, tanto para a fase de Otimização quanto para a fase de Reavaliação. As Figuras 6.32 e 6.33, apresentadas a seguir, representam a sobreposição de dez das mil séries sintéticas de demanda geradas para cada AS na fase de otimização do *WaterPaths*, com extensão temporal de 40 anos (2086 semanas). Mediante a análise das figuras, é possível verificar a demanda superior da AS Descoberto – quase 60% maior que a demanda da AS Santa Maria – o que pode pressioná-lo e torná-lo mais suscetível a situações de estresse hídrico.

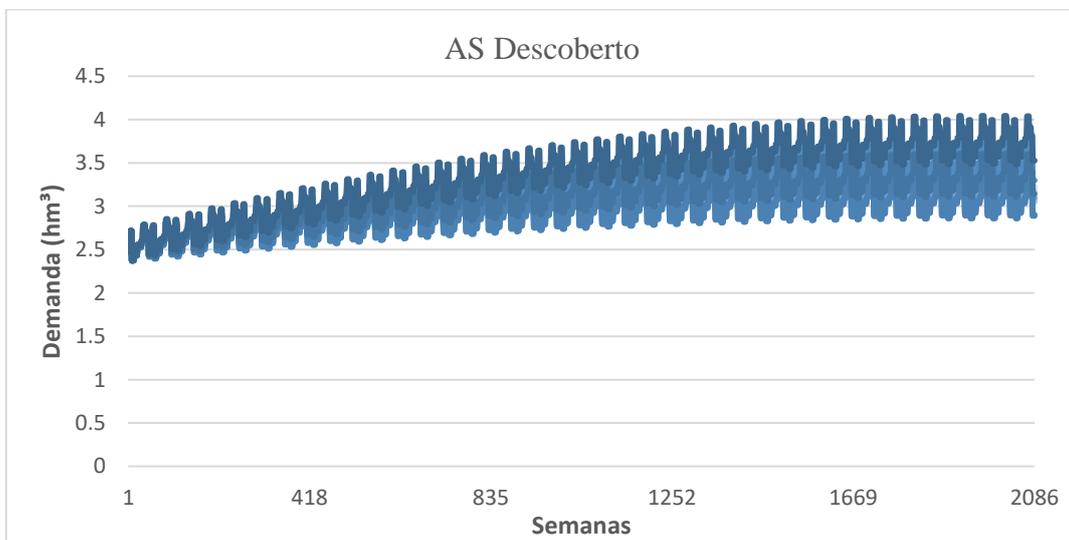


Figura 6.32 – Séries sintéticas de demanda para a AS Descoberto

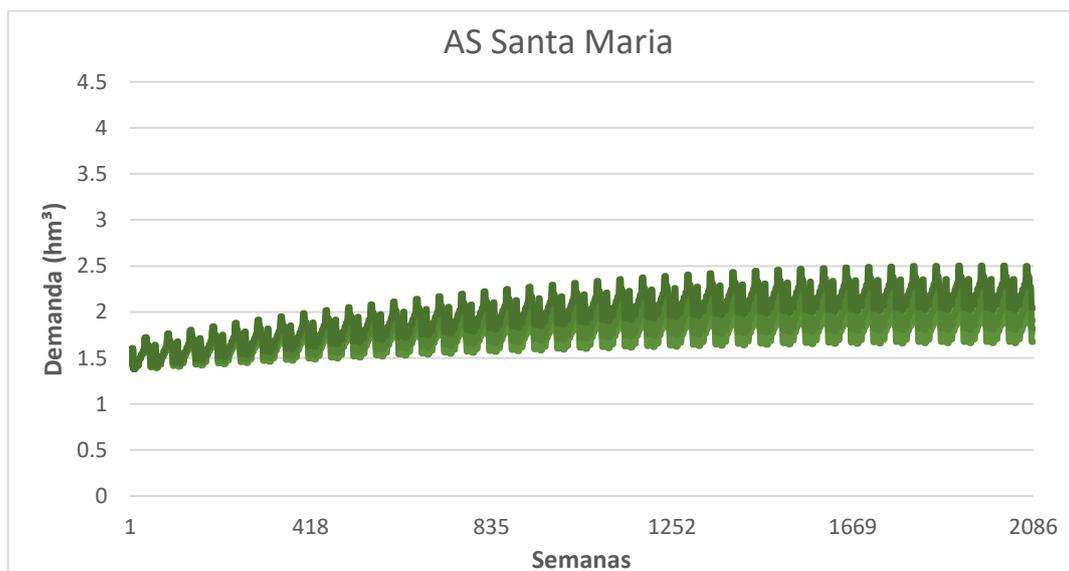


Figura 6.33 – Séries sintéticas de demanda para a AS Santa Maria

6.1.3. Definição de Incertezas Profundas

A definição dos fatores de incertezas profundas – e de seus intervalos de variação – buscou incorporar a visão técnica das instituições responsáveis pela regulação e operação do SAUA do DF – Adasa e Caesb, respectivamente – e tornar a modelagem mais representativa da realidade desse sistema. Para tanto, foram realizadas reuniões com representantes de diferentes áreas técnicas dessas instituições, apresentando inicialmente alguns princípios teóricos relacionados a planejamento adaptativo e incertezas profundas, dado que esses são conceitos consideravelmente recentes na Literatura.

Em seguida, foram expostos alguns detalhes dos exercícios de simulação propostos por esta pesquisa: princípios operacionais de DMDU e *WaterPaths*, as Funções Objetivo que expressam o desempenho de cada plano, e os RdFs que regem a tomada de decisão dentro da modelagem. Os debates se concentraram na proposta dos Fatores de Incerteza Profunda (FIPs) e em seus intervalos de variação, apresentados em forma de tabela visando a facilitar a visualização e discussões acerca de sua representatividade para o SAUA do DF. Cabe indicar que os valores iniciais de FIPs, indicados na Tabela 6.2 e apresentados durante os encontros, foram construídos por Giacomazzo (2020), e a partir deles foram feitos os ajustes sugeridos pelo corpo técnico das instituições consultadas.

Além de terem extrapolado a discussão sobre os FIPs, os debates conduzidos com representantes das instituições mencionadas também enriqueceram as reflexões técnicas acerca da aplicação de princípios DMDU ao SAUA do DF. Cabe indicar que as consultas junto a membros da Adasa e da Caesb levaram à confirmação de que o estudo de documentos apresentando o histórico de variação de condições do sistema, ainda que muito relevante, não é suficiente para definição dos intervalos de variação das FIPs.

Nesse sentido, a *expertise* técnica desses atores permite vislumbrar circunstâncias até então inéditas, mas que podem vir a ocorrer no futuro e influenciar os valores de FIPs.

Dessa maneira, as considerações de membros do corpo técnico dessas instituições embasaram a modificação de alguns fatores, em relação à Tabela 6.2, cujos valores e justificativas de alteração são apresentados a seguir.

Tabela 6.2 – FIPs definidos inicialmente para o SAUA do DF. Fonte: Giacomazzo (2020)

Fatores de Incerteza Profunda (FIPs)	Valor de Referência	Limite Inferior		Limite Superior		Referências para definição	
		FM*	VA**	FM*	VA**		
Índices Financeiros	Taxa de juros (% aa)	7.00	0.70	4.90	1.90	8.90	Demonstração Financeira Caesb (2018)
	Amortização (anos)	20.00	0.90	18.00	1.30	26.00	
	Taxa de desconto (%)	4.00	0.80	3.20	1.80	7.20	
Tarifa de água e esgoto (R\$/m³)	Residencial	4.43		4.52		4.87	Resoluções Adasa
	Comercial	13.08		13.34		14.39	
	Industrial	12.02	1.02	12.26	1.10	13.22	
	Pública	13.08		13.34		14.39	
	Esgoto	4.80		4.89		5.28	
Eficácia dos estágios de restrição de uso da água (%)	1º estágio	2.00		1.60		2.40	Interna (consumo 2016-2018)
	2º estágio	4.00	0.80	3.20	1.20	4.80	
	3º estágio	14.00		11.20		16.80	
Prazo para obtenção da licença (anos)	Corumbá - 1ª etapa	0.00	-	-	-	-	Definição interna
	Corumbá - 2ª etapa	0.00	-	-	-	-	
	Corumbá - 3ª etapa	5.00	0.60	3.00	1.40	7.00	
	Elevação Descoberto	0.00	-	-	-	-	
	Paranoá - 1ª etapa	0.00	-	-	-	-	
	Paranoá - 2ª etapa	0.00	-	-	-	-	
	Paranoá - 3ª etapa	0.00	-	-	-	-	
Custo de construção (em milhões de reais)	Corumbá - 1ª etapa	276.50		276.50		359.45	PDSB (2017)
	Corumbá - 2ª etapa	222.10		222.10		288.73	
	Corumbá - 3ª etapa	251.40		251.40		326.82	
	Elevação Descoberto	7.50	1.00	7.50	1.30	9.75	
	Paranoá - 1ª etapa	60.30		60.30		78.39	
	Paranoá - 2ª etapa	60.30		60.30		78.39	
	Paranoá - 3ª etapa	60.30		60.30		78.39	

*FM: Fator Multiplicativo – consiste no valor numérico efetivamente utilizado como Limite Inferior ou Limite Superior nas simulações do *WaterPaths*

**VA: Valor Absoluto – valor obtido quando se multiplica FM Superior ou Inferior pelo Valor de Referência

-Taxa de juros: adotou-se como base algumas condições de financiamento negociadas entre Caesb e Caixa Econômica Federal para permitir investimentos em infraestrutura – taxas de juros que variam entre 2 e 6% + taxa de Certificado de Depósito Interbancário (CDI). Em relação a esse índice, uma premissa considerada razoável é que sua variação nos próximos anos se aproxime das projeções para a taxa Selic definidas por meio do Relatório Focus do Banco Central: 11,3% para 2022; 7,9% para 2023; 7,2% para 2024 e 7,0% para 2025. Tomando como base o valor médio de tais projeções (8,35%), o FIP Taxa de Juros foi ajustado da seguinte maneira: o Valor de Referência foi redefinido para 12%, o Fator Multiplicativo Inferior foi alterado para 0,84 e o Fator Multiplicativo Superior foi modificado para 1,16;

- Período de amortização: a definição desse FIP levou em consideração tanto valores indicados em Relatórios de Demonstração Financeira da Caesb e apresentados em Giacomazzo (2020) quanto informações das condições de financiamento negociadas entre essa Companhia e a Caixa Econômica Federal, indicando 96 meses de período de amortização. Dessa forma, foi definido o Valor de Referência de 15 anos, com Fator Multiplicativo Superior e Inferior mantido em 0,9 e 1,3, respectivamente;
- Eficácia dos estágios de restrição de uso da água: esse FIP foi dividido em 3 subgrupos distintos – 1º estágio, com adoção de campanhas educativas de conscientização do uso da água; 2º estágio, com adição de tarifas de contingência; e 3º estágio, com implementação adicional de racionamento. Os intervalos de variação e valor de referência foram mantidos conforme indicado em Giacomazzo (2020), à exceção do 3º estágio, cujo Valor de Referência foi ajustado para 8%, visando a reproduzir as recomendações do corpo técnico consultado durante os encontros com a Adasa e a Caesb;
- Tarifa de água e esgoto: esse FIP foi discutido com a área financeira da Adasa e da Caesb, e a principal referência indicada para seu ajuste foi o Índice de Reajuste Tarifário definido na Nota Técnica nº 11/2021 da Adasa, representado na Equação 6.1:

$$IrB = (\%P \times \Delta INPC) + (\%EE \times \Delta Energia) + (\%MT \times \Delta IGP-M) + (\%RI \times \Delta IGP-M) + (\%OC \times \Delta IPCA) \quad (6.1)$$

em que %P corresponde à proporção do custo com pessoal, %EE corresponde ao custo com energia elétrica, %MT corresponde ao custo com produtos químicos para tratamento de água e esgotos, %RI corresponde aos custos com remuneração dos investimentos, e %OC corresponde à proporção de outros custos. INPC, IGP-M e IPCA correspondem aos índices financeiros que expressam os reajustes de preço relacionados à inflação anual – Índice Nacional de Preços ao Consumidor (INPC), Índice Geral de Preços-Mercado (IGP-M) e Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA).

Buscou-se assim estimar os ajustes tarifários com base nas variações de tais índices (IPCA, IGP-M e INPC) ao longo dos anos, o que consiste em processo com alta imprevisibilidade intrínseca, dada a sua associação a variáveis voláteis, como contexto político nacional, o que leva à ausência de projeções de longo prazo desses fatores. Dessa forma, considerou-se como referência plausível analisar a variação do IPCA, IGP-M e do INPC em um intervalo de 10 anos.

O período analisado possui duas partes: uma composta por dados históricos (2016 a 2020) e outra parte formada por projeções de órgãos oficiais – Banco Central do Brasil (Relatório Focus de dezembro/2021) e Secretaria de Política Econômica do Ministério da Economia. Esses dados são apresentados na Tabela 6.3, sendo possível extrair a partir deles os valores médio, máximo e mínimo para cada um dos índices.

Tabela 6.3 – Índices econômicos utilizados para definição dos FIPs relacionados às variações de tarifa de água. Fonte: Banco Central e Ministério da Economia

Índice (%)*	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	Média	Máx.	Mín.
IGPM	0,072	-0,005	0,075	0,073	0,231	0,175	0,053	0,040	0,040	0,040	0,079	0,231	-0,005
IPCA	0,107	0,063	0,030	0,043	0,045	0,100	0,050	0,033	0,031	0,031	0,053	0,107	0,030
INPC	0,113	0,066	0,038	0,034	0,045	0,055	0,100	0,043	0,033	0,030	0,056	0,113	0,030

*Valores de todos os índices referentes ao histórico 2016-2021: *In*: IBGE, 2021. Valores dos índices IPCA E INPC projetados para o período 2022-2025: Relatório Focus (*In*: Banco Central). Valores do Índice IGP-M projetados para o período 2022-2025: Secretaria de Política Econômica do Ministério da Economia.

De acordo com a Nota Técnica nº 11/2021 da Adasa, as contribuições de cada um dos componentes de despesa no custo total da Operação dos sistemas de água e esgoto no ano de 2019 (dado mais recente disponível) foram:

- 36,17% de custos com pessoal (%P);
- 9,54% com energia elétrica (%EE);
- 5,13% com material (%MT);
- 29,43% com remuneração de investimentos (%RI);
- 19,74% com outros custos (%OC).

Considerando esses valores e as variações dos índices financeiros indicados na Tabela 6.3, a aplicação da Equação 6.1 permite obter uma estimativa de variação da tarifa de água e esgoto em um horizonte de 10 anos, apresentada na Tabela 6.4, juntamente com os Valores de Referência e Fatores Multiplicativos Inferior e Superior. Considera-se que essa variação é razoável tanto para dez anos quanto para horizontes da mesma ordem de grandeza (décadas).

A Tabela 6.4 apresenta, além do FIP supracitado, a consolidação de todas as incertezas profundas utilizadas na modelagem do SAUA do DF, ajustados a partir dos valores propostos por Giacomazzo, 2020 (apresentados na Tabela 6.2).

Tabela 6.4 – FIPs ajustados a partir dos entendimentos técnicos com Adasa e Caesb

Fatores de Incerteza Profunda (FIPs)		Valor de Referência	Limite Inferior	Limite Superior
Índices Financeiros	Taxa de juros (% aa)	12,00	10,08	13,92
	Amortização (anos)	15,00	13,50	19,50
	Taxa de desconto (%)	4,00	3,20	7,20
Tarifa de água e esgoto (R\$/m ³)	Residencial	4,43	4,52	5,14
	Comercial	13,08	13,34	15,17
	Industrial	12,02	12,26	13,94
	Pública	13,08	13,34	15,17
	Esgoto	4,80	4,89	5,57
Eficácia dos estágios de restrição de uso da água (%)	1º estágio	2,00	1,60	2,40
	2º estágio	4,00	3,20	4,80
	3º estágio	10,00	8,00	12,00
Prazo obtenção licença (anos)	Corumbá - 1ª etapa	0,00	-	-
	Corumbá - 2ª etapa	0,00	-	-
	Corumbá - 3ª etapa	5,00	3,00	7,00
	Elevação Descoberto	0,00	-	-
	Paranoá - 1ª etapa	0,00	-	-
	Paranoá - 2ª etapa	0,00	-	-
	Paranoá - 3ª etapa	0,00	-	-
Custo de construção (em milhões de reais)	Corumbá - 1ª etapa	276,50	276,50	359,45
	Corumbá - 2ª etapa	222,10	222,10	288,73
	Corumbá - 3ª etapa	251,40	251,40	326,82
	Elevação Descoberto	7,50	7,50	9,75
	Paranoá - 1ª etapa	60,30	60,30	78,39
	Paranoá - 2ª etapa	60,30	60,30	78,39
	Paranoá - 3ª etapa	60,30	60,30	78,39

**VA: Valor Absoluto – valor obtido quando se multiplica FM Superior ou Inferior pelo Valor de Referência

6.2. FRETE DE PARETO RESULTANTE DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

A Figura 6.34 apresenta o resultado do processo de otimização multiobjetiva, que incorporou os fatores de incertezas profundas e selecionou 91 políticas não dominadas, conforme descrito no item 5.2. Nessa figura, cada linha representa uma política otimizada da Frente de Pareto, que possui performance superior a todas as outras em ao menos uma Função Objetivo. Cada eixo vertical paralelo representa uma Função Objetivo, e os pontos em que cada linha intercepta tais eixos corresponde à performance da solução na Função Objetivo correspondente. Tendo em vista que o processo de otimização busca encontrar políticas que minimizem a função F (conforme indicado nas Equações 5.6 e 5.7), a política ideal obteria uma performance correspondente a uma linha horizontal na parte inferior do gráfico. A

performance de cada política da frente de Pareto foi segregada por AS (Descoberto e Santa Maria).

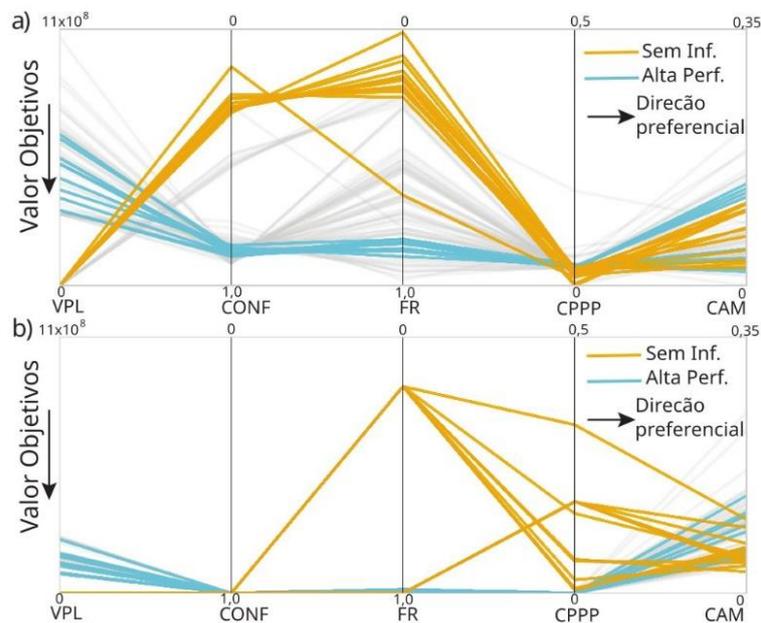


Figura 6.34 – Resultado da otimização multiobjetiva considerando incertezas profundas para as AS Descoberto (a) e Santa Maria (b)

O primeiro aspecto a ser destacado na Figura 6.34 se refere à discrepância de performance das políticas nas duas AS, com a AS Santa Maria evidenciando desempenho muito superior e riscos reduzidos de falha (desabastecimento, representado pela FO confiabilidade). A AS Descoberto, por sua vez, apresenta performance limitada, com poucas políticas obtendo valores de FO aceitáveis, principalmente no que tange à confiabilidade (CONF) e frequência de restrições (FR, que representa a necessidade de implementação de racionamento, tarifas de contingência e campanhas de conscientização de uso da água). Essa situação leva à reflexão de que uma política avaliada sob uma perspectiva multiobjetiva, ainda que selecionada como uma solução não dominada integrante da frente de Pareto, não necessariamente apresenta valores aceitáveis em todas as FO consideradas.

Outra análise importante consiste no papel que investimentos em infraestrutura (FO VPL) possuem na sustentabilidade do abastecimento de água dentro das AS: nas políticas destacadas em laranja, não há investimentos em infraestrutura, o que leva ao maior emprego de medidas de restrição de uso (FR) e também elevação dos custos associados à operação do sistema, incluindo gestão de cenários críticos de seca (CAM). Ainda com a utilização de tais recursos, a AS Descoberto é capaz de atingir um valor máximo de apenas 56% de

confiabilidade, e a AS Santa Maria experiencia altos custos com a manutenção da operação do SAUA (CAM mais elevado). Esse panorama, que se mostra mais intenso para a AS Descoberto, demonstra que os investimentos em infraestrutura são mandatórios para que a AS mantenha desempenho e segurança hídrica em níveis minimamente aceitáveis.

Na Figura 6.34 também é possível selecionar um conjunto de políticas (destacadas em azul) cujas relações de compromisso se mostrem mais vantajosas à sustentabilidade do abastecimento de água nas AS (superior a 85% de confiabilidade e inferior a 20% de Frequência de Restrição). A observação do perfil de desempenho desse conjunto permite confirmar a importância do investimento em infraestrutura para melhoria no desempenho em outras FOs, exigindo um investimento mínimo de R\$320 milhões para a AS Descoberto e de R\$83 milhões para a AS Santa Maria.

Além disso, o perfil de desempenho desse subconjunto de políticas evidencia ainda mais a diferença no desempenho e na capacidade de adaptação entre a AS Santa Maria e a AS Descoberto: na primeira, a confiabilidade se mantém próxima a 100% em todas as políticas desse subconjunto, com baixa adoção de medidas de restrição de consumo de água e investimentos modestos em gestão de secas (advindos de custos com transferências de água e racionamento). Por outro lado, na AS Descoberto o melhor desempenho em confiabilidade é de 92%, enquanto a frequência de restrição mínima é de 11%. Esse cenário sugere que as inequidades de perfil demográfico, socioeconômico e de consumo de água – que remontam às raízes do processo de ocupação histórica do Distrito Federal – podem afetar de maneira diferente a capacidade de adaptação e a segurança hídrica das AS. Cabe pontuar que tal perfil de desempenho se mostra consideravelmente inferior aos resultados apresentados em outras aplicações de *DU Pathways*, com destaque para Gold *et al.*, 2023 (diversos portfólios com Confiabilidade superior a 98% para a Carolina do Norte, Estados Unidos) e Giacomazzo, 2020 (com alguns portfólios obtendo Confiabilidade superior a 99% para o Distrito Federal, Brasil).

O processo de análise da otimização multiobjetiva prosseguiu com a construção da Figura 6.35, que analisa as relações de compromisso das políticas da frente aproximada de Pareto focada na AS Descoberto e em três FOs consideradas mais estratégicas: confiabilidade, frequência de restrição e valor presente líquido. Ao observar as relações de compromisso das soluções, reforça-se a relevância do investimento em infraestrutura, que desloca a

superfície das relações de compromisso, aumentando a confiabilidade na operação (superior a 80% para ambas as AS) e reduzindo a adoção de medidas de restrição de uso de água.

Contudo, essa não é uma relação linear e intuitiva, ou seja, investimento máximo em infraestrutura não necessariamente implica em um desempenho máximo nas outras FOs. Tal fato demonstra que, em contextos complexos com incertezas profundas, nos quais se busca atender a diversos objetivos e partes interessadas, a otimização das relações de troca pode envolver escolhas não lineares.

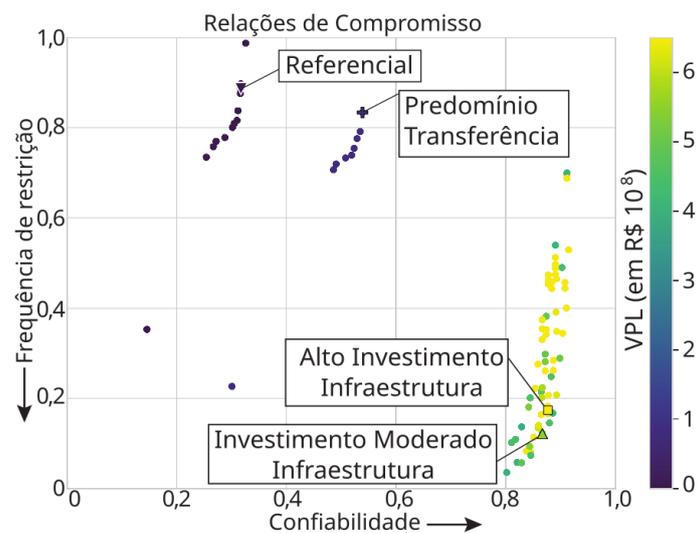


Figura 6.35 – Relações de compromisso para a AS Descoberto considerando FOs mais estratégicas

Em relação às políticas em que não há investimento em infraestrutura (tons de roxo/azul), observam-se dois conjuntos de políticas com valores similares de frequência (alta) de adoção de medidas de restrição de consumo de água. O aspecto que diferencia esses dois conjuntos é o uso de transferências de água entre as AS, mais frequente no conjunto com maiores valores de confiabilidade, sugerindo que transferências de água entre as AS podem auxiliar na gestão de riscos associados ao abastecimento de água no longo prazo. A partir da Figura 6.35, foi possível selecionar quatro políticas para análises posteriores:

- Uma política ‘Referencial’, que não investe em infraestrutura ou transferências de água entre AS, se apoiando somente em medidas de restrição de uso da água para gerir situações de seca. Essa política possui baixo desempenho em confiabilidade e frequência de restrição de uso;
- Uma política ‘Predomínio de Transferência’, que faz uso intenso de restrições de consumo e de transferências de água. Essa política não investe em infraestrutura na AS Descoberto,

mas realiza um investimento modesto no aumento da capacidade de tratamento (e consequentemente de transferência) de água da AS Santa Maria, resultando em uma melhora na confiabilidade de ambas as AS. Isso sugere uma forte relação de interdependência entre as duas áreas de serviço;

- Uma política ‘Investimento Moderado em Infraestrutura’, que apresenta melhora substancial no desempenho em termos de confiabilidade e frequência de restrição de uso, mas que exige investimento substancial em infraestrutura (média de R\$545.000.000,00 entre os 1.000 cenários testados);
- Uma política de ‘Alto Investimento em Infraestrutura’, em que há investimentos mais agressivos em infraestrutura (média de R\$624.000.000,00) e uma melhora na confiabilidade da AS Descoberto, mas que ainda implica em aumento na frequência da adoção de medidas de restrição do consumo.

A Figura 6.36 apresenta as variáveis de decisão das quatro políticas elencadas, por AS. Com base na Equação 5.5, cada política (portifólio, ou solução) representa um sistema adaptativo de regras e tolerância a riscos, que aciona medidas de gestão de secas (transferência de água entre AS, racionamento, tarifas de contingência e campanhas educativas) ou construção de infraestrutura em resposta ao monitoramento dos cenários (estados de mundo) testados em cada simulação.

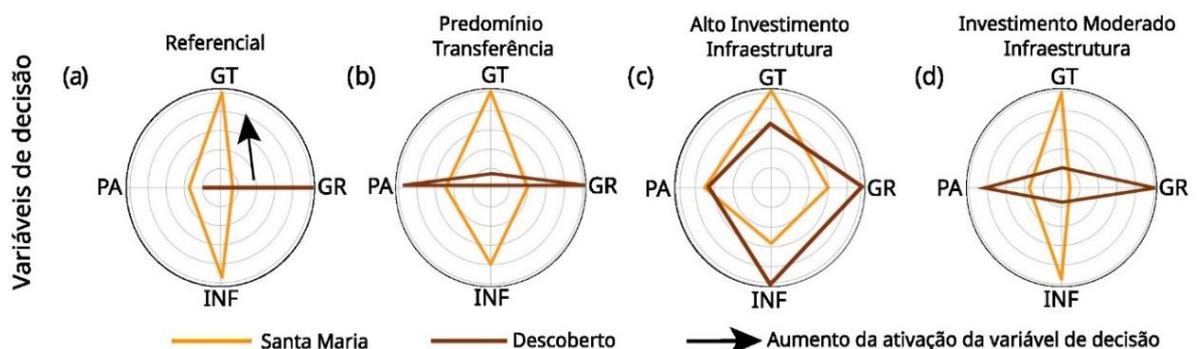


Figura 6.36 – Variáveis de decisão para cada AS em quatro políticas-chave

Cada eixo do círculo representa uma grandeza associada a uma variável de decisão (Equação 5.5) – transferências de água (GT), pagamento anual dos custos com a operação do sistema (PA), acionamento de medidas de restrição de consumo (GR) e acionamento de construção de infraestruturas (INF). Para cada eixo, quanto mais afastada do centro estiver a linha, maior a aversão a risco relacionado àquela variável de decisão e mais frequente será o acionamento

da medida de gestão associada. Nesse ponto, o monitoramento dos estados de mundo e dos riscos associados ao sistema se mostra fundamental na testagem de cada política.

Assim, na política ‘Referencial’, as secas na AS Descoberto são geridas somente com o uso de medidas de restrição de consumo (GR), enquanto a AS Santa Maria prioriza transferências de água. A aversão a risco associada a infraestruturas também é alta para essa AS, ainda que sua construção não tenha sido acionada, conforme será demonstrado a seguir. A política ‘Predomínio de Transferência’ apresenta alto acionamento de medidas de restrição de consumo para a AS Descoberto, enquanto para a AS Santa Maria o destaque é o acionamento frequente de transferências de água, além do potencial de construção de infraestruturas para garantir capacidade de tratamento suficiente para transferências de água.

Esse panorama reforça a hipótese de interdependência entre as AS, e a importância que essa última medida possui na gestão de riscos de curto prazo. Nas políticas com investimento alto e moderado em infraestrutura, ambas AS ainda exigem transferências de água e restrições de consumo para mitigar riscos a curto prazo, e investem mais intensamente em infraestrutura para gerenciar riscos de longo prazo.

Avançando a análise das políticas otimizadas e complementando a Figura 6.36, foram exploradas as opções de infraestrutura adotadas pelas quatro soluções selecionadas, ao longo do horizonte de planejamento (40 anos). A Figura 6.37 indica o perfil probabilístico da construção de infraestrutura pelas políticas selecionadas, quando essas são submetidas aos 1.000 estados de mundo. Quanto mais escuro o plano de fundo da área do gráfico, maior a frequência de acionamento de uma certa infraestrutura em um ano específico daquela execução (submissão de certa política a um estado de mundo).

Na figura, todas as execuções foram consideradas para agrupar estados de mundo em que cada política analisada aciona infraestruturas com alta frequência (linha marrom), média frequência (linha amarelo escura) ou baixa frequência (linha amarelo clara). Na política ‘Referencial’, não houve acionamento de nenhuma infraestrutura durante o horizonte de planejamento. Na política ‘Predomínio de Transferência’, apenas na AS Santa Maria houve investimentos em infraestrutura, todas associadas à ampliação da capacidade de tratamento de água na AS, corroborando as discussões já apresentadas no âmbito da Figura 6.36. Nesse sentido, é importante ressaltar que a vulnerabilidade hídrica no início do horizonte de

planejamento levou à construção das três opções de infraestrutura já no quinto ano, para todos os estados de mundo testados.

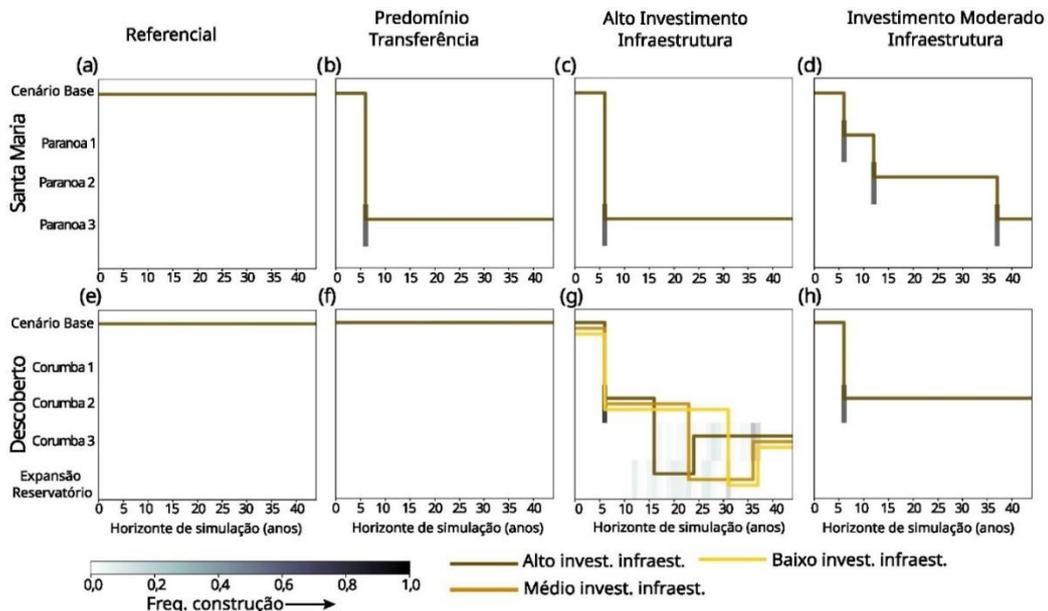


Figura 6.37 – Infraestrutura adotada ao longo do horizonte de planejamento

No caso das políticas com maior investimento em infraestrutura, na AS Santa Maria as expansões (Paranoá 1, 2 e 3) também são construídas em todos os cenários em ambas as políticas, variando somente o momento em que cada uma delas é acionada. No caso da política com alto investimento, as três expansões disponíveis são acionadas no quinto ano do horizonte de planejamento, enquanto a política de investimento moderado faz uso de outras medidas de gestão, para adiar a necessidade de implementação de novas infraestruturas.

Essa dinâmica sugere que a adoção de medidas de gestão de mitigação de secas, quando cuidadosamente avaliadas, consistem em instrumentos valiosos para adiar a necessidade de novos gastos com a expansão estrutural do sistema de abastecimento, sem sacrificar a segurança hídrica. Lógica semelhante ocorre para a AS Descoberto: enquanto na política de investimento moderado, a utilização de outros instrumentos de gestão de risco leva à implantação de somente duas opções de infraestrutura (Corumbá 1 e 2), na política de alto investimento em infraestrutura todas as opções de expansão são acionadas, variando somente o momento de construção devido a estados de mundo mais ou menos desafiadores.

A análise da Figura 6.37 traz ainda alguns pontos de destaque: sempre que há investimento em infraestrutura, independente da AS ou do tipo de política tratada, as expansões Corumbá 1 e 2 (AS Descoberto) e Paranoá 1 (AS Santa Maria) são invariavelmente instaladas no início do horizonte de planejamento. As infraestruturas Paranoá 2 e 3 também são instaladas em todas as situações analisadas, variando somente o momento de sua construção. Isso indica um período de alta vulnerabilidade já no início do horizonte de planejamento, bem como ressalta a importância estratégica dessas infraestruturas para manutenção da segurança hídrica do SAUA. Dessa forma, os dados apresentados sugerem a necessidade de atenção especial dos gestores para o início do período de operação, principalmente em relação a exigências legais e processos de licenciamento relacionados à liberação da construção dessas infraestruturas.

A análise das políticas selecionadas na frente aproximada de Pareto, obtida a partir do processo de otimização multiobjetiva, foi finalizada com a avaliação temporal do desempenho das soluções ao longo do horizonte de planejamento para a AS Descoberto, apresentada na Figura 6.38. Para tanto, cada política foi submetida a 1.000 cenários hidrológicos (séries de vazão e evaporação) distintos, mas sem a influência de fatores de incertezas profundas. Com isso, buscou-se observar que efeito as variabilidades hidroclimáticas podem ter no desempenho das políticas, considerando um cenário ‘padrão’ em relação a pressões associadas a incertezas profundas. Cabe indicar que as discussões propostas na Figura em questão focam na AS Descoberto, uma vez que a AS Santa Maria apresenta altos níveis de desempenho em todas as políticas, para todos os parâmetros avaliados, o que novamente enfatiza a discrepância nos níveis de segurança hídrica e capacidade de adaptação das duas AS.

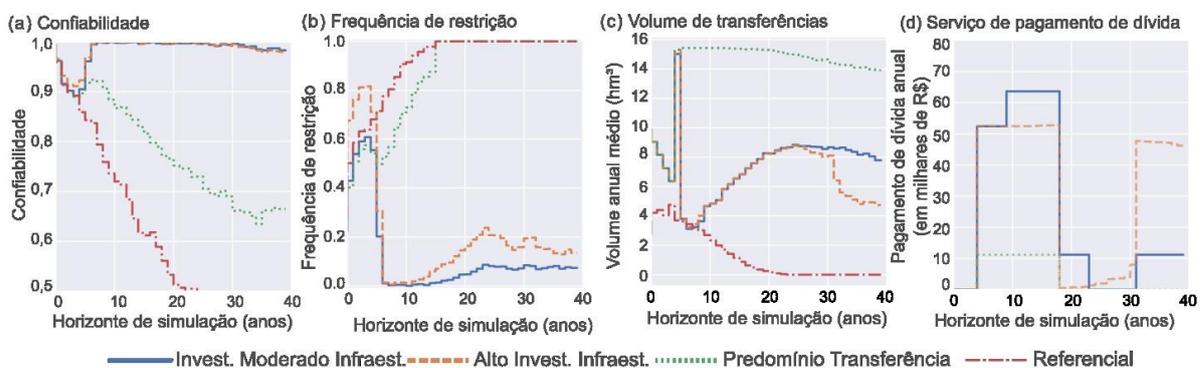


Figura 6.38 – Diagnóstico temporal de performance das políticas selecionadas a partir da frente aproximada de Pareto

A política ‘Referencial’ apresentou rápido declínio na confiabilidade, já nos primeiros anos do horizonte de planejamento, acompanhada do aumento no uso de medidas de restrição de consumo de água, atingindo valor máximo e indicando que a capacidade de abastecimento de água oferecida pela AS Descoberto não é capaz de atender ao crescimento na demanda por água, mesmo em cenários de poucas pressões associadas a incertezas profundas. Essa política também solicita transferências de água da AS Santa Maria para a AS Descoberto no início do horizonte temporal, mas à medida que a demanda cresce tais transferências reduzem, consequência provável das limitações na capacidade de tratamento da AS Santa Maria, pressionada pelo crescimento no consumo de água em sua própria região de atendimento. Sob a operação da política ‘Predomínio de Transferência’, a AS Descoberto sofre rápida queda na confiabilidade, o que é provisoriamente mitigado quando ocorre a construção de infraestruturas na AS Santa Maria, que aumentam a capacidade de tratamento e transferência de água a partir dessa área de serviço (painel c). Mais uma vez observa-se evidências da relevância da cooperação na gestão e operação das duas AS.

Contudo, logo o crescimento na demanda volta a desafiar a gestão da AS Descoberto, que aumenta o uso de medidas de restrição de consumo de água até seus valores máximos, sem importar em melhoria consistente na segurança hídrica (confiabilidade) do sistema. Novamente, confirma-se a necessidade da instalação de infraestruturas para manutenção de um desempenho aceitável do SAUA, em especial no que tange à AS Descoberto. As políticas que fazem uso consistente da construção de infraestruturas, por outro lado, apresentam perfil de desempenho bem distinto ao longo do horizonte de planejamento. No caso da política de alto investimento, a confiabilidade cai rapidamente nos primeiros anos, mas após a instalação de infraestrutura, ela volta a atingir altos valores, permitindo redução drástica na adoção de medidas de restrição de uso e na transferência de água a partir do sistema Santa Maria. O leve declínio na confiabilidade ao final do horizonte de planejamento leva essa política a novamente investir na expansão do sistema na última década avaliada.

Quanto à política de investimento moderado em infraestrutura, a dinâmica nos primeiros anos se mostra similar à política de alto investimento, divergindo ao longo das décadas, uma vez que realiza uma série de pequenos investimentos no aumento da capacidade de tratamento da AS Santa Maria (como mostra a Figura 6.37), permitindo a manutenção das transferências de água entre as AS ao longo de todo o horizonte de planejamento, mesmo

com o aumento da demanda na AS Santa Maria. Isso permite a manutenção da confiabilidade a níveis elevados ao longo dos anos, sem incorrer no aumento do uso de medidas de restrição de consumo ou de gastos com a instalação de novas infraestruturas.

A dinâmica apresentada na Figura 6.38 reforça dois pontos importantes: primeiro, que o período inicial do horizonte de planejamento é crítico para a segurança hídrica do sistema, devendo ser acompanhados com cautela. Segundo, que a cooperação regional entre áreas de serviço, ainda que não sejam suficientes para isoladamente manter a segurança hídrica do sistema, consistem em ferramentas valiosas para preservar a confiabilidade no curto prazo, e mesmo para evitar investimentos vultuosos em infraestrutura quando outras medidas podem manter os critérios de desempenho dentro de valores aceitáveis.

6.3. AVALIAÇÃO DE ROBUSTEZ E ANÁLISE DE CENÁRIOS A PARTIR DA REAVALIAÇÃO DE POLÍTICAS NÃO DOMINADAS

Conforme descrito no item 5.3, a estrutura de *DU Pathways* propõe que as políticas não dominadas obtidas na etapa de otimização multiobjetiva sejam testadas em possibilidades mais amplas de cenários possíveis para o sistema, e que incorporem incertezas profundas. A análise da performance das políticas após essa ampla testagem foca na perspectiva de robustez das soluções, ou seja, a fração de estados de mundo em que elas são capazes de atingir níveis aceitáveis de desempenho (Walker *et al.*, 2013a). Tendo em vista que o desempenho das políticas na AS Santa Maria não foi afetado na testagem em estados de mundo mais desafiadores e variados, as avaliações desta seção novamente se concentraram na AS Descoberto.

A Figura 6.39 traz a robustez das políticas da frente aproximada de Pareto sob o critério de métricas de satisfação (Starr, 1963, Equações 5.8 e 5.9) para a AS Descoberto. Na Figura 6.39a, são expressas as capacidades de cada política em manter um certo nível de desempenho (confiabilidade superior a 90%, frequência de restrição inferior a 20% e custo do pior primeiro percentil inferior a 10% da receita anual bruta), frente à ampla gama de estados de mundo mais desafiadores e nos quais estão presentes incertezas profundas.

De todas as 91 soluções não dominadas, apenas 24 atingiram os níveis exigidos pelas métricas de satisfação em algum cenário. A política ‘Alto Investimento em Infraestrutura’

alcançou a maior robustez, atingindo as métricas exigidas em 67,8% dos estados de mundo envolvidos na reavaliação. A robustez das demais políticas sob o critério das métricas de satisfação é consideravelmente inferior: menos de 14% para a política ‘Investimento Moderado em Infraestrutura’, e 0% para as políticas ‘Referencial’ e ‘Predomínio de Transferência’. Cabe realizar novo contraponto aos resultados consideravelmente superiores obtidos na aplicação de *DU Pathways* na Carolina do Norte (Gold *et al.*, 2023), diversos portfólios atendendo às métricas de satisfação em porcentagens mais altas de estados de mundo envolvidos na fase de reavaliação.

Os valores das métricas de satisfação empregados tiveram como base aplicações internacionais (Gold *et al.*, 2022; Herman *et al.*, 2015; Trindade *et al.*, 2019), tendo em vista que o conceito de robustez associado a incertezas profundas é recente no Brasil e carece de aplicações em realidades nacionais. Frente à ausência de referências locais e regionais para validação de tais parâmetros, julgou-se interessante avaliar como a variação dos valores utilizados nas métricas de satisfação podem afetar a percepção de robustez – análise apresentada para as políticas com investimento consistente em infraestrutura, no painel b da Figura 6.39.

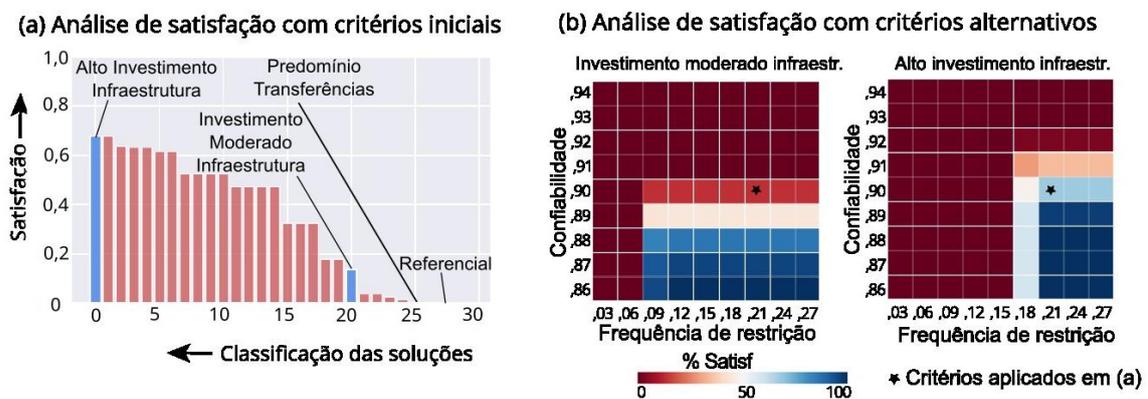


Figura 6.39 – Avaliação da robustez de políticas não dominadas sob a perspectiva de métricas de satisfação

A política ‘Alto Investimento em Infraestrutura’ é capaz de manter um desempenho de ao menos 88% de confiabilidade e 21% de frequência de restrição em todos os estados de mundo testados na Reavaliação, enquanto na política ‘Investimento Moderado em Infraestrutura’ esses valores correspondem a 86% de confiabilidade e 12% para frequência de restrição. A Figura 6.39b demonstra uma forte relação de compromisso entre as FOs

confiabilidade e frequência de restrição, além de evidenciar que nenhuma das duas políticas alcança valores de confiabilidade superiores a 91% para a AS Descoberto, desempenho considerado inaceitável em diversos SAUAs norte-americanos (Asefa et al., 2015).

A Figura 6.40 complementa a avaliação de robustez, apresentando duas perspectivas baseadas no conceito de arrependimento (Herman *et al.*, 2015). A primeira perspectiva conceitua arrependimento (tipo I) como a diferença entre a performance de uma política em um estado de mundo ‘padrão’ e sua performance na porção (10%) dos estados de mundo mais desafiadores. Assim, a Figura 6.40a apresenta relações de compromisso entre três FOs: confiabilidade, frequência de restrição e valor presente líquido de infraestruturas. A política ‘Investimento Moderado em Infraestrutura’ apresentou o menor arrependimento tipo I para os três critérios, indicando que essa política apresenta a menor alteração em seu desempenho quando testada em cenários mais desafiadores, em relação a um futuro ‘padrão’.

Cabe pontuar que um alto arrependimento do investimento em infraestrutura não consiste necessariamente em uma característica negativa, mas pode indicar que esse tipo de política busca adaptação a cenários mais desafiadores através da expansão estrutural do sistema. As políticas ‘Referencial’ e ‘Predomínio de Transferências’ possuem alto arrependimento em confiabilidade e frequência de restrição, indicando alta deterioração da sua performance em cenários mais desafiadores, além do não atendimento às métricas de satisfação já descrito.

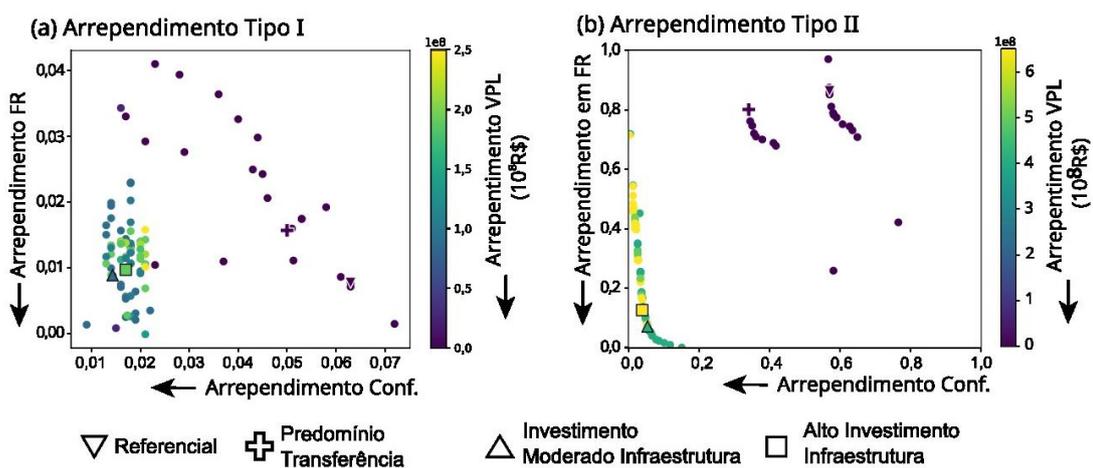


Figura 6.40 – Avaliação da robustez de políticas não dominadas sob a perspectiva de métricas de arrependimento

As avaliações de robustez são finalizadas com a segunda perspectiva de arrependimento (tipo II), que busca medir a distância entre o desempenho de uma política em um certo estado de mundo e a performance da política mais eficiente dentro desse mesmo estado de mundo.

Assim, essa métrica avalia as consequências de se escolher uma política inadequada (Savage, 1951; Herman *et al.*, 2015). A Figura 6.40b apresenta a avaliação do arrependimento tipo II, novamente destacando uma forte relação de compromisso entre confiabilidade e frequência de restrição.

As políticas ‘Referencial’ e ‘Predomínio de Transferências’ possuem baixo desempenho, superado por diversas outras políticas da frente aproximada de Pareto. Em contrapartida, políticas que investem em infraestrutura apresentam um salto de desempenho em confiabilidade e frequência de restrição, localizando-se em uma superfície de desempenho representativa da forte relação de compromisso entre essas duas FOs. É o caso das políticas ‘Alto Investimento em Infraestrutura’ e ‘Investimento Moderado em Infraestrutura’, que se diferenciam no favorecimento de confiabilidade (no primeiro caso) ou frequência de restrição (no segundo caso). As avaliações apresentadas na Figura 6.40b permitem concluir que a escolha de uma política exige a ponderação e priorização entre confiabilidade, frequência de restrição e custos com a expansão de infraestrutura.

A Figura 6.41 complementa o diagnóstico dos resultados da Reavaliação, focando no comportamento das políticas de ‘Alto Investimento em Infraestrutura’ e ‘Investimento Moderado em Infraestrutura’. Para tanto, a ferramenta de Análise de Cenários, descrita no item 5.3, foi aplicada para mapear a capacidade das duas políticas mencionadas em manter seu desempenho dentro dos critérios exigidos pelas métricas de satisfação (confiabilidade superior a 90%, frequência de restrição inferior a 20% e custo do pior primeiro percentil inferior a 10% da receita anual bruta) nos diversos cenários utilizados na etapa de Reavaliação. O algoritmo GBT empregado na Análise de Cenários indicou que, para as políticas selecionadas, os dois fatores de incerteza que mais impactam a gestão e operação do sistema no longo prazo são a efetividade da aplicação de medidas de restrição de consumo (ou seja, quanto os usuários reduzem no consumo de água ao serem aplicadas campanhas educativas, tarifas de contingência e racionamento) e a taxa de crescimento da demanda por água.

A Figura 6.41a mostra que a política ‘Investimento Moderado em Infraestrutura’ só é capaz de alcançar os níveis de desempenho das métricas de satisfação quando as medidas de restrição de uso são mais eficazes que o esperado (multiplicador associado superior a 1), e quando a taxa de crescimento da demanda é inferior ao esperado. Por outro lado, a Figura

6.41c mostra que a política ‘Alto Investimento em Infraestrutura’ atende aos critérios de métrica de satisfação na maior parte dos estados de mundo testados, falhando apenas quando as medidas de restrição do consumo são pouco efetivas e o crescimento da demanda é alto.

Enquanto os painéis a e c da Figura 6.41 parecem indicar grandes diferenças entre as duas políticas, essa discrepância aparenta reduzir quando se avalia temporalmente seus desempenhos nos estados de mundo menos e mais favorável (painéis b e d, respectivamente), ao longo do horizonte de planejamento. Em ambos os cenários, a segurança hídrica (confiabilidade) das duas políticas cai drasticamente no início do período em estudo, com o desempenho da política que investe mais em infraestrutura apresentando valores sutilmente mais elevados. Isso se deve ao maior acionamento de medidas de restrição de consumo, já que nesse momento nenhuma infraestrutura tem sua implementação finalizada. Após a completa instalação de infraestrutura, ambas as políticas têm seu desempenho alavancado de maneira similar. Esse panorama sugere que, antes da instalação de qualquer infraestrutura, a AS Descoberto depende totalmente de medidas de restrição de consumo que, se não forem tão efetivas quanto se espera, podem levar essa área de serviço a situações de extrema vulnerabilidade no curto prazo.

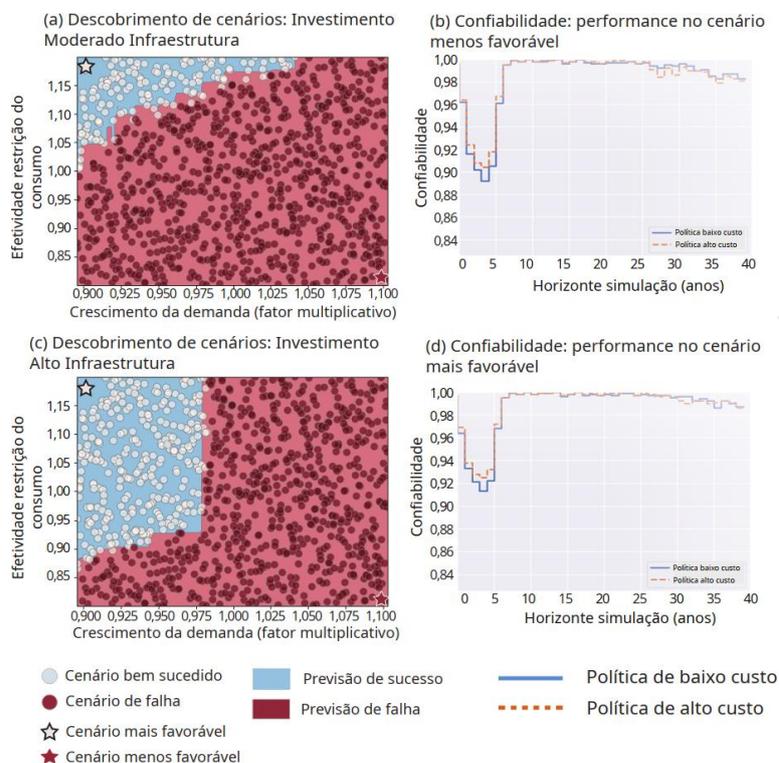


Figura 6.41 – Análise de cenários para as políticas com alto e moderado investimento em infraestrutura

A análise temporal associada à Análise de Cenários apresenta complementações fundamentais para uma análise mais completa dos fatores determinantes de sucesso ou falha de uma política. Enquanto os painéis a e c consolidam o desempenho de cada política ao longo de toda a Reavaliação (tomando como base o pior desempenho ao longo de toda a simulação) e indicam os fatores de incerteza que comprometem essa performance, a adição do componente temporal permite identificar que o curto prazo é o momento crítico no qual essas incertezas possuem influência mais estratégica e no qual a construção de infraestrutura se mostra indispensável.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo prévio das abordagens DMDU confirmou ser essa uma área do conhecimento em franca expansão em âmbito internacional e com aplicações promissoras, tendo em vista o crescente número de contextos desafiadores que ameaçam a segurança hídrica e o abastecimento de água em diversas regiões do mundo. Entretanto, foi possível perceber que ainda existem pouquíssimas evidências de aplicação da perspectiva DMDU em SAUAs do Brasil (Araujo *et al.*, 2023, no prelo)⁴, ainda que existam diversos sistemas hídricos que poderiam se beneficiar de tais abordagens para construção de estratégias de planejamento e gestão mais robustas e resistentes a condições pouco previsíveis, como é o caso do Distrito Federal.

Em relação às séries sintéticas elaboradas para construção dos possíveis estados de mundo para o sistema, exigidos na execução da otimização multiobjetiva e reavaliação, algumas reflexões acerca das séries hidrológicas e FIPs merecem nota. O método Gerador de Vazões proposto por Kirsch *et al.* (2013) foi capaz de gerar grande número de séries hidrológicas com longo horizonte temporal, ao mesmo tempo que produziu condições realistas compatíveis com a região do Distrito Federal, mantendo correlações históricas intra e interanual ao longo de toda sua extensão. O resultado da utilização dessas séries na operação do *WaterPaths* sugere que métodos não paramétricos com as características supracitadas podem ser de grande valia para permitir a aplicação de princípios centrais em abordagens DMDU, como exploração de futuros e análise de cenários. Além disso, a obtenção de séries hidrológicas históricas longas e sem falhas – o que muitas vezes representa um desafio em realidades brasileiras – pode ser superado por métodos de extensão e preenchimento de falhas, possibilitando a aplicação de métodos da mesma natureza do Gerador de Vazões. Por fim, a partir da comparação das séries hidrológicas utilizadas neste trabalho e em Giacomazzo (2020), foi possível entender a relevância que esses dados de entrada possuem nos resultados da modelagem proposta. Nesse sentido, a geração de cenários mais desafiadores, juntamente com outros fatores, afetou consideravelmente o desempenho dos portfólios de gestão, que se revelou bem inferiores à performance apresentada nos portfólios encontrados em Giacomazzo (2020).

⁴ Araujo *et al.* demonstrou por meio de análise bibliométrica a inexistência de aplicações DMDU a SAUAs brasileiros na Literatura (artigos científicos publicados). No entanto, cabe indicar o trabalho desenvolvido por Giacomazzo (2020).

Referente ao segundo elemento (definição dos FIPs), confirmou-se que diversas condições presentes no contexto do Distrito Federal possuem potencial para serem tratados como incertezas profundas. Além disso, a incorporação de diálogos e consultas junto às instituições responsáveis pela operação e regulação do SAUA do DF (Caesb e Adasa, respectivamente) enriqueceu o processo de definição e caracterização dos FIPs, tornando-o mais realista e condizente com a realidade do sistema em estudo. Ainda que documentos técnicos tenham embasado a delimitação preliminar dessas incertezas, as discussões desenvolvidas com representantes técnicos dos órgãos trouxeram percepções importantes sobre o SAUA, que de outra forma não seriam incorporadas a esta pesquisa. Dessa maneira, recomenda-se que as modelagens DMDU busquem incorporar a visão técnica daquelas instituições que lidam frequentemente com as complexidades do sistema em estudo, em um processo colaborativo que reflita as visões das diversas partes interessadas.

Considera-se que a execução das etapas de otimização multiobjetiva e reavaliação das políticas não dominadas em cenários mais diversos e desafiadores foi efetuada com sucesso, sendo importante tecer algumas considerações a respeito dos resultados alcançados. Primeiro, a otimização multiobjetiva envolve interesses nem sempre convergentes, em que a melhoria no desempenho em um critério pode implicar na perda de performance em outro. A escolha da política mais adequada para implementação envolve, portanto, a ponderação de diversos interesses, sendo fundamental a negociação e o envolvimento das partes interessadas na tomada de decisão. No caso deste estudo, as relações conflitantes entre as FOs confiabilidade e frequência de restrição chamaram atenção. Outra reflexão digna de nota se refere ao próprio conjunto de políticas integrantes da frente ótima de Pareto: diversas dessas políticas não apresentaram desempenho aceitável em alguns objetivos do sistema, indicando que o fato de uma solução ser não dominada não garante que ela tenha performance aceitável em todos os critérios de interesse.

Também foi possível constatar o papel fundamental que os investimentos em infraestrutura possuem para melhoria da segurança hídrica do sistema – uma relação que se mostra não linear, exigindo análises cuidadosas das relações de custo-benefício entre aportes investidos e confiabilidade adquirida. Tais reflexões confirmam que o planejamento e gestão de sistemas complexos envolvem análises e decisões nem sempre intuitivas, e onde a incorporação de avaliações associadas a incertezas profundas justifica-se cada vez mais.

Além de todos os pontos já apresentados, um aspecto central se mostrou pertinente durante a análise dos resultados: a inequidade socioeconômica intrarregional vivenciada dentro do SAUA do DF, e suas consequências no planejamento e gestão do sistema, na sua capacidade de adaptação e em sua robustez frente às diversas possibilidades de futuro. A segregação da análise de desempenho dos portfólios por AS, e o diagnóstico da dinâmica temporal de algumas políticas revelaram grandes disparidades na confiabilidade e robustez que é possível alcançar por cada uma das AS (Descoberto e Santa Maria). Mesmo em cenários futuros não desafiadores, a AS Descoberto vivencia fortes riscos de falha, especialmente no curto prazo, em contraponto aos altos níveis de confiabilidade da AS Santa Maria. Tais disparidades: (i) evidenciam impactos da inequidade histórica vivenciada no DF, que remontam à época da fundação de Brasília; (ii) perpassam décadas de ocupação não planejada de seu entorno; (iii) confirmam no presente a diferença de vulnerabilidade a crises hídricas entre populações com poder aquisitivo distinto (à exemplo da crise vivenciada entre 2016 e 2018); e (iv) ameaçam a sustentabilidade e a segurança de abastecimento do sistema no futuro.

Apesar das evidentes diferenças, ambas as AS demonstraram a necessidade de portfólios de planejamento que associem medidas de gestão de secas e investimentos de longo prazo para manutenção da sustentabilidade e segurança hídrica do SAUA do DF. A interdependência entre as duas AS, sobretudo por meio do uso de transferências de água entre as duas áreas, também foi uma conclusão relevante. Nesse sentido, a expansão da capacidade de tratamento na AS Santa Maria se mostrou fundamental para manutenção da segurança hídrica regional e da AS Descoberto, reforçando a correlação entre essas duas áreas.

Frente ao exposto, considera-se que a execução de avaliações e análises segregadas por AS forneceu compreensões das complexidades do sistema que poderiam ser omitidas caso o SAUA do DF fosse tratado como um sistema homogêneo. Também é necessário ressaltar a eficácia obtida na aplicação de métodos de Análise de Cenários, que revelaram a demanda e a efetividade das medidas de restrição de consumo como os principais fatores determinantes de falha ou sucesso dos portfólios na operação do sistema. Esse mapeamento pode auxiliar os tomadores de decisão, principalmente no que tange ao monitoramento de riscos associados ao sistema.

Nesse ínterim, é importante ressaltar que este trabalho não possuiu a pretensão de apontar portfólios ou estratégias específicas para serem diretamente aplicadas no SAUA do DF. Buscou-se, por outro lado, discutir complexidades associadas ao sistema por meio da análise de diferentes perfis de desempenho das políticas; da avaliação das condições de risco que podem estar presentes nos cenários futuros e serem determinantes para falhas no abastecimento; e como as inequidades socioeconômicas e históricas afetam a capacidade de adaptação e a segurança hídrica de áreas dentro de um mesmo sistema. A ideia principal, portanto, foi propor discussões que agreguem cada vez mais conhecimento acerca desse sistema tão único que é o SAUA do DF, para então, à luz dos princípios DMDU, construir novos caminhos que sejam cada vez mais inclusivos, abrangentes e robustos.

Conforme já mencionado anteriormente, a aplicação de abordagens DMDU exige o domínio de ferramentas e linguagens computacionais, que consistiram em tarefa técnica particularmente desafiadora nesta pesquisa. Outra limitação encontrada se refere à necessidade de computadores de alta performance, nem sempre disponíveis nas instituições de pesquisa e ensino. Nesse sentido, a colaboração com grupos de pesquisa internacionais foi fundamental para a aplicação integral da estrutura DU *Pathways* proposta nesta pesquisa.

Portanto, sugere-se que estudos posteriores reúnam esforços no sentido de tornar os dados, simulações e análises mais amigáveis aos gestores e tomadores de decisão, buscando aproximar as iniciativas de pesquisa na fronteira da Ciência à realidade de aplicação dos conhecimentos e princípios estudados. Outra recomendação de aplicação refere-se à incorporação de sistemas rurais na modelagem do SAUA do DF, tendo em vista ser esse um meio com diversas partes interessadas importantes e que devem ser consideradas nos processos de planejamento e tomada de decisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adasa. Agência Reguladora de Água, Esgoto e Saneamento Básico do Distrito Federal. Mapa hidrográfico do Distrito Federal. Disponível em: <<http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/mapas/mapa%20hidrografico%20-%20a4%20net.pdf>>. Acesso em 11 de fev. 2020.
- Adasa. Agência Reguladora de Água, Esgoto e Saneamento Básico do Distrito Federal. (2021). *Nota Técnica nº 11/2021*. Brasília, Distrito Federal, 40p.
- Adasa. Agência Reguladora de Água, Esgoto e Saneamento Básico do Distrito Federal. (2019). *Relatório de Monitoramento Regular do Consumo de Água Tratada no Distrito Federal*. Brasília, Distrito Federal, 24p.
- Adasa. Agência Reguladora de Água, Esgoto e Saneamento Básico do Distrito Federal. (2018). *Relatório de Monitoramento Regular do Consumo de Água Tratada no Distrito Federal*. Brasília, Distrito Federal.
- Adasa. Agência Reguladora de Água, Esgoto e Saneamento Básico do Distrito Federal. Caesb. Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Emater-DF. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal. Seagri. Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento e Desenvolvimento Rural. (2018). *Gestão da Crise Hídrica 2016-2018: Experiências do Distrito Federal*. Brasília, Distrito Federal, 331p.
- Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Muluetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., Zickfeld, K. (2018). 2018: Framing and Context. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Portal Hidroweb – Séries Históricas*. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em 10 de mar.2021.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. “Evaporação líquida de reservatórios artificiais no Brasil.” Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c5b45a6e-69df-4a26->

9dd9-846160b10e2a>. Acesso em 28 de dez.2021.

- Araújo, B. M., Pacheco, G. C. R., Fernandes, C. Y., Lima, D., S., Alves, C. M. A. (2023). “A general methodology for adaptative planning of urban water systems under deep uncertainty”. In: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, no prelo.
- Asefa, T., Adams, A., Wanakule, N. (2015). “A Level-of-Service Concept for Planning Future Water Supply Projects under Probabilistic Demand and Supply Framework”. In: *Journal of the American Water Resources Association*, 52(5), 1272-1285. DOI: 10.1111/1752-1688.12309.
- Banco Central do Brasil. *Focus - Relatório de Mercado*. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>>. Acesso em 15 de jan.2022.
- Bankes, S. (1993). “Exploratory Modeling for Policy Analysis”. In: *Operations Research*, 41(3), 435–449.
- Borgomeo, E., Mortazavi-Naeini, M., Hall, J. W., Guillod, B. P. (2018). "Risk, Robustness and Water Resources Planning Under Uncertainty". In: *Earth's Future*, 6(3), 468–487.
- Bryant, B. P., Lempert, R. J. (2010). “Thinking inside the box: A participatory, computer-assisted approach to scenario discovery.” In: *Technological Forecasting and Social Change*, 77(1), 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2009.08.002>.
- Burek, P., Satoh, Y., Fischer, G., Kahil, M. T., Scherzer, A., Tramberend, S., Nava, L. F., Wada, Y., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Magnuszewski, P., Cosgrove, B., Wiberg, D. (2016). *Water Futures and Solution: Fast Track Initiative - Final Report*. International Institute for Applied Systems Analysis. Luxemburgo, Áustria.
- CODEPLAN. Companhia de Planejamento do Distrito Federal. (2017a). *Atlas do Distrito Federal*. Brasília, Distrito Federal, 114p.
- CODEPLAN. Companhia de Planejamento do Distrito Federal. (2017b). *Consumo de Água do Distrito Federal por Região Administrativa: Texto para Discussão*. Brasília, Distrito Federal, 36p.
- CODEPLAN. Companhia de Planejamento do Distrito Federal. (2018). *Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios*. Brasília, Distrito Federal, Brasil.
- Detzel, D. H. M. (2015). *Modelagem de Séries Hidrológicas: Uma Abordagem de Múltiplas Escalas Temporais*. Tese de Doutorado. Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 214 p.
- Dewar, J. A., Builder, C. H., Hix, W. M., Levin, M. H. (1993). “Assumption-Based Planning: A Planning Tool for Very Uncertain Times”. In: *Report MR-114-A*. RAND,

- Santa Monica, Califórnia, Estados Unidos.
- Efron, B. (1979). "Bootstrap methods: Another look at the jackknife". In: *The Annals of Statistics*, 7(1), 1–26.
- Fischbach, J.R. (2010). *Managing New Orleans Flood Risk in an Uncertain Future using Non-Structural Risk Mitigation*. Tese de Doutorado, Escola de Graduação RAND, Santa Mônica, Califórnia, Estados Unidos.
- Flörke, M., Schneider, C., McDonald, R. I. (2018). "Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth.". In: *Nature Sustainability*, 1(1), 51–58.
- Freund, Y, Schapire, R. E. (1999). "A short introduction to boosting". In: *Journal of Japanese Society for Artificial Intelligence*, 14(5), 771-780.
- Friedman, J. H. Fisher, N. I. (1999). "Bump hunting in high-dimensional data". In: *Statistics and computing*, 9(2), 123–143.
- Giacomazzo, A. P. (2020). *Análise de Portifólios de Planejamento e Gestão do Sistema de Abastecimento Urbano do Distrito Federal no Contexto de Incertezas Profundas*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 176p.
- Gleick, P. H. (2003). "Global Freshwater Resources: Soft-Path Solutions for the 21st Century." In: *Science*, 302(5650), 1524–1528.
- Gold, D. F., Reed, P. M., Gorelick, D. E., Characklis, G. W. (2023). "Advancing regional water supply management and infrastructure investment pathways that are equitable, robust, adaptive, and cooperatively stable.". In: *Water Resources Research*, 59, e2022WR033671.
- Gold, D. F., Reed, P. M., Gorelick, D. E., Characklis, G. W. (2022). "Power and pathways: Exploring robustness, cooperative stability, and power relationships in regional infrastructure investment and water supply management portfolio pathways." In: *Earth's Future*, 10(2). <https://doi.org/10.1029/2021EF002472>.
- Gold, D. F., Reed, P. M., Trindade, B. C., Characklis, G. W. (2019). "Identifying Actionable Compromises: Navigating Multi-City Robustness Conflicts to Discover Cooperative Safe Operating Spaces for Regional Water Supply Portfolios". In: *Water Resources Research*, 55, 9024–9050.
- Gonçalves, T. D. (2012). *Recursos Hídricos no Distrito Federal : Modelagem Hidrológica para subsidiar a gestão sustentável na bacia do Ribeirão Pípiripau*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito

Federal, 149p.

- Governo do Distrito Federal (2009). *Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal: Documento Técnico*. Brasília, Distrito Federal, 358p.
- Governo do Distrito Federal. (2017a). *Plano Distrital de Saneamento Básico e de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos*. Brasília, Distrito Federal, 465p.
- Governo do Distrito Federal. (2017b). *Plano Integrado de Enfrentamento à Crise Hídrica*. Brasília, Distrito Federal, 67p.
- Groves, D. G., Lempert, R. J. (2007). “A new analytic method for finding policy-relevant scenarios”. In: *Global Environmental Change*, 1(17), 73–85.
- Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., ter Maat, J. (2013). "Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world". In: *Global Environmental Change*, 23, 485-498.
- Haasnoot, M., Middelkoop, H., van Beek, E., van Deursen, W. P. A. (2011). "A method to develop management strategies for an uncertain future". In: *Sustainable Development*, 19, 369–381.
- Hadjimichael, A., Quinn, J. D., Wilson, E., Reed, P. M., Basdekas, L., Yates, D., Garrison, M. (2020). “Defining robustness, vulnerabilities, and consequential scenarios for diverse stakeholder interests in institutionally complex river basins”. In: *Earth's Future*, 7.
- Hadka, D., Madduri, K., Reed, P. M. (2013). “Scalability Analysis of the Asynchronous, Master-Slave Borg Multiobjective Evolutionary Algorithm”. In: *2013 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, Workshops and Phd Forum*, 425-434.
- Hadka, D., Reed, P. M. (2012). “Borg: An auto-adaptive many-objective evolutionary computing framework”. In: *Evolutionary Computation*, 21(2), 231–259.
- Hall, J. W., Harvey, H. (2009). “Decision Making under Severe Uncertainties for Flood Risk Management: A Case Study of Info-Gap Robustness Analysis”. In: *Proceedings of 8th International Conference on Hydroinformatics 2009*, Chile.
- Hall, J.W., Lempert, R. J., Keller, A., Hackbarth, A., Mijere, C., McInerney, D. (2012). “Robust climate policies under uncertainty: A comparison of robust decision making and info gap methods”. In: *Risk Analysis*, 32, 16527–11672.
- He, C., Liu, Z., Wu, J. *et al.* (2021). “Future global urban water scarcity and potential solutions”. In: *Nature Communications*, 12, 4667.
- Herman, J. D., Reed, P. M., Zeff, H. B., Characklis, G. W. (2015). “How should robustness

- be defined for water systems planning under change?”. In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(10), 04015012.
- Herman, J. D., Zeff, H. B., Reed, P. M., Characklis, G. W. (2014). "Beyond optimality: Multistakeholder robustness tradeoffs for regional water portfolio planning under deep uncertainty." In: *Water Resources Research*, 50, 7692–7713.
- Huskova, I., Matrosov, E. S., Harou, J. J., Kasprzyk, J. R., Lambert, C. (2016). "Screening robust water infrastructure investments and their trade-offs under global change: A London example". In: *Global Environmental Change*, 41, 216–227.
- IBGE. (2018). *Projeções da população: Brasil e unidades da federação: revisão 2018*. IBGE, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Rio de Janeiro, 58p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). *Prévia da população calculada com base nos resultados do Censo Demográfico 2022 até 25 de dezembro de 2022*. Disponível em: <https://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2022/Previa_da_Populacao/POP_2022_Brasil_e_UFs.pdf>. Acesso em 06 de ago.2023.
- IBGE. Preços e custos. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos.html>>. Acesso em 15 de ago.2022.
- IPCC. Masson-Delmotte, V., P., Zhai, A., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M. I., Gomis, M., Huang, K., Leitzell, E., Lonnoy, J. B. R., Matthews, T. K., Maycock, T., Waterfield, O., Yelekçi, R., Yu, B., Zhou, B. (eds.). (2021). *IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. In Press.
- IPCC. (2022). "Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability." In: H. Portner, D. C. Roberts, M. B. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Algegria, et al. (Eds.), *Contribution of Working Group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Jafino, B. A., Kwakkel, J. H. (2021). "A novel concurrent approach for multiclass scenario discovery using multivariate regression trees: Exploring spatial inequality patterns in the Vietnam Mekong delta under uncertainty". In: *Environmental Modelling & Software*, 145, 105177.
- Jeuland, M., Whittington, D. (2014). "Water resources planning under climate change: Assessing the robustness of real options for the Blue Nile". In: *Water Resources*

Research, 50, 2086-2107.

- Kasprzyk, J. R., Nataraj, S., Reed, P. M., Lempert, R. J. (2013). "Many Objective Robust Decision Making for Complex Environmental Systems Undergoing Change". In: *Environmental Modelling and Software*, 42, 55-71.
- Kirsch, B. R., Characklis, G. W., Zeff, H. B. (2013). "Evaluating the Impact of Alternative Hydro-Climate Scenarios on Transfer Agreements: Practical Improvement for Generating Synthetic Streamflows". In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139 (4), 396–406.
- Korteling, B., Dessai, S. Kapelan, Z. (2012). "Using information-gap decision theory for water resources planning under severe uncertainty". In: *Water Resources Management*, 27, 1149–1172.
- Kwakkel, J. H., Walker, W. E. Marchau, V. A. W. J. (2010). "Adaptive Airport Strategic Planning". In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 3(10), 249–273.
- Laumanns, M., Thiele, L., Deb, K., Zitzler, E. (2002). "Combining convergence and diversity in evolutionary multiobjective optimization". In: *Evolutionary Computation*, 10(3), 263–282.
- Lawrence, J., Reisinger, A. Mullan, B., Jackson, B. (2013). "Exploring climate change uncertainties to support adaptive management of changing flood-risk". In: *Environmental Science and Policy*, 33, 133–142.
- Lempert, R. J., Groves, D. G. (2010). "Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American west". In: *Technological Forecasting and Social Change*, 6(77), 960–974.
- Lempert, R. J., Popper, S., Bankes, S. (2003). Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative, Long Term Policy Analysis. In: *Report MR-1626-RPC*, Centro Rand Pardee, Santa Mônica, Califórnia, Estados Unidos.
- Loucks, D. P., van Beek, E. (2017). *Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications*. Springer, 624p.
- Marchau, V., Walker, W., Bloemen, P., Popper, S. (2019). *Decision Making Under Deep Uncertainty. From Theory to Practice*. The Society for Decision Making under Deep Uncertainty, 408p.
- Marchau, V., Walker, W., van Duin, R. (2008). "An adaptive approach to implementing innovative urban transport solutions". In: *Transport Policy*, 15, 405–412.
- Marengo, J. A. "Water and Climate Change". (2008). In: *Estudos Avançados*, 63(22), 83–

- Martini Filho, L. R. (2018). *A Hybrid ARIMA and ANN Model for Synthetic Streamflow Generation*. Dissertação de Mestrado. Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 75 p.
- Matrosov, E. S., Harou, J. J., Loucks, D. P. (2011). "A computationally efficient open-source water resource system simulator - Application to London and the Thames Basin". In: *Environmental Modelling and Software*, 26, 1599–1610.
- Matrosov, E. S., Huskova, I., Kasprzyk, J. R., Harou, J. J., Lambert, C., Reed, P. M. (2015). "Many-objective optimization and visual analytics reveal key trade-offs for london's water supply". In: *Journal of Hydrology*, 531, 1040–1053.
- Mckay, M. D., Beckman, R. J., Conover, W. J. (1979). "A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code". In: *Technometrics*, 21, 239-245.
- Nações Unidas, Departamento de Economia e Assuntos Sociais. *World Urbanization Prospects 2018*. Disponível em: < <https://population.un.org/wup/Country-Profiles/>>. Acesso em 18 de fev. 2021.
- Nicklow, J., Reed, P. M., Savic, D., Dessalegne, T., Harrell, L. Chan-Hilton, A., Karamouz, M., Minsker, B., Ostfeld, A., Singh, A., Zechman, E. (2010). "State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management". In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136, 412–432.
- Rahman, A., Walker, W. E. Marchau, V. (2008). *Coping with Uncertainties About Climate Change in Infrastructure Planning – An Adaptive Policymaking Approach. Final Report*. Ecorys Research and Consulting, Rotterdam, 57p.
- Ranger, N., Reeder, T., Lowe, J. (2013). "Addressing 'deep' uncertainty over long-term climate in major infrastructure projects: four innovations of the Thames Estuary 2100 Project". In: *EURO Journal on Decision Processes*, 1, 233–262.
- Rieu-Clarke, A., Moynihan, A., Magsig, B. O. (2015). *Transboundary water governance and climate change adaptation: International law, policy guidelines and best practice application*. WWAP. Paris, UNESCO.
- Salas, J. D., Sveinsson, O. G., Lane, W. L., Frevert, D. K. (2006). "Stochastic streamflow simulation using SAMS-2003". In: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132 (112), 112-122.
- Santos, A. T., Allasia, D. G., Tassi, R., Minella, J., Fensterseifer, M., Cunha, C. S.

- “Transferência de dados hidrológicos entre dois postos fluviométricos da região noroeste do Rio Grande do Sul”. In: *XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, RS, Brasil*.
- Savage, L. J. (1951). “The theory of statistical decision”. In: *Journal of the American Statistical Association*, 46(253), 55–67.
- Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Proteção Animal do Distrito Federal (SEMA-DF). Portal Sisdia, disponível em <www.sisdia.df.gov.br/home>. Acesso em 28 de jun.2023.
- Sieber, J. (2006). “WEAP water evaluation and planning system”. In: *International Congress on Environmental Modelling and Software*, 170.
- Silva, W. (2013). *Modelo para priorização de diretrizes de combate a crises de abastecimento urbano de água*. Tese de doutorado. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 241p.
- Singh, R., Reed, P. M., Keller, K. (2015). “Many-objective robust decision making for managing an ecosystem with a deeply uncertain threshold response”. In: *Ecology and Society*, 20(3).
- Smith, R., Kasprzyk, J., Zagona, E. (2016). "Many-Objective Analysis to Optimize Pumping and Releases in Multireservoir Water Supply Network". In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(2).
- Souza, S. A. (2022). *Incertezas em testes de tendências hidrometeorológicas na tomada de decisão em medidas de adaptação*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 431p.
- Srinivas, V. V., Srinivasan, K. (2005). “Hybrid moving block bootstrap for stochastic simulation of multi-site multi-season streamflows”. In: *Journal of Hydrology*, 302 (1–4), 307–330.
- Starr, M. K. (1963). *Product design and decision theory*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Tomlinson, J. E., Arnott, J. H., Harou, J. J. (2020). "A water resource simulator in Python". In: *Environmental Modelling and Software*, 126.
- Triana, E., Labadie, J. W. (2006) “Decision support system for optimal river basin management”. In: *International Congress on Environmental Modelling and Software*, 242.
- Tribunal de Contas da União. *Relatório de Fiscalização nº 36/2018*. Secretaria de Controle

- Externo, Secretaria de Fiscalização de Infraestrutura Urbana. Brasília, 2018, 55p.
- Trindade, B. C. (2019). *Advancing Regional Water Supply Portfolio Management and Cooperative Infrastructure Investment Pathways Under Deep Uncertainty*. Tese de Doutorado, Universidade de Cornell, Ithaca, Estados Unidos, 297p.
- Trindade, B. C., Gold, D. F., Reed, P. M., Zeff, H. B., Characklis, G. W. (2020). "Water pathways: An open source stochastic simulation system for integrated water supply portfolio management and infrastructure investment planning". In: *Environmental Modelling and Software*, 132.
- Trindade, B. C., Reed, P. M., Characklis, G. W. (2019). "Deeply uncertain pathways: Integrated multi-city regional water supply infrastructure investment and portfolio management". In: *Advances in Water Resources*, 134.
- Trindade, B. C., Reed, P. M., Herman, J. D., Zeff, H. B., Characklis, G. W. (2017). "Reducing regional drought vulnerabilities and multi-city robustness conflicts using many-objective optimization under deep uncertainty". In: *Advances in Water Resources*, 104, 195–209.
- UNESCO. Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura. (2020) *Water and Climate Change: The United Nations World Water Development Report 2020*. Paris, 235p.
- Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., van Vliet, M. T.H., Yillia, P., Ringler, C., Burek, P., Wiberg, D. (2016). "Modeling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches". In: *Geoscientific Model Development*, 9, 175–222.
- Walker, W. E., Haasnoot, M., Kwakkel, J. H. (2013a). "Adapt or perish: A review of planning approaches for adaptation under deep uncertainty". In: *Sustainability (Switzerland)*, 5, 955–979.
- Walker, W. E., Lempert, R., Kwakkel, J. H. (2013b). "Deep Uncertainty". In: *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.
- Walker, W. E., Rahman, S. A., Cave, J. (2001). "Adaptive policies, policy analysis, and policy-making". In: *European Journal of Operational Research*, 128, 282–289.
- Zagona, E. A., Fulp, T. J., Shane, R., Magee, T., Goranflo, H. M. (2001). "Riverware: a generalized tool for complex reservoir system modeling". In: *Journal of the American Water Resources Association*, 37(4), 913–929.
- Zeff, H. B., Herman, J. D., Reed, P. M., Characklis, G. W. (2016). "Cooperative drought adaptation: Integrating infrastructure development, conservation, and water transfers

- into adaptive policy pathways". In: *Water Resources Research*, 52, 7327–7346.
- Zeff, H. B., Kasprzyk, J. R., Herman, J. D., Reed, P. M., Characklis, G. W. (2014). "Navigating financial and supply reliability tradeoffs in regional drought management portfolios". In: *Water Resources Research*, 50, 4906–4923.
- Zhang, X., Chen, N., Sheng, H. Ip, C., Yang, L., Chen, Y., Sang, Z., Tadesse, T., Lim, T. P.Y., Rajabifard, A., Bueti, C., Zeng, L., Wardlow, B., Wang, S., Tang, S., Xiong, Z., Li, D., Niyogi, D. (2019). "Urban drought challenge to 2030 sustainable development goals". In: *Science of the Total Environment*, 69.
- Zitzler, E., Thiele, L., Laumanns, M., Fonseca, C. M., da Fonseca, V. G. (2003). "Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review." In: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 7 (2), 117–132.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÁLCULO DAS FUNÇÕES OBJETIVO

Conforme descrito na Metodologia deste trabalho, a otimização multiobjetiva seleciona portfólios de planejamento e gestão com base em critérios, as FOs, que refletem os interesses e objetivos dos atores do sistema. Este trabalho utilizou cinco FOs: Confiabilidade, Frequência de Restrição, Valor Presente Líquido de investimentos em infraestrutura adotados por cada política, Custo Anual Médio de operação do SAUA, e o Custo do Pior Primeiro Percentil, que reflete o grau de variabilidade do saldo de despesas e receitas da companhia. Durante o processo de otimização (e posteriormente, o processo de reavaliação segue a mesma lógica), cada política é testada em milhares de estados de mundo associados a incertezas profundas, e a performance dessa política nesses cenários é expressa em termos das FOs. Frente ao exposto, a forma de cálculo de cada um desses critérios é apresentada a seguir.

A Confiabilidade representa a fração de estados de mundo nos os reservatórios tiveram seus volumes reduzidos a menos de 20% de sua capacidade máxima, em alguma semana do horizonte de simulação:

$$\max f_{CONF} = \min_j \left[\min_y \left(\frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} g_{i,j}^y \right) \right] \quad (A1)$$

em que

$$g_{i,j}^y = \begin{cases} 0 & \forall w: \frac{x_{s,i,j}^{y,w}}{C_j} \geq s_c \\ 1 & otherwise \end{cases} \quad (A2)$$

nas equações A1 e A2, N_r consiste no número de execuções (submissão da política em questão a um estado de mundo específico) de uma simulação, e $g_{i,j}^y$ representa uma função binária cujo valor é zero caso o nível do reservatório tenha caído a volumes abaixo de um valor crítico s_c em alguma semana de um dado ano da execução, e 1 caso contrário.

A Frequência de restrição representa a fração de anos dentro do horizonte de planejamento (40 anos no caso deste estudo) em que em ao menos uma semana w tenha sido necessário aplicar medidas de restrição de uso.

$$\min f_{FR} = \max_j \left[\frac{1}{N_{ys} \cdot N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_{ys}} h_{i,j}^y \right] \quad (A3)$$

em que

$$h_{i,j}^y = \begin{cases} 0 & \forall w: x_{s,i,j}^{y,w} \leq \theta_{rt,j} \\ 1 & otherwise \end{cases} \quad (A4)$$

onde $\mathbf{h}_{i,j}^y$ representa a adoção de medidas de restrição de consumo de água em uma semana de uma execução em particular, e 1 do contrário.

Valor presente líquido representa o valor presente líquido médio de todas as infraestruturas construídas ao longo de todas as execuções:

$$\min f_{VPL} = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{BM} \frac{PMT}{(1+d)^y} \quad (A5)$$

onde BM é o período de amortização, d é a taxa de desconto, y é o ano em que cada parcela do empréstimo PMT é liquidada (a partir da data de concessão do recurso), calculada na Equação A6:

$$PMT = \frac{P[BR(1+BR)^{BM}]}{[(1+BR)^{BM} - 1]} \quad (A6)$$

em que P é o valor do principal, BR é a taxa de juros e BM é o período de amortização.

A quarta FO, Custo Anual Médio, representa o custo anual esperado com a aplicação do portfólio em aplicação, especialmente relacionado aos custos com medidas de mitigação de secas (transferências de água e ações de restrição de consumo de água), fundos de contingência e pagamento de dívidas para instalação de infraestruturas:

$$\min f_{CF} = \max_j \left[\frac{1}{N_{ys} \cdot N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_{ys}} SYC_{i,j}^y \right] \quad (A7)$$

onde

$$SYC_{i,j}^y = \frac{\sum_{C \in C_j} PMT_{i,j,c} + IP_{i,j}^y + \theta_{acfc,j} \cdot ATR_{i,j}^y + (RL_{i,j}^y + TC_{i,j}^y - IC_{i,j}^y - CF_{i,j}^y, 0)}{ATR_{i,j}^y} \quad (A8)$$

em que $SYC_{i,j}^y$ corresponde ao custo anual com a operação de cada AS, $PMT_{i,j,c}$ representa o pagamento de dívidas contraídas para instalação de infraestruturas, $ATR_{i,j}^y$ consiste na receita

anual, $IP_{i,j}^y$ representa o custo anual com seguros contratados, $RL_{i,j}^y$ consiste nas perdas de receita devido à aplicação de medidas de restrição de uso da água, $TC_{i,j}^y$ corresponde aos custos anuais com transferências de água, $IC_{i,j}^y$ consiste no valor de cobertura dos seguros contratados, e $CF_{i,j}^y$ representa os custos com a manutenção de um fundo de contingência, instrumento para auxílio da sustentabilidade financeira do SAUA.

Por fim, a última FO, Custo do Pior Primeiro Percentil, quantifica a variabilidade do saldo líquido (receitas menos despesas) nas AS e o efeito dos instrumentos de mitigação de seca (no caso deste estudo, fundos de contingência) sob tal variação. Dessa forma, tem-se que:

$$\min f_{WCC} = \max_j \{ \text{quantil}_{i \in N_r} (SYC_{i,j}, 0.99) \} \quad (A9)$$

em que

$$SYC_{i,j}^y = \max \frac{RL_{i,j}^y + TC_{i,j}^y - \theta_{acfc,j} \cdot ATR_{i,j}^y - YIPO_{i,j}^y}{ATR_{i,j}^y}, 0 \quad (A10)$$

onde IP é o custo de manutenção do seguro contratado no ano y, e YIPO é o pagamento fornecido pelo seguro no ano y.

APÊNDICE B – BORG MOEA: ASPECTOS OPERACIONAIS IMPORTANTES

O processo de otimização multiobjetiva, etapa fundamental da aplicação da estrutura DU *Pathways* e executada por meio de *WaterPaths*, é viabilizada por meio da aplicação do algoritmo evolucionário multiobjetivo MS Borg MOEA (Hadka e Reed, 2013; Reed *et al.*, 2013). Sua lógica de funcionamento se apoia em alguns recursos estratégicos, a saber: a utilização de múltiplos operadores de seleção e recombinação autoadaptativos, cuja probabilidade de utilização aumenta conforme o sucesso daquele operador em gerar soluções não-dominadas; a relação de ϵ -dominância (Laumanns *et al.*, 2002), que define um nível de precisão mínimo para considerar a performance de uma solução distinta de outra, garantindo convergência e diversidade de soluções (Hadka e Reed, 2013); ϵ -progresso, mecanismo que reinicia o algoritmo em caso de estagnação na busca por soluções não-dominadas. O resultado da utilização dessas ferramentas é o desempenho superior a outros algoritmos MOEA para exploração e otimização de soluções em problemas complexos, não lineares e com espaços amostrais descontínuos (Reed *et al.*, 2013).

A Figura A1 apresenta a lógica de funcionamento de MS Borg MOEA.

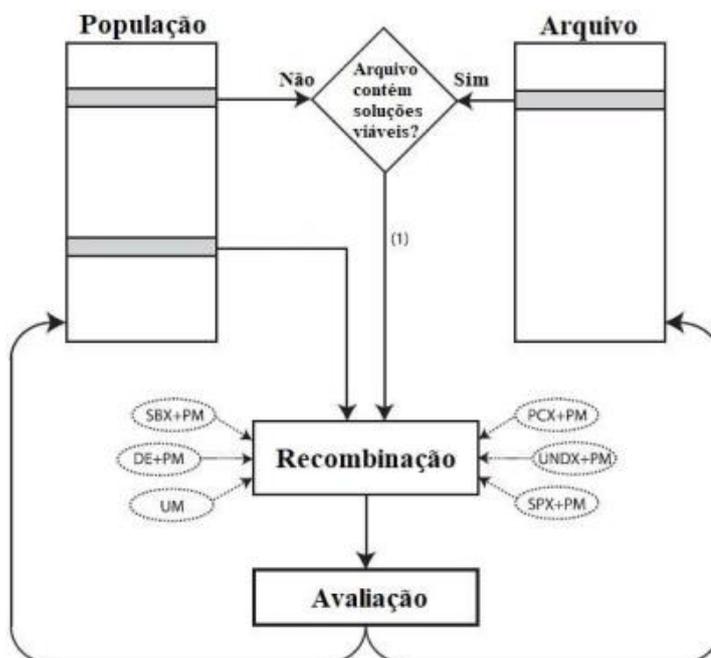


Figura A1 – Dinâmica de funcionamento do algoritmo MS Borg MOEA. Fonte: Giacomazzo (2020)

Inicialmente, um conjunto de soluções (População) é gerado de maneira aleatória (no caso, políticas de planejamento e gestão são geradas com diferentes tolerâncias a risco, e combinações distintas de medidas de mitigação de seca, transferências de água e infraestruturas). Em seguida, os operadores (elipses tracejadas) são selecionados com base em seus desempenhos anteriores de geração de soluções não-dominadas, para gerar “soluções-filho” a partir da recombinação de “soluções-pai” dos grupos “População” e “Arquivo”. As “soluções-filho” são avaliadas por um modelo (nesse caso, por *WaterPaths*) em soluções dominadas (voltam para o grupo “População”) ou não-dominadas (são direcionadas para o grupo “Arquivo”). Tudo isso representa um ciclo, que é repetido inúmeras vezes, considerando as ferramentas de ϵ -dominância, ϵ -progresso e recombinação autoadaptativa de operadores.

Por fim, a Tabela A1 apresenta os valores de ϵ -dominância adotados na operação de MS Borg MOEA neste trabalho.

Tabela A1 – Valores de ϵ -dominância utilizadas no processo de otimização multiobjetiva empregando MS Borg MOEA

Objetivo	ϵ-dominância
Confiabilidade	0,001
Frequência de restrição	0,005
Valor Presente Líquido	10.000.000,00
Custo Annual Médio	0,002
Custo do Pior Primeiro Percentil	0,005

Para assegurar a convergência das soluções não-dominadas, de modo que novas soluções geradas pelo otimizador não apresentem ganhos de desempenho se comparadas às soluções não-dominadas encontradas anteriormente, foram feitas cinco inicializações aleatórias da operação do algoritmo. A avaliação da efetividade dessa quantidade de inicializações foi realizada através da métrica de hipervolume relativo, tendo em vista que as soluções da frente aproximada de Pareto não são conhecidas (Zitzler et al., 2003). O hipervolume relativo compara a performance da frente de Pareto gerada em *checkpoints* específicos dentro de cada inicialização com a frente de Pareto “de referência”, que contem todas as soluções não dominadas de todas as inicializações. A Figura A2 apresenta a avaliação da performance de MS Borg MOEA relativo às cinco inicializações, em que se conclui que as soluções convergiram de forma satisfatória à frente de Pareto “de referência” quando essas atingem o

platô. Ainda que as frentes aproximadas de Pareto tenham variado entre as inicializações, o hipervolume em cada uma delas atingiu a estabilidade após 10.000 avaliações, sendo considerado satisfatório para essa pesquisa.

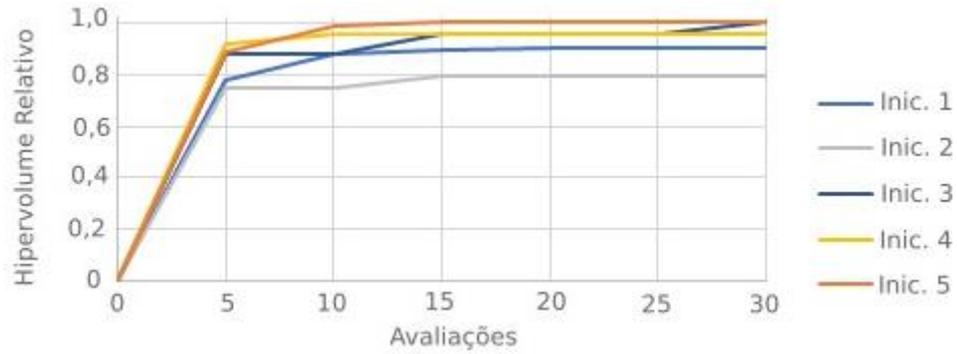


Figura A2 – Hipervolume relativo para as cinco inicializações de MS Borg MOEA

APÊNDICE C – IMPORTÂNCIA DE ATRIBUTOS NO MÉTODO GBT

Dentro do processo de Descobrimto de Cenários pelo método GBT, um dos principais resultados consiste na importância dos atributos (no caso, FIPs) para impurezas dos nós-folha. No presente contexto, o conceito de impureza está relacionado à eficiência de segregação de classes de um nó folha: caso todos os cenários da mesma classe estiverem dentro de um mesmo nó-folha, a impureza associada será zero. Assim, o cálculo de importância de atributos foi efetuado observando a queda na impureza em todos os nós-folha, isolando o efeito de cada segregação por FIP no desempenho de uma política. O resultado desse processo está apresentado na Tabela A2.

Tabela A2 – Ranque de importância de atributos para as políticas de alto investimento e investimento moderado em infraestrutura

Atributo	Importância de atributo para a política de alto investimento em infraestrutura	Importância de atributo para a política de investimento moderado em infraestrutura
Crescimento da demanda	0,432	0,527
Tempo de licenciamento de infraestruturas	0,001	0,000
Tempo de construção	0,002	0,000
Período de amortização	0,002	0,002
Taxa de juros	0,001	0,002
Fator de Desconto	0,001	0,002
Efetividade nas medidas de restrição de uso	0,561	0,467