



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO  
UNIDADE ACADÊMICA DE TECNOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE  
RECURSOS HÍDRICOS**

**JOSÉ GILDÉZIO DE SOUZA MAIA**

**ANÁLISE DE PERDAS DE ÁGUAS EM CANAIS:  
UM ESTUDO DE CASO DO CINTURÃO DAS ÁGUAS DO CEARÁ**

**SUMÉ - PB  
2024**

**JOSÉ GILDÉZIO DE SOUZA MAIA**

**ANÁLISE DE PERDAS DE ÁGUAS EM CANAIS:  
UM ESTUDO DE CASO DO CINTURÃO DAS ÁGUAS DO CEARÁ**

**Dissertação apresentada Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, no Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.**

**Área de Concentração: Regulação e Governança de Recursos Hídricos.**

**Linha de Pesquisa: Instrumentos das Políticas de Recursos Hídricos.**

**Orientador: Professor Dr. Camilo Allyson Simões de Farias.**

**SUMÉ - PB  
2024**



M217a Maia, José Gildézio de Souza.  
Análise de perdas de água em canais: um estudo de caso do cinturão das águas do Ceará. / José Gildézio de Souza Maia. - 2024.

74 f.

Orientador: Professor Dr. Camilo Allyson Simões de Farias.

Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - PROFÁGUA.

1. Perda de água - canais hidráulicos. 2. Cinturão das águas - Ceará. 3. Canais hidráulicos. 4. Drenagem subterrânea. 5. Perdas por infiltração. 6. Monitoramento de canais hidráulicos. 7. Transposição de águas. 8. Evaporação excedente. 9. Estudo de caso. I. Farias, Camilo Allyson Simões de. II. Título.

CDU: 628.1(043.2)

**Elaboração da Ficha Catalográfica:**

Johnny Rodrigues Barbosa  
Bibliotecário-Documentalista  
CRB-15/626

**JOSÉ GILDÉZIO DE SOUZA MAIA**

**ANÁLISE DE PERDAS DE ÁGUAS EM CANAIS:  
UM ESTUDO DE CASO DO CINTURÃO DAS ÁGUAS DO CEARÁ**

**Dissertação apresentada Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, no Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Professor Dr. Camilo Allyson Simões de Farias.  
Orientador – PROFÁGUA/CDSA/UFCG**

---

**Professor Dr. Cícero Fellipe Diniz de Santana.  
Examinador I – CCTA/UFCG**

---

**Professor Dr. Walker Gomes de Albuquerque.  
Examinador II – CCTA/UFCG**

**Trabalho aprovado em: 28 de fevereiro de 2024.**

**SUMÉ - PB**

## RESUMO

A água, recurso essencial, é tema constante tanto pelo seu valor intrínseco, quanto pelo seu potencial de desenvolvimento socioeconômico. Apesar de haver muita literatura sobre o assunto, faz-se necessário mais estudos de caso que possam diagnosticar problemas e seus agentes causadores de forma mais específica, tornando sua mitigação mais prática em pequenos e grandes empreendimentos. Objetivou-se com este estudo de caso a investigação da perda de água em canais abertos, estruturas amplamente utilizadas para transpor água de regiões mais abastadas para outras com déficits hídricos acentuados. A perda de água desse tipo de equipamento é o foco da pesquisa, visando elaborar um diagnóstico, identificando seus agentes causadores, os volumes perdidos e seus impactos, bem como propor medidas para redução das perdas. A pesquisa foi realizada no Lote 1 do projeto Cinturão das Águas do Ceará, em Jati-CE, Porteiras-CE e Brejo Santo-CE, por meio do levantamento de dados em campo e pesquisa documental e bibliográfica em instituições públicas e na literatura. Os volumes de água perdidos durante os três meses do estudo por evaporação e descargas dos drenos profundos foram considerados expressivos, 139.053,63 m<sup>3</sup> e 233.920,70 m<sup>3</sup>, respectivamente, volumes que poderiam abastecer pelo menos 27.249 pessoas no período. Além disso, foi possível identificar várias falhas estruturais e operacionais. Observou-se danos na seção hidráulica e nos diques, potenciais custos elevados com as perdas de água e transtornos nas áreas circunvizinhas. Espera-se que os resultados subsidiem propostas para manutenção corretiva e preventiva, capazes de sanar ou pelo menos mitigar os danos e impactos mais comuns.

**Palavras-chave:** Drenagem subterrânea; Perdas por infiltração; Monitoramento de canais; Transposição de águas; Evaporação excedente.

## ABSTRACT

Water, an essential resource, is a constant topic both due to its intrinsic value and its potential for socioeconomic development. Despite extensive literature on the subject, more case studies are needed to diagnose problems and their specific causes, making mitigation more practical for both small and large enterprises. This case study aims to investigate water loss in open channels, structures widely used to transport water from wealthier regions to those with significant water deficits. The focus is on diagnosing water loss in these systems, identifying causes, quantifying volumes lost and their impacts, and proposing measures to reduce these losses. The research was conducted in Lot 1 of the Cinturão das Águas do Ceará project, covering Jati-CE, Porteiras-CE, and Brejo Santo-CE, through field data collection, and documentary and bibliographic research in public institutions and literature. During the three-month study, water losses due to evaporation and deep drain discharges were significant, amounting to 139,053.63 m<sup>3</sup> and 233,920.70 m<sup>3</sup> respectively, enough to supply at least 27,249 people per day. Additionally, several structural and operational failures were identified, including damage to the hydraulic section and dikes, which lead to high costs and disturbances in the surrounding areas. The results are expected to support proposals for corrective and preventive maintenance, capable of addressing or at least mitigating the most common damages and impacts.

**Keywords:** Subsurface drainage; Infiltration losses; Channel monitoring; Water transfer; Excess evaporation.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 -</b>	Localização do CAC dentro do Nordeste setentrional.....	<b>28</b>
<b>Figura 2 -</b>	Localização do Cinturão das Águas do Ceará e PISF.....	<b>29</b>
<b>Figura 3 -</b>	Ficha de campo.....	<b>30</b>
<b>Figura 4 -</b>	Seção transversal do canal.....	<b>33</b>
<b>Figura 5 -</b>	Volume de perda por evaporação no período de março a maio de 2021.....	<b>38</b>
<b>Figura 6 -</b>	Volume de perda de água por descarga dos drenos profundos.	<b>42</b>
<b>Figura 7 -</b>	Seção transversal do canal – juntas de retração longitudinal.....	<b>43</b>
<b>Figura 8 -</b>	Áreas afetada por alagamentos causados por vazamentos.....	<b>49</b>
<b>Figura 9 -</b>	Perfil da captação, canais e sifão invertido.....	<b>50</b>
<b>Figura 10 -</b>	Seção transversal do canal – mista (corte e aterro).....	<b>52</b>
<b>Figura 11 -</b>	Seção transversal do canal – alagamento de áreas externas....	<b>55</b>
<b>Figura 12 -</b>	Demolição de placas na linha da junta longitudinal.....	<b>58</b>
<b>Figura 13 -</b>	Comporta de controle de vazão no emboque do sifão invertido.	<b>59</b>
<b>Figura 14 -</b>	Perfil hidrogeológico - Detecção de vazamentos.....	<b>60</b>

## LISTA DE FOTOS

<b>Foto 1</b> -	Medição do talude (borda livre) para cálculo do N.A. do canal.....	<b>32</b>
<b>Foto 2</b> -	Coleta de água em recipiente aferido para teste de vazão.....	<b>41</b>
<b>Foto 3</b> -	Água de vazamentos cruzando acessos às propriedades rurais....	<b>41</b>
<b>Foto 4</b> -	Saída de dreno ativa.....	<b>42</b>
<b>Foto 5</b> -	Fundo do canal fissurado.....	<b>45</b>
<b>Foto 6</b> -	Junta longitudinal trincada.....	<b>45</b>
<b>Foto 7</b> -	Recalque na berma do canal.....	<b>46</b>
<b>Foto 8</b> -	Escorregamento de solo na seção hidráulica do canal.....	<b>46</b>
<b>Foto 9</b> -	Talude do dique do canal saturado.....	<b>47</b>
<b>Foto 10</b> -	Escoamento de água no maciço (dique) do canal.....	<b>48</b>
<b>Foto 11</b> -	Geomembrana danificada.....	<b>53</b>
<b>Foto 12</b> -	Inspeção de dreno profundo (tubo corrugado perfurado).....	<b>54</b>
<b>Foto 13</b> -	Reparo com geomembrana nova.....	<b>56</b>
<b>Foto 14</b> -	Reparo do dique do canal – recalque e escorregamento.....	<b>56</b>
<b>Foto 15</b> -	Processo construtivo do rockfill em áreas de saturação e piping....	<b>57</b>
<b>Foto 16</b> -	Recomposição de revestimento em placas de concreto.....	<b>58</b>
<b>Foto 17</b> -	Inspeção geofísica dos canais para detecção de vazamentos.....	<b>60</b>



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Dados de extensão, nível médio de água, largura média e área do espelho d'água por canal do Lote1 do CAC.....	<b>37</b>
<b>Tabela 2</b> - Parâmetros da equação simplificada de Penman e taxa de evaporação.....	<b>38</b>
<b>Tabela 3</b> - Volume de perda mínima por evaporação.....	<b>39</b>
<b>Tabela 4</b> - Quantidade de drenos ativos por canal.....	<b>40</b>
<b>Tabela 5</b> - Taxas de vazamentos.....	<b>44</b>
<b>Tabela 6</b> - Quantidade de drenos profundos ativos de acordo com a geologia local.....	<b>51</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
2.1	GERAL.....	13
2.2	ESPECÍFICOS.....	13
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
4.1	ESCASSEZ DE ÁGUA: DESAFIOS E PERSPECTIVAS.....	16
4.2	GESTÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	16
4.3	REGULAMENTAÇÃO E POLÍTICA GOVERNAMENTAIS.....	17
4.4	TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO.....	19
4.4.1	<b>Viabilidade Técnica.....</b>	<b>19</b>
4.4.2	<b>Impactos Ambientais.....</b>	<b>20</b>
4.4.3	<b>Impactos Sociais.....</b>	<b>21</b>
4.4.4	<b>Custos Financeiros.....</b>	<b>22</b>
4.4.5	<b>Alternativas para Gestão Adequada dos Recursos Hídricos.....</b>	<b>23</b>
4.5	CINTURÃO DAS ÁGUAS.....	23
4.5.1	<b>Canais Hidráulicos.....</b>	<b>24</b>
4.5.2	<b>Manutenção e Conservação.....</b>	<b>25</b>
4.5.3	<b>Perdas de Água.....</b>	<b>26</b>
4.5.4	<b>Tecnologia e Automação.....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
5.1	ÁREA DE ESTUDO.....	28
5.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	29
5.2.1	<b>Pesquisa Documental e Bibliográfica.....</b>	<b>29</b>
5.2.2	<b>Coleta de Dados.....</b>	<b>30</b>
5.2.3	<b>Tratamento dos Dados.....</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>37</b>
6.1	DETERMINAÇÃO DOS VOLUMES DE PERDAS DE ÁGUA.....	37
6.1.1	<b>Perdas por evaporação.....</b>	<b>37</b>
6.1.2	<b>Perdas por vazamentos: Descargas dos Drenos Profundos.....</b>	<b>40</b>
6.2	PRINCIPAIS IMPACTOS.....	44
6.2.1	<b>Estruturais.....</b>	<b>44</b>
6.2.2	<b>Financeiros.....</b>	<b>48</b>
6.2.3	<b>Socioambientais.....</b>	<b>49</b>
6.2	PRINCIPAIS AGENTES CAUSADORES DAS PERDAS DE ÁGUA....	50
6.3.1	<b>Agente causador de evaporação excedente.....</b>	<b>50</b>
6.3.2	<b>Agentes causadores de perdas por vazamentos.....</b>	<b>50</b>
6.3.2.1	Tipo de Solo.....	50
6.3.2.2	Seção transversal do canal: Corte e aterro.....	52

6.3.2.3	Impermeabilização: geomembrana.....	52
6.3.2.4	Drenos profundos obstruídos.....	53
6.3.2.5	Lençol freático.....	54
6.4	MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO EFICIENTES.....	55
<b>6.4.1</b>	<b>Manutenção.....</b>	<b>55</b>
6.4.1.1	Impermeabilização.....	55
6.4.1.2	Recalque nas bermas.....	56
6.4.1.3	Saturação de diques e piping.....	56
6.4.1.4	Revestimento em concreto.....	57
<b>6.4.2</b>	<b>Operação.....</b>	<b>58</b>
<b>6.4.3</b>	<b>Monitoramento.....</b>	<b>59</b>
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
8	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS.....	67
	APÊNDICE.....	72

## 1 INTRODUÇÃO

A gestão sustentável dos recursos hídricos tornou-se uma preocupação global diante da crescente demanda por água potável e dos desafios associados à escassez de recursos hídricos. Este texto explora diversos aspectos relacionados à gestão hídrica e seus equipamentos.

Dentre os equipamentos em análise, destaca-se o Lote 01 do Cinturão das Águas do Ceará (CAC), um componente vital para a captação e distribuição de água na região. Este projeto abrange uma extensão considerável, indo desde a barragem de Jati-CE até o sítio Ipueiras em Brejo Santo-CE. Tal projeto é composto majoritariamente por canais abertos sujeitos à evaporação, patologias e falhas operacionais que causam perdas de água (Sohidra, 2020. p.3).

Por se tratar um projeto com canais interligados por tubulações (sifões invertidos) e desnível entre suas entradas e saídas, há comportas em quase todos os canais necessitando o controle do nível de cada um deles. A má operação pode deixar os níveis além do necessário para a vazão determinada, aumentando a área do espelho d'água e conseqüentemente a evaporação (Sohidra, 2020. p.4).

Também pode haver perdas por vazamentos identificados nas saídas dos drenos profundos com vazões variadas. Este tipo de perda está associado a patologias causadas por influência da geologia local, vícios construtivos e materiais inadequados utilizados na construção. Tais problemas não possuem soluções claras, demandando diagnóstico preciso e ações amplas e pontuais para sua mitigação (Luna, 2013. p. 120).

A construção de canais abertos como estes do CAC envolve diversos aspectos. Um ponto importante é o estudo do regime hidrológico da região, considerando fatores climáticos e variações sazonais na oferta de água. Essa análise deve abranger aspectos como intensidade das chuvas, evapotranspiração e infiltração do solo, conforme discutido por Chow et al. (1988, p. 158). A escolha do material para a construção desses equipamentos também é determinada pelas condições específicas do local, requisitos de engenharia e considerações econômicas, como observado por Novak et al. (2007. p. 26).

Quanto às perdas de água em canais revestidos em concreto, Castro Neto et al. (2020. p. 265-285) identificaram vazamentos, evaporação e infiltração como as

principais causas. O tipo de solo e o clima local são fatores que exercem influência sobre essas perdas, além da idade do revestimento e a qualidade do concreto utilizado na construção. Ainda nesta questão, Mendonça (1990. p. 247) realizou um estudo sobre o efeito do solo na deformação de canais, destacando a importância da interação fundação-estrutura neste tipo de obra de engenharia.

Estes estudos denotam a geologia local como um dos principais pontos a serem investigados, um norte para a pesquisa. Porém, o estudo deste caso buscará diagnosticar um cenário com causas e impactos locais, onde estes dados serão ímpares para a região e projetos em questão. Espera-se elucidar os agentes causadores e formular ações para mitigação dos problemas causados no CAC e para outros equipamentos semelhantes, por meio de ações práticas para construção, manutenção e operação de canais abertos.

A má operação dos canais pode causar perdas excessivas se seus níveis de água estiverem além do necessário para atender à vazão requerida naquele momento, sendo necessário avaliar se esta suposição ocorre neste projeto. Quanto às perdas por vazamentos, é possível inferir que a impermeabilização devido à movimentação de massa, material impermeabilizante inadequado para o local e/ou falha no processo construtivo.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GERAL

Analisar as principais causas e propor soluções para reduzir as perdas de água em canais no contexto do Cinturão das Águas do Ceará.

### 2.2 ESPECÍFICOS

- a) Mensurar as perdas de água em canais do Cinturão das Águas do Ceará - Lote 1;
- b) Avaliar os impactos das perdas de água na eficiência dos canais do Cinturão das Águas do Ceará - Lote 1;
- c) Identificar os principais fatores que contribuem para as perdas de água em canais;
- d) Propor medidas e estratégias para reduzir as perdas de água nos canais, considerando aspectos técnicos, operacionais e de gestão.

### 3 JUSTIFICATIVA

A gestão sustentável dos recursos hídricos é uma questão premente em escala global, sendo impulsionada pela crescente demanda por água potável e os desafios decorrentes da escassez de recursos hídricos. Este cenário adquire contornos ainda mais críticos em regiões áridas e semiáridas, como o Cariri cearense, onde a disponibilidade de água é um fator determinante para a qualidade de vida e o desenvolvimento socioeconômico.

A relevância deste estudo se sustenta em diversos aspectos que abrangem desde a escassez hídrica até as implicações socioambientais decorrentes da gestão inadequada dos recursos hídricos. Dados os fatores climáticos e ambientais, a redução de perdas torna-se crucial e para isto o entendimento desses desvios é a base para encontrar ações para estancar ou pelo menos reduzir esses impactos.

O estudo pode trazer subsídios para a viabilidade desses projetos, reduzindo os prejuízos financeiros decorrentes de retrabalho, operação ineficiente e indenizações a terceiros afetados pelas falhas de planejamento. Os impactos ambientais são comuns em grandes projetos, porém suas falhas podem impactar além do previsto nos estudos preliminares como o Relatório de Impacto do Meio Ambiente – RIMA. Tais desvios podem causar danos à fauna e à flora, além de prejudicar as rotinas das comunidades circunvizinhas.

O diagnóstico do problema ajudará na escolha de soluções paliativas e/ou definitivas para o local em questão e para os próximos projetos do tipo, evitando acúmulo de erros desde a concepção do projeto até a sua operação. Este estudo é necessário para subsidiar outros projetos a fim de evitar os erros e replicar os acertos, servindo como um manual de "lições aprendidas".

Danos graves às áreas adjacentes também podem ocorrer caso estas falhas evoluam para um colapso na estrutura, causando inundações e movimentação de massas (solo, rochas e materiais do próprio canal). A identificação e mitigação desses desvios são essenciais para segurança da área do projeto como um todo.

A aplicação de tecnologias inovadoras e a implementação de políticas públicas embasadas nos resultados desta pesquisa emergem como fatores essenciais para enfrentar os desafios apresentados, garantindo a sustentabilidade no acesso à água potável na região e servindo como referência para outras áreas que enfrentam dilemas

semelhantes. Este trabalho de mestrado contribuirá significativamente para o avanço do conhecimento e para a formulação de estratégias práticas e eficazes na gestão dos recursos hídricos em contextos semelhantes.



## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 ESCASSEZ DE ÁGUA: DESAFIOS E PERSPECTIVAS

A demanda global por água potável tem aumentado significativamente nas últimas décadas, sendo que aproximadamente 20% da população mundial reside em áreas com escassez hídrica (Wada et al., 2021. p. 103-133). Diante desse cenário, é fundamental implementar estratégias que visem reduzir o uso de água em setores como agricultura e indústria, ao mesmo tempo em que se aprimora a eficiência do uso dos recursos hídricos e se investe em tecnologias de dessalinização.

Essa necessidade de conservação e uso eficiente da água é agravada pela relação estreita entre escassez hídrica e mudança climática, como discutido por Hoekstra et al. (2019). Os autores destacam a mudança climática como uma das principais causas da escassez de água em muitas regiões, sublinhando a importância de adotar medidas de adaptação para garantir a disponibilidade de água no futuro.

No contexto da gestão dos recursos hídricos, Gleeson et al. (2020. p. 605-612) exploraram os desafios e oportunidades associados à administração dos aquíferos, fundamentais como fontes de água doce em todo o mundo. Eles enfatizam a necessidade de desenvolver estratégias de gestão sustentável desses reservatórios subterrâneos, considerando os impactos da mudança climática e da crescente demanda por água.

Além disso, a escassez de água tem implicações diretas na saúde humana, como evidenciado por Jankowski et al. (2020. p. 185-186) em um estudo mais específico. Os autores analisaram os impactos da falta de acesso à água potável na saúde, ressaltando a importância de políticas públicas que garantam o acesso universal à água como uma questão central para a promoção da saúde pública.

### 4.2 GESTÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

A gestão de bacias hidrográficas é um processo complexo que requer a coordenação de múltiplos atores e interessados para proteger, usar e conservar os recursos hídricos em uma determinada região (Porto e Porto. 2008, p. 51). Essa colaboração é crucial para a implementação de políticas públicas e ações práticas que garantam a sustentabilidade dos recursos hídricos.

Estudos têm destacado a importância da participação da sociedade civil no gerenciamento de recursos hídricos, enfatizando a inclusão das comunidades locais nas decisões sobre o uso da água (Porto e Porto. 2008, p. 44). Além disso, a integração entre políticas públicas em diferentes níveis governamentais é essencial para a eficácia da gestão de bacias hidrográficas.

Para garantir a eficácia da gestão de bacias hidrográficas, é fundamental implementar sistemas eficientes de monitoramento e avaliação (Lima et al., 2019, p. 57). O acompanhamento regular da qualidade e quantidade da água é essencial para identificar problemas emergentes e embasar decisões informadas. Essa prática de monitoramento contínuo é crucial para promover a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Estudos específicos, como o conduzido por Silva et al. (2020) na região do semiárido brasileiro, ressaltam a importância da gestão integrada e participativa das bacias hidrográficas. Essa abordagem destaca o envolvimento ativo dos usuários e gestores em todas as etapas do processo de gestão como um elemento fundamental para o sucesso da gestão dos recursos hídricos na região do semiárido.

A disponibilidade de água é um fator determinante na gestão dos recursos hídricos, influenciada por diversos fatores, como precipitação, evapotranspiração, topografia e características hidrogeológicas (Asano et al., 2020). No entanto, a mudança climática está impactando a disponibilidade de água em muitas partes do mundo, aumentando a frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como secas e inundações (IPCC, 2018). Esses eventos climáticos extremos podem aumentar a incerteza e insegurança no abastecimento de água potável, destacando a importância de políticas e estratégias de adaptação (Wada et al., 2018. p. 103-133).

Em suma, a gestão eficaz da disponibilidade de água requer uma abordagem holística que considere os aspectos sociais, econômicos e ambientais da gestão dos recursos hídricos (Allan et al., 2018). Isso exige a colaboração de diversos atores, incluindo governos, empresas, organizações não governamentais e comunidades locais, para enfrentar os desafios complexos associados à gestão da água.

#### 4.3 REGULAMENTAÇÃO E POLÍTICA GOVERNAMENTAIS

A regulamentação e as políticas governamentais são fundamentais para garantir o uso eficiente e sustentável da água, bem como para prevenir conflitos entre

diferentes usuários e partes interessadas. Dentre os principais autores que têm publicado trabalhos relevantes sobre o tema, destacam-se Dietz (2017. p. 191-201), que abordam o papel das políticas públicas na gestão de recursos hídricos e a importância da participação das partes interessadas na tomada de decisões.

De acordo com Dietz (2017. p. 191-201), a implementação bem-sucedida de políticas de gestão de recursos hídricos requer uma abordagem colaborativa que envolva a participação de diferentes grupos de interesse, incluindo governos, organizações não governamentais e comunidades locais. Dietz et al. (2017. p. 191-201), por sua vez, destacam a importância da transparência e do diálogo para a implementação efetiva de políticas públicas de gestão de recursos hídricos.

Além disso, os autores têm enfatizado a importância de políticas e regulamentações que promovam a sustentabilidade ambiental e social. Segundo Casarejos e Meira (2020. p. 899-918), políticas públicas de gestão de recursos hídricos devem abordar questões relacionadas à equidade, justiça social e proteção do meio ambiente. Isso inclui o estabelecimento de limites para a extração de água, a promoção de práticas agrícolas sustentáveis e a proteção de áreas de recarga hídrica.

Um estudo de Hanak et al. (2020. p. 4-19) destaca a importância de políticas públicas que incentivem o uso eficiente da água em setores como agricultura, indústria e uso urbano. Os autores destacam que, além de incentivos financeiros, é importante que as políticas também levem em conta aspectos sociais e ambientais, de forma a garantir um uso sustentável da água.

No que diz respeito à gestão de recursos hídricos, um estudo de Pereira et al. (2020. p. 1-13) destaca a importância da participação da sociedade civil na definição de políticas públicas relacionadas à água. Os autores defendem que a participação ativa dos cidadãos pode levar a uma gestão mais transparente e democrática, além de aumentar a eficácia das políticas.

Em relação à prevenção de conflitos pelo uso da água, um estudo de Garcia et al. (2021. p. 384-402) destaca a importância da regulação dos usos da água em bacias hidrográficas compartilhadas por diferentes países. Os autores defendem que, além de estabelecer limites para o uso da água, é importante que as políticas também incentivem a cooperação e a negociação entre as partes interessadas, de forma a prevenir conflitos.

Portanto, é importante destacar que as políticas e regulamentações devem ser adaptadas às condições locais e considerar as necessidades e interesses das

comunidades locais. De acordo com Guimarães et al. (2019), políticas públicas de gestão de recursos hídricos devem ser baseadas em uma abordagem descentralizada, que envolva a participação ativa das comunidades locais na tomada de decisões.

#### 4.4 TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO

O Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), também conhecido como Transposição do Rio São Francisco, é uma obra de infraestrutura hídrica que visa garantir a oferta de água para o abastecimento humano e a irrigação em regiões do Nordeste brasileiro afetadas pela escassez hídrica. Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional, o projeto consiste na construção de "canais, aquedutos, túneis e estações de bombeamento para desviar parte das águas do rio São Francisco para as bacias hidrográficas dos rios Jaguaribe (no Ceará) e Piranhas-Açu (na Paraíba e no Rio Grande do Norte)" (Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022).

O objetivo principal é garantir o abastecimento de água para cerca de 12 milhões de pessoas em 390 municípios nos estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte, além de viabilizar a irrigação de terras para a agricultura familiar e o desenvolvimento de atividades econômicas nas regiões beneficiadas. De acordo com a Agência Nacional de Águas, o projeto busca "mitigar os efeitos da seca e promover o desenvolvimento regional" (Agência Nacional de Águas, 2022).

O projeto tem enfrentado diversos desafios, incluindo questões ambientais, sociais e de viabilidade técnica e financeira. Críticos do projeto levantam preocupações sobre o impacto ambiental da transposição, como o deslocamento de comunidades tradicionais, a alteração do ecossistema local e a possibilidade de escassez hídrica em outras áreas.

##### 4.4.1 Viabilidade Técnica

A transposição do Rio São Francisco é um assunto que tem sido amplamente discutido nos últimos anos. Um dos trabalhos mais citados sobre o assunto é o artigo de Almeida et al. (2019, p. 1-12), que avaliou a viabilidade técnica do projeto de transposição do Rio São Francisco a partir de análises hidrológicas e hidráulicas. Os autores concluíram que a transposição é tecnicamente viável, mas destacaram a

importância de estudos mais detalhados sobre os impactos ambientais e sociais do projeto.

Já o estudo de Costa et al. (2020 p. 457-466) avaliou a eficiência dos canais de transposição do Rio São Francisco em relação à perda de água por evaporação e infiltração. Os autores concluíram que os canais são eficientes na redução dessas perdas, mas destacaram a importância de um gerenciamento adequado da água para garantir a sustentabilidade do projeto.

Por outro lado, o trabalho de Souza et al. (2020. p. 115-133) questionou a viabilidade técnica da transposição do Rio São Francisco a partir da análise dos custos e benefícios do projeto. Os autores argumentaram que o projeto é economicamente inviável e que existem alternativas mais sustentáveis para garantir o abastecimento de água na região.

#### **4.4.2 Impactos Ambientais**

Medeiros et al. (2019. p. 1-14) avaliaram os impactos ambientais da transposição do Rio São Francisco em relação aos ecossistemas aquáticos e à biodiversidade. Os autores destacaram a importância de medidas mitigatórias para reduzir os impactos, como a criação de áreas de proteção e a recomposição da vegetação nativa. Além disso, enfatizaram a necessidade de um monitoramento contínuo dos impactos ambientais.

Ainda nesta linha, França et al. (2020. p. 1-12) avaliaram os impactos do PISF na qualidade da água e nos ecossistemas aquáticos. Os autores destacaram a importância de medidas de controle da poluição e da preservação da biodiversidade para garantir a sustentabilidade do projeto.

Já Ribeiro et al. (2021. p. 1-11) avaliaram os impactos da transposição do Rio São Francisco em relação à segurança hídrica e à conservação dos ecossistemas, destacaram a importância de uma gestão integrada da água para garantir a sustentabilidade do projeto e a conservação dos recursos naturais.

Enquanto Macedo et al. (2021. p. 499-505) tratam de questões estruturais ressaltando a necessidade de uma gestão ambiental adequada dos canais hidráulicos, que inclui medidas como o controle da erosão e assoreamento, a conservação das margens dos canais e a manutenção da qualidade da água. Essas

práticas, segundo os autores, são essenciais para a preservação da biodiversidade e para manter os serviços ecossistêmicos ligados à água.

Ainda nas questões estruturais, os autores ressaltam que estes projetos podem incluir a recuperação de áreas degradadas, a proteção de habitats naturais e a melhoria da qualidade da água, o que é crucial para a conservação da biodiversidade e para a sustentabilidade dos ecossistemas. Oku et al. (2020) salientam a necessidade de implementar projetos de restauração ecológica para atenuar os impactos ambientais provocados por canais hidráulicos.

Além disso, a tecnologia também pode ser utilizada para minimizar os impactos ambientais causados pelos canais hidráulicos. De acordo com Mekonnen et al. (2021), a aplicação de técnicas de monitoramento remoto e de modelagem hidrológica pode contribuir para a gestão eficiente dos recursos hídricos, permitindo a identificação e a mitigação de impactos ambientais causados pelos canais.

#### **4.4.3 Impactos Sociais**

A transposição do Rio São Francisco é um empreendimento que tem despertado considerável interesse e gerado debates intensos não apenas pelos seus impactos ambientais, mas também pelos efeitos sociais nas comunidades locais. Diversos estudos têm sido conduzidos para avaliar esses impactos e os desafios associados ao desenvolvimento regional (Costa et al., 2019. p. 1-19).

Costa et al. (2019. p. 1-19) investigaram os impactos sociais da transposição do Rio São Francisco nas comunidades indígenas. Os resultados indicaram que as comunidades indígenas enfrentam desafios significativos, como a perda de território e recursos naturais, além de mudanças nos padrões de vida e cultura devido à intervenção no ambiente.

Já Almeida et al. (2020. p. 1-19) examinaram os impactos socioeconômicos da transposição do Rio São Francisco para as comunidades quilombolas e ribeirinhas. O estudo destacou a vulnerabilidade dessas comunidades diante das transformações causadas pelo empreendimento, incluindo questões relacionadas à segurança alimentar, acesso à água e perda de meios de subsistência tradicionais.

Por sua vez, Oliveira et al. (2021. p. 1-19) abordaram os impactos e desafios da transposição do Rio São Francisco para o desenvolvimento regional. O estudo

revelou que, apesar das expectativas de promover o desenvolvimento econômico e social, a transposição enfrenta desafios significativos, como a falta de infraestrutura adequada para aproveitar plenamente os recursos hídricos disponíveis e a necessidade de políticas públicas mais eficazes para mitigar os impactos sociais e ambientais negativos.

Esses estudos ressaltam a importância de uma abordagem integrada e participativa na gestão de projetos de grande escala como a transposição do Rio São Francisco, levando em consideração os aspectos sociais, econômicos e ambientais para garantir um desenvolvimento sustentável e equitativo para todas as comunidades envolvidas (Oliveira et al., 2021. p. 1-19).

#### **4.4.4 Custos Financeiros**

O Projeto de Integração do Rio São Francisco com as bacias do Nordeste Setentrional (PISF) é um importante projeto para o nordeste brasileiro, porém suscita avaliações sobre seu custo-benefício, pois em obras a 12 anos os 477 quilômetros previstos ainda não estão concluídos e custarão aproximadamente R\$ 1,4 bilhão (Brasil, 2019).

As tarifas cobradas dos estados beneficiados correspondem ao uso da água e à manutenção das estruturas do projeto, respaldadas pela Lei 9.433/1997, que estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 2023).

Os estudos para definir as tarifas são conduzidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), e para 2024, a tarifa do PISF foi estabelecida em R\$ 0,322 por metro cúbico para a disponibilidade da água e R\$ 0,204 por metro cúbico para o consumo. Essa última é cobrada de acordo com o volume de água fornecido, visando cobrir os custos variáveis, como energia elétrica para o bombeamento. Já a tarifa de disponibilidade cobre os custos fixos de operação e manutenção, como infraestrutura e energia elétrica, independentemente do bombeamento (Brasil, 2023).

É importante ressaltar que o contrato em discussão entre a União e os estados beneficiados prevê benefícios que reduzem as tarifas nos primeiros cinco anos de operação comercial do projeto, proporcionando alívio financeiro aos beneficiários durante esse período (Brasil, 2023).

#### 4.4.5 Alternativas para Gestão Adequada dos Recursos Hídricos

De acordo com Câmara (2019. p. 16-34), a gestão integrada dos recursos hídricos é uma alternativa à transposição do Rio São Francisco, que busca conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental. A autora defende a implementação de políticas públicas que promovam o uso racional da água e a proteção dos ecossistemas aquáticos da região.

Já Feitosa et al. (2019. p. 43-55) propõem a utilização de tecnologias inovadoras para o aproveitamento de águas subterrâneas na região semiárida, como a dessalinização da água do mar e a recuperação de águas residuais. Segundo os autores, essas tecnologias podem ser mais eficientes e sustentáveis do que a transposição de bacias.

Outra alternativa apontada por Alves et al. (2020. p. 111-124) é a melhoria da infraestrutura hídrica local, incluindo a construção de barragens e açudes, a recuperação de nascentes e a implantação de sistemas de irrigação mais eficientes. Os autores argumentam que essas medidas podem aumentar a disponibilidade de água na região e reduzir a dependência da transposição.

Os autores apresentam alternativas ao PISF, enfatizando a importância da gestão integrada dos recursos hídricos destacando a implementação de políticas públicas voltadas para o uso racional da água e a proteção dos ecossistemas aquáticos, uso de tecnologias inovadoras e melhorias na infraestrutura hídrica local.

#### 4.5 CINTURÃO DAS ÁGUAS

Complexo de Aproveitamento dos Canais do Ceará (CAC), um projeto governamental estadual, foi inicialmente proposto pela Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará em 2009 (BRITO, 2015. p. 94). A construção começou em 2013 com um orçamento total previsto de aproximadamente R\$ 9 bilhões, uma combinação de fundos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) e do orçamento estadual (BRITO, 2015. p. 81).

Este ambicioso projeto prevê a construção de três segmentos principais e seis ramais secundários, totalizando cerca de 1.338,65 km de canais de concreto, túneis e sifões. Com um prazo estimado de dez anos para sua conclusão, o objetivo do CAC



é interligar todas as bacias hidrográficas do Ceará, o que beneficiaria 93% do território estadual com fornecimento de água (BRITO, 2015. p. 94).

O Complexo de Aproveitamento dos Canais do Ceará (CAC), o projeto é parte integrante do maior Projeto de Transposição das Águas do Rio São Francisco. O CAC tem como objetivo principal a utilização sustentável e integrada dos recursos hídricos, promovendo a segurança hídrica tanto para as populações quanto para as atividades econômicas da região. A implementação do CAC é focada em garantir um abastecimento de água eficiente e contínuo, contribuindo significativamente para o desenvolvimento sustentável e a estabilidade hídrica do estado do Ceará por meio de um sistema adutor composto por canais e sifões (Ceará, 2010).

#### **4.5.1 Canais Hidráulicos**

As análises hidráulicas em canais abertos envolvem principalmente a determinação de parâmetros hidráulicos, como a vazão esperada e as velocidades máximas de escoamento da água. Geralmente, no dimensionamento hidráulico de canais abertos, é utilizado o regime permanente e uniforme, o que significa que as características hidráulicas do canal, como o perímetro molhado, a profundidade da água e o raio hidráulico, permanecem constantes ao longo do tempo e em diferentes trechos do canal (LUNA, 2013. p. 120).

Outro aspecto importante no dimensionamento de canais hidráulicos é o estudo do regime hidrológico da região, que deve levar em conta as características climáticas e as variações sazonais da oferta de água, é fundamental realizar uma análise detalhada do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica em que o canal será construído, considerando aspectos como a intensidade das chuvas, a evapotranspiração e a infiltração do solo (Chow et al., 1988. p. 158).

A construção de canais abertos é uma prática essencial para direcionar o fluxo de água de forma controlada e há uma variedade de materiais que podem ser empregados nesse processo, cada um com suas características e eficiências específicas. Segundo Chow (1988, p. 157), o concreto armado é amplamente utilizado na construção de canais devido à sua durabilidade e resistência. O concreto armado oferece excelente resistência à abrasão e ao desgaste causado pela água em movimento, sendo ideal para canais sujeitos a altas velocidades de fluxo.

De acordo com Novak et al. (2007. p. 108), os geossintéticos, como geomembranas e geotêxteis, são materiais sintéticos projetados para diversas aplicações geotécnicas, incluindo a construção de canais. Eles oferecem vantagens como leveza, flexibilidade e resistência à corrosão. Além disso, os geossintéticos podem ser instalados rapidamente e são adequados para locais onde a escavação e o transporte de materiais são difíceis.

A escolha do material para a construção de canais abertos depende das condições específicas do local, dos requisitos de engenharia e das considerações econômicas. Cada material possui suas vantagens e desvantagens, e a seleção adequada é crucial para garantir a eficiência e a longevidade da estrutura (Novak et al. 2007. p. 26).

#### **4.5.2 Manutenção e Conservação**

De acordo com Balcik et al. (2020. p. 158), a manutenção e conservação de canais hidráulicos deve ser vista como um investimento a longo prazo, capaz de prolongar a vida útil dos canais e evitar interrupções no fornecimento de água. O estudo aponta que a remoção de sedimentos e obstruções é uma das principais atividades de manutenção, sendo essencial para garantir a capacidade de escoamento dos canais. Além disso, a inspeção regular das estruturas e a reparação de danos também são importantes para prevenir problemas mais graves (BALCIK et al., 2020. p. 158).

Já o estudo de Chen et al. (2020) destaca a importância da tecnologia para a manutenção e conservação de canais hidráulicos. Os autores propõem a utilização de drones equipados com câmeras e sensores para realizar inspeções e detectar problemas em canais de difícil acesso. Além disso, eles defendem a utilização de tecnologias de inteligência artificial para auxiliar na tomada de decisões de manutenção e prever a ocorrência de danos.

No estudo de Li et al. (2018. p. 51-56) destaca a importância da cooperação entre diferentes partes interessadas na manutenção e conservação de canais hidráulicos. Os autores defendem a criação de parcerias entre governos, empresas e comunidades locais para garantir a efetividade das atividades de manutenção e a utilização adequada dos recursos disponíveis.

### 4.5.3 Perdas de Água

De acordo com o estudo de Castro Neto et al. (2020. p. 265-285), as principais causas de perdas de água em canais revestidos em concreto são vazamentos, evaporação e infiltração. Os autores ressaltam que o tipo de solo e o clima da região também podem influenciar a quantidade de perdas de água. Além disso, a idade do revestimento e a qualidade do concreto utilizado na construção do canal podem afetar a sua eficiência.

Segundo o estudo de Souza et al. (2020. p. 67-80), outro fator que contribui para as perdas de água em canais revestidos em concreto é a presença de obstruções, como sedimentos e vegetação. De acordo com os autores a obstrução do canal pode reduzir a sua capacidade de escoamento e aumentar as perdas de água por evaporação. Os autores destacam a importância da manutenção preventiva para evitar a obstrução do canal.

Em um estudo publicado na revista "Irrigation and Drainage Systems Engineering", os autores Abdellah e coautores (2019. p. 1-11) analisaram o comportamento de canais de irrigação revestidos em concreto em solo argiloso. Os resultados indicaram que o recalque foi influenciado principalmente pela carga aplicada na superfície do canal e pela espessura do revestimento de concreto. Os autores sugerem a aplicação de técnicas de compactação do solo e a utilização de concreto com alta resistência à compressão como medidas preventivas.

Ainda sobre danos e perdas por recalque, o trabalho de Mendonça (1990. p. 248) demonstrou que a remoção e substituição do solo colapsível elimina os efeitos de deformação indesejados e que o desconhecimento ou negligência sobre a presença de solo colapsíveis podem aumentar consideravelmente os custos previstos para a execução da obra de engenharia.

Já o estudo de Marzouk e Ghazala (2017) avaliou o comportamento de canais revestidos em concreto em diferentes tipos de solo. Os resultados indicaram que solos com alta compressibilidade, como argila mole e argila siltosa, são mais propensos a causar deformações no canal.

Os estudos revisados abordam as causas e impactos das perdas de água em canais revestidos em concreto, destacando vazamentos, evaporação, infiltração e condições do solo e clima como fatores determinantes e obstruções, como sedimentos e vegetação, como fatores adicionais que contribuem para perdas. Também tratam da

relação entre o solo e a deformação dos canais. Esses estudos fornecem insights valiosos para a prevenção e mitigação das perdas de água em sistemas de irrigação.

#### **4.5.4 Tecnologia e Automação**

De acordo com Buijs et al. (2021. p. 1-28), a utilização de sensores IoT (Internet das Coisas) em canais hidráulicos permite a coleta de dados precisos e em tempo real, possibilitando a tomada de decisões mais rápidas e efetivas na gestão dos recursos hídricos. Além disso, a automação de comportas e válvulas pode ser realizada através de sistemas de controle integrados, como os sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), que permitem o controle remoto de estruturas em tempo real (SÁNCHEZ-CARRACEDO et al., 2018. p. 27-44).

A tecnologia também pode ser utilizada para a modelagem hidrológica e a previsão de eventos extremos, como inundações e secas. De acordo com Zhang et al. (2020), a utilização de modelos hidrológicos combinados com sistemas de informação geográfica (GIS) e técnicas de aprendizado de máquina (Machine Learning) pode melhorar significativamente a precisão das previsões hidrológicas.

No entanto, é importante lembrar que a adoção de tecnologia e automação na gestão de canais hidráulicos deve ser acompanhada de uma capacitação adequada dos profissionais envolvidos, além de políticas públicas que incentivem a sua utilização de forma sustentável e responsável (RAHMAN et al., 2020. p. 1-17).

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo de caso foi realizado no Lote 01 do projeto Cinturão das Águas do Ceará (CAC). Tal equipamento tem início na barragem de Jati-CE, onde capta as águas do Eixo Norte do Projeto de Integração do Rio São Francisco – PISF e percorre 38,75 km até o sítio Ipueiras, em Brejo Santo-CE. O projeto está localizado no cariri cearense, região central do Nordeste setentrional (Figura 1).

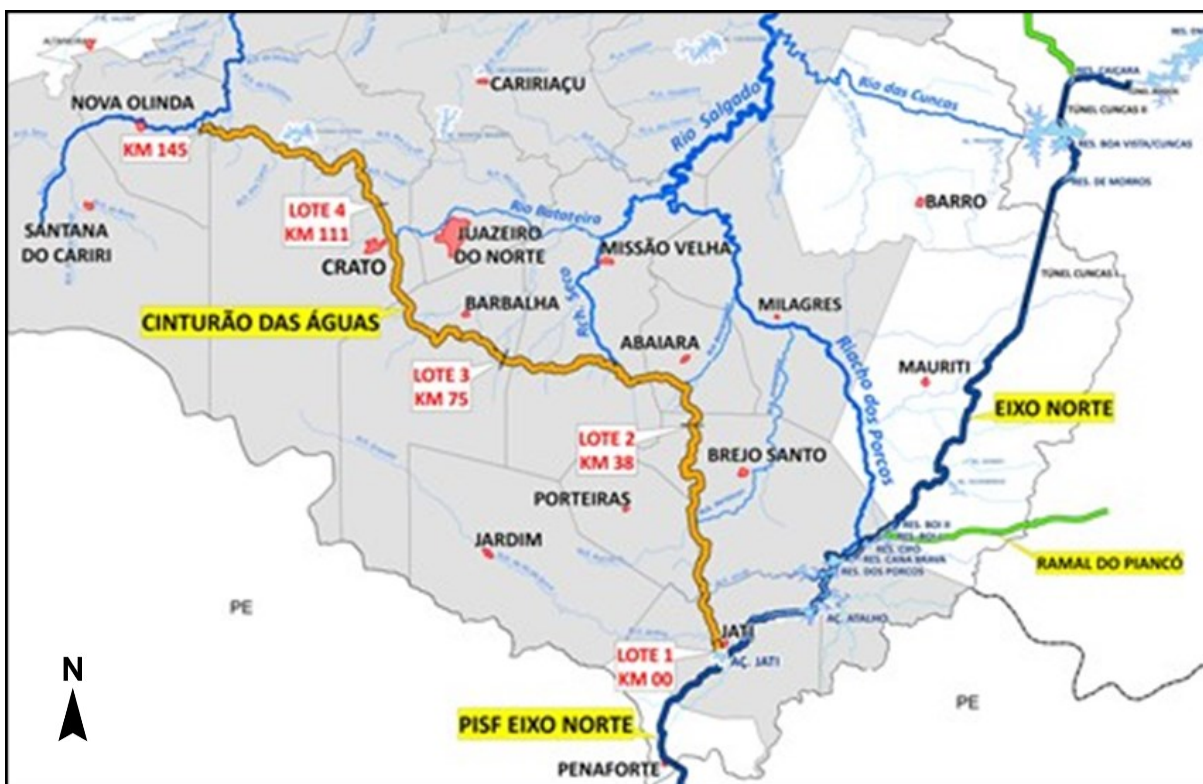
**Figura 1** - Localização do CAC dentro do Nordeste setentrional.



Fonte: Adaptado do blog prof. Dantas (2024).

O Lote 01 é composto por captação, canais abertos, sifões e obras de controle. Segundo a SOHIDRA (2020. p. 4), o Lote 1 (Figura 2) é parte dos cinco lotes que formam o Trecho 1 do CAC (Jati-CE a Nova Olinda-CE), esse com extensão total de 149 km e com fluxo total por gravidade.

**Figura 2** - Localização do Cinturão das Águas do Ceará e PISF.



Fonte: SRH (2022).

A maior parte da extensão do Lote 1 é constituída por canais abertos (33,6 km) revestidos em concreto não estrutural, impermeabilizados com geomembrana e construídos sobre cortes (escavações) em terreno natural e/ou aterros compactados (Sohidra, 2020, p. 4).

O Lote 1 do CAC é composto por dez canais, com extensões e quantidade de saídas de dreno distintas (Tabela 1). As leituras foram realizadas apenas nos locais de saídas de drenos ativos (com vazão), no período estudado.

## 5.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 5.2.1 Pesquisa Documental e Bibliográfica

Foram utilizados relatórios oficiais de instituições governamentais disponíveis online, artigos de periódicos científicos, livros, manuais, desenhos e projetos relativos ao canal hidráulico objeto deste estudo

### 5.2.2 Coleta de Dados

A pesquisa de campo foi quantitativa e qualitativa, a fim de obter informações suficientes para ilustrar um diagnóstico representativo e embasar a análise do estudo de caso. Os dados quantitativos foram obtidos *in loco* por meio de coleta de dados em campo e na literatura especializada sobre o tema.

A pesquisa de campo se refere à mensuração de dados reais do estudo de caso por meio do preenchimento de fichas de campo (Figura 3). Foram levantados os seguintes dados: níveis de água nos canais, vazões dos drenos profundos e coloração da água descarregada pelos drenos.

**Figura 3 - Ficha de campo**

MONITORAMENTO DE SAÍDA DE DRENO									
SAÍDA DE DRENO   SD					DN				
CANAL:			LADO:		TALUDE TOTAL:				
LEITURA									
DATA	HORA	VOLUME DO RECIPIENTE (l)	TEMPO			TALUDE LIVRE (m)	N.A. DO CANAL (m)	COR DA ÁGUA	OBSERVAÇÃO
			(hora)	(minuto)	(segundo)				

Fonte: Autoria Própria (2024).

Os níveis de água (N.A.) dos canais foram obtidos por meio da medida da borda livre do canal, ou seja, medição da crista do canal até o nível da água. Com essa leitura e informações conhecidas da seção hidráulica do canal, se fez um cálculo através de semelhança de triângulos para obter o N.A. e a largura do espelho d'água. Tal procedimento é necessário já que a leitura de dentro do canal seria inviável, pois se trata de um equipamento composto com taludes íngremes, escorregadios e com água em seu interior. Entrar no canal traria altos riscos de acidentes.

As vazões dos drenos profundos foram coletadas utilizando-se recipiente com seu volume aferido em laboratório e cronômetro para leitura do tempo em que o recipiente era completamente cheio pela descarga de água do dreno. Tal procedimento foi realizado três vezes, sendo anotada na ficha de campo a média dos valores encontrados.

A coloração de água foi verificada visualmente pelo pesquisador e anotada na ficha de campo, observando-se cor e grau de turbidez, variando do cristalino ao turvo. Essa informação é importante para verificação de possível carreamento de material do maciço do canal pelo dreno profundo.

A perda por evaporação foi calculada utilizando-se os dados referenciais de evaporação do posto meteorológico mais próximo do local da pesquisa e as áreas dos espelhos d'água dos canais. Os dados de evaporação utilizados foram da estação meteorológica de Barbalha-CE, coletados no site do INMET, enquanto a área de incidência foi calculada a partir das leituras obtidas em campo.

Os dados meteorológicos coletados foram tratados pelo método simplificado de Penman, pois a análise por este método revela uma abordagem abrangente e bem fundamentada para estimar a taxa de evaporação em diferentes condições ambientais, principalmente águas abertas, como discutido por Shuttleworth, Dingman e Linacre (Valiantzas, 2006. p. 690-702).

Estudos comparativos realizados por autores como Silva et al. (2019) e Chen et al. (2021) destacam a eficácia e a precisão desse método em comparação com outras técnicas de estimativa de evaporação. Embora haja variações nas formulações e nos parâmetros utilizados em diferentes contextos geográficos e climáticos, a metodologia de Penman continua sendo amplamente reconhecida e aplicada devido à sua robustez e adaptabilidade a diversas condições ambientais.

Portanto, utilizou-se o método simplificado para a determinação da taxa de evaporação média, conforme as equações (1), (2) e (3).

$$E_{PEN} \approx 0,047R_S\sqrt{T + 9,5} - 2,4\left(\frac{R_S}{R_A}\right)^2 + 0,09(T + 20)\left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (1)$$

$$R_S = R_A\left(0,25 + 0,5\left(\frac{n}{N}\right)\right) \quad (2)$$

$$N \approx 4\phi \sin(0,53i - 1,65) + 12 \quad (3)$$

Onde:

$\phi$ : é a latitude (radiano);

$i$ : é a contagem do mês na sequência anual (1 – 12);



$N$ : Duração máxima média diária de insolação (h);

$R_A$ : Radiação extraterrestre ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$ ) Conversão:  $1 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{d} = 23,88 \text{ cal}/\text{cm}^2/\text{d}$ ;

$RH$ : Umidade relativa (%);

$T$ : Temperatura média ( $^{\circ}\text{C}$ );

$R_s$ : Radiação solar líquida ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$ );

$n$ : Horas reais médias de insolação forte (h).

A área do espelho d'água do canal foi calculada utilizando as leituras de borda livre do canal, nível d'água e dimensões conhecidas (seção tipo do projeto) da seção hidráulica do canal. Com a área, em metros quadrados ( $\text{m}^2$ ), e a lâmina de evaporação em milímetros (mm), foi mensurado o volume de perda de água em metros cúbicos ( $\text{m}^3$ ) para a atmosfera através de cálculo aritmético.

A área do espelho d'água foi calculada utilizando as leituras dos níveis dos canais (Foto 1), nos locais onde se encontram os drenos profundos monitorados, tendo como base a geometria da seção transversal.

**Foto 1** - Medição do talude (borda livre) para cálculo do N.A. do canal.



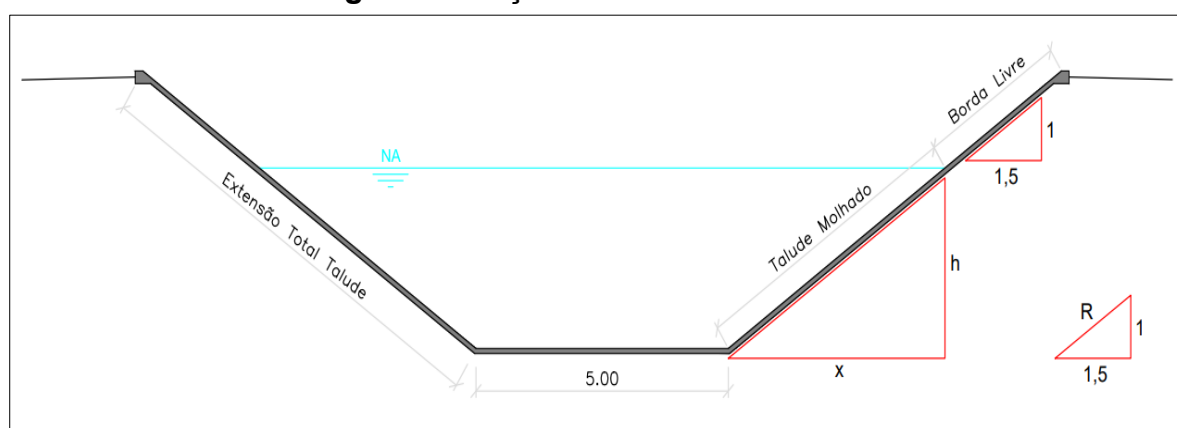
**Fonte:** Autoria Própria (2021).

A seção transversal do canal é em formato trapezoidal, com fundo (base menor) de 5,00m, abertura superior (base maior) de 17,90 m, profundidade (altura) de 4,40m e taludes com inclinação 1,5(H):1(V). Essas dimensões são a base para os cálculos

de determinação do nível d'água e da largura superior do perímetro molhado. A área do espelho d'água foi determinada pelo produto da largura superior do perímetro molhado pela extensão do trecho do canal (Figura 4).

Utilizando semelhança de triângulos e geometria básica formulou-se uma equação para cálculo do nível d'água (N.A.) e a largura superior do perímetro molhado (base maior do trapézio), utilizando as dimensões conhecidas da seção transversal, a relação da inclinação do talude (IT), a extensão total do talude (LT) e a borda livre até o nível d'água (BL), como mostra a Figura 4.

**Figura 4 - Seção transversal do canal.**



Fonte: Autoria Própria (2024).

Para determinação da relação da inclinação dos taludes (IT), utilizou-se o teorema de Pitágoras (Equação 4), onde a hipotenusa é a inclinação (IT) entre os catetos horizontal (1,5) e vertical (1) formando um triângulo retângulo.

Dado o teorema de Pitágoras:

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad (4)$$

Para calcular o nível d'água ( $h$ ), utilizou-se a semelhança entre os triângulos formados pela inclinação dos taludes (IT, H e V) e o pelo formado pelo talude molhado TM, nível d'água ( $h$ ) e base da projeção vertical do talude molhado ( $x$ ). Fazendo a relação, temos (Equação 5):

$$\frac{h}{1,0} = \frac{TM}{1,8} \quad (5)$$

Ou seja, a função:

$$h = \frac{TM}{1,8}$$

Onde:

TM: Talude Molhado (m);

h: Nível d'água (m).

De acordo com a semelhança de triângulos, determinamos o “x” pela relação (Equação 6):

$$\frac{x}{1,5} = \frac{TM}{1,8} \quad (6)$$

Ou seja, a função:

$$x = \frac{(1,5 * TM)}{1,8}$$

Enquanto para calcular a largura do espelho d'água, ou seja, a largura superior do perímetro molhado (base maior do trapézio), utilizou-se a função (Equação 7):

$$WE = 2x + WF \quad (7)$$

Onde:

WE: Largura do espelho d'água (m);

x: Base do triângulo, projeção vertical do talude molhado (m);

WF: Largura do fundo do canal (m).

Com a largura superior do perímetro molhado (WE) e a extensão linear do canal (LC), determina-se a área do espelho d'água (AE) de acordo com a equação 8:

$$AE = WE * LC \quad (8)$$

Os canais possuem várias saídas de drenos profundos, ou seja, vários pontos de coletas de dados. Então, para determinação da largura do espelho d'água de cada canal, utilizou-se a média das leituras coletadas, quando nesses, havia mais de uma saída de dreno ativo.

O volume evaporado foi calculado pelo produto das áreas dos espelhos da d'água dos canais pela taxa de evaporação média do período (março a maio de 2021).

Os canais abertos possuem inerente perda por evaporação e este fator deve ser considerado desde a concepção do projeto, porém as perdas podem ser minimizadas quando a operação é eficiente. Para determinação do nível de água, e conseqüentemente do espelho de água, necessário para atender à vazão programada, utilizou-se a fórmula de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Onde:

Q: Vazão (m<sup>3</sup>/s);

V: Velocidade média (m/s);

A: Área hidráulica (m<sup>2</sup>);

R: Raio Hidráulico (m);

S: Declividade (m/m);

n: Constante de rugosidade, canal de concreto n=0,012.

Utilizando a fórmula em função da área hidráulica (A) e as dimensões dos canais (seção transversal e vazão), se obtém a área molhada (trapézio) e conseqüentemente o nível (*h*) e o espelho de água (WE) mínimos para atender a vazão programada, ou seja, o volume mínimo a ser perdido é o produto da largura do espelho d'água (WE) pelas extensões dos canais somadas (*L*).

A pesquisa de campo também observou aspectos qualitativos que pudessem trazer informações para o diagnóstico do estudo de caso. Foram verificadas anomalias ao longo dos canais, com ênfase nos locais onde os drenos profundos têm suas saídas. Foram observadas as seguintes situações: surgências nos taludes externos do canal, recalques nas bermas, vegetação verde nos taludes externos em períodos de estiagem, patologias nos taludes internos do canal (seção hidráulica), recalques na seção hidráulica (fundo e taludes) e comportamento anormal no fluxo da água, como vórtex e outras condições.

Ainda no âmbito qualitativo, investigou-se como os vazamentos podem criar cursos d'água artificiais, impactando fauna e flora locais. Além das comunidades circunvizinhas, construções de cursos de água artificiais podem fragmentar ecossistemas, isolando populações e dificultando o fluxo gênico. Estudos indicam que tais intervenções humanas podem desencadear uma série de impactos negativos, desde a perda de biodiversidade até a alteração dos processos ecológicos fundamentais nos ecossistemas aquáticos (Smith, 2018. p. 215-230; Jones et al., 2020. p. 105-122).

Essas anomalias foram registradas por meio de fotografias anotadas com local, data, hora e coordenadas geográficas em UTM (Universal Transversa de Mercator) e em fichas de campo, registrando tais anormalidades geograficamente e em relação ao projeto, dentro de seu estaqueamento.

A análise estrutural foi de forma qualitativa, evidenciando e diagnosticando patologias ao longo do canal com intuito de elucidar suas causas e danos ao canal. Foram observadas anomalias e seus comportamentos, a fim de diagnosticar seus agentes causadores, fazendo o cruzamento de dados (evidências) obtidos na pesquisa.

Os custos das perdas de água foram mensurados calculando o produto do volume perdido pelo custo determinado na Resolução N° 67/ANA, de 15 de março de 2021:

Art. 1° Estabelecer tarifas para a prestação do serviço de adução de água bruta do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – PISF, para o ano de 2021.

Art. 2° As tarifas deverão ser pagas pelos Estados beneficiados a partir do início da operação comercial em cada Estado, conforme estabelece o art. 8° da Resolução ANA n° 2.333, de 2017.

Art. 3° A tarifa de disponibilidade para 2021 terá o valor de R\$ 0,264/m³.

Art. 4° A tarifa de consumo para 2021 terá o valor de R\$ 0,474/m³.

### **5.2.3 Tratamento dos Dados**

Os dados foram tratados utilizando ferramentas computacionais, tais como: planilhas eletrônicas para cálculos e representações gráficas; AutoCad para desenho e detalhamentos das seções transversais do canal; Google Earth para mapeamento de eventos adversos, gerando mapas, ilustrações e relatórios fotográficos para registro das anomalias observadas. Casos descritos na literatura serão utilizados para fins de análise comparativa.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 DETERMINAÇÃO DOS VOLUMES DE PERDAS DE ÁGUA

#### 6.1.1 Perdas por evaporação

A evaporação é fator importante no balanço hídrico em canais abertos pela exposição do espelho d'água à radiação solar, sendo responsável por perdas expressivas de água, sobretudo no semiárido nordestino.

Devido alguns canais possuírem mais de um dreno ativo, praticou-se a média das leituras para determinação do nível d'água (NA) e respectiva largura do espelho d'água (WE). Dessa forma foi determinada a área média do espelho d'água de cada canal no período de março a maio de 2021 (Tabela 1). Nos canais 8.1 e 8.2, utilizou-se as leituras do Canal 9.1, pois eles não possuem separação por sifões, ou seja, possuem o mesmo nível de água, em média.

**Tabela 1** - Dados de extensão, nível médio de água, largura média e área do espelho d'água por canal do Lote1 do CAC.

Canal	Extensão (m)	Nível d'água médio (m)	Largura média (m)	Área do espelho d'água (m <sup>2</sup> )
<b>CANAL 01</b>	487,00	2,38	12,13	5.905,17
<b>CANAL 02</b>	648,00	2,37	12,12	7.855,48
<b>CANAL 03</b>	2.600,00	2,42	12,27	31.893,23
<b>CANAL 04</b>	3.113,00	2,37	12,12	37.737,29
<b>CANAL 05</b>	2.035,00	2,21	11,63	23.658,97
<b>CANAL 06</b>	2.071,00	2,10	11,29	23.385,59
<b>CANAL 07</b>	5.288,00	2,07	11,21	59.292,45
<b>CANAL 8.1</b>	9.167,00	1,96	10,87	99.688,88
<b>CANAL 8.2</b>	2.303,00	1,96	10,87	25.044,56
<b>CANAL 9.1</b>	5.950,00	1,96	10,87	64.704,79
<b>TOTAL</b>	<b>33.662,00</b>			<b>379.166,42</b>

Fonte: Autoria Própria (2024).

O volume de perda de água para atmosfera (evaporação) foi determinado utilizando dados da estação meteorológica de Barbalha-CE, fonte de dados mais próxima do local. Através do método simplificado de Penman, determinou-se as taxas

de evaporação para cada mês do período do estudo, estimando-se a "lâmina" de evaporação, conforme a Tabela 2.

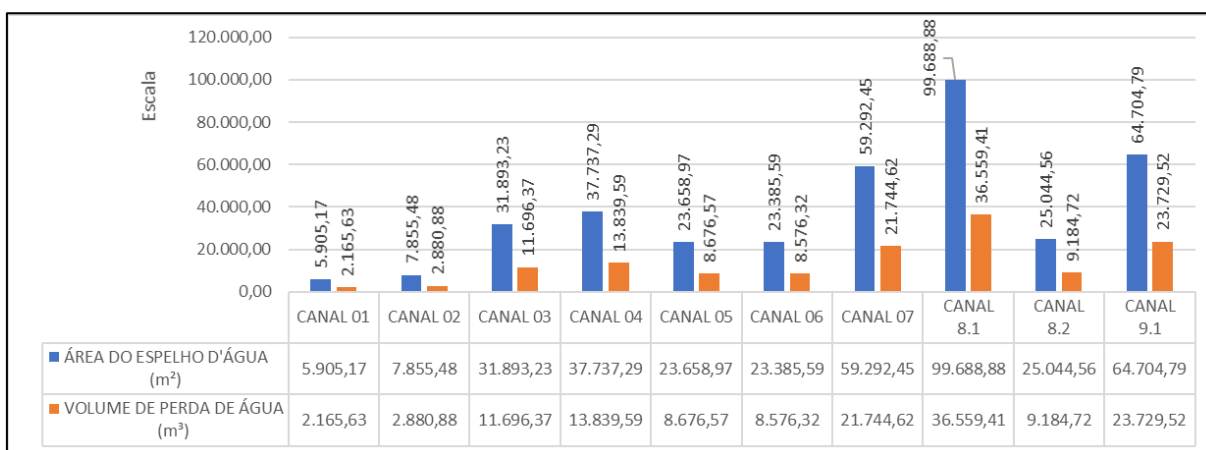
**Tabela 2** - Parâmetros da equação simplificada de Penman e taxa de evaporação mensal.

Mês	Março/2021	Abril/2021	Maió/2021
Latitude ( $\phi$ )	-0,1274	-0,1274	-0,1274
i	3	4	5
N (h)	12,03	11,77	11,57
RA (MJ/m <sup>2</sup> /dia)	38,23529	36,02941	32,84314
N (h)	7,10	6,50	6,00
Rs (MJ/m <sup>2</sup> /dia)	20,84136	18,95671	16,72591
RH (%)	73,36	74,06	76,40
T (°C)	26,01	24,96	21,82
E <sub>pen</sub> (mm/d)	4,54	4,02	3,40
E <sub>pen</sub> (mm/mês)	140,75	120,71	105,28

Fonte: Autoria Própria (2024).

O volume de perda de água por evaporação foi calculado pelo produto entre a área total do espelho d'água dos canais abertos e taxa média de evaporação do período (Figura 5), evidenciando parte do déficit hídrico do equipamento. Os volumes variaram conforme as dimensões longitudinais e os níveis de água de cada canal.

**Figura 5** - Volume de perda por evaporação no período de março a maio de 2021.



Fonte: Autoria Própria (2024).

O volume médio de perda de água por evaporação foi de 46.351,21 m<sup>3</sup>/mês entre os meses de março e maio de 2021, período em que as coletas de vazões das saídas dos drenos foram realizadas, totalizando 139.053,63 m<sup>3</sup> nos três meses. É

sabido que esse período, nessa região, encontra-se dentro da quadra chuvosa, ou seja, incidem as menores taxa de evaporação do ano.

Mesmo utilizando esse valor médio minorado, obteve-se um volume de aproximadamente 556.214,53 m<sup>3</sup> por ano. O volume certamente seria maior em outros períodos do ano, em que as taxa de evaporação são mais elevadas.

Dado que o Cinturão das Águas do Ceará opera com 1/3 da sua capacidade total de 30 m<sup>3</sup>/s, ou seja, 10m<sup>3</sup>/s, pois está com apenas uma das três linhas de sifões que interligam os canais (Sohidra, 2020. p. 4), esse volume equivaleria a 15,45 horas de operação. Esta perda é relativamente pequena diante do volume transportado, porém ainda pode ser menor, caso fosse possível manter os níveis dos canais no mínimo necessário para atender à vazão requerida.

Além disso, a título de comparação, este volume poderia suprir as necessidades de consumo de 10.159 pessoas no período, atribuindo o consumo de 150 litros/dia/pessoa (mínimo) conforme estudo de Silva et al. (2017. p. 112-125).

Calculando-se a área mínima do espelho d'água dos canais para atender a vazão programada de 10 m<sup>3</sup>/s, temos que a largura do espelho d'água deveria ser de 10,64 m, com o nível de água em 1,88 m. Nestas condições de operação, a perda média seria de 525.404,77 m<sup>3</sup> por ano (Tabela 3).

**Tabela 3 - Volume de perda mínima por evaporação.**

CANAL	ÁREA DO ESPELHO D'ÁGUA (m <sup>2</sup> )	TAXA DE EVAPORAÇÃO MÉDIA (mm/mês)	PERÍODO (mês)	VOLUME DE PERDA DE ÁGUA (m <sup>3</sup> )
CANAL 01	5.181,68	122,25	12,00	7.601,22
CANAL 02	6.894,72	122,25	12,00	10.114,14
CANAL 03	27.664,00	122,25	12,00	40.581,44
CANAL 04	33.122,32	122,25	12,00	48.588,47
CANAL 05	21.652,40	122,25	12,00	31.762,78
CANAL 06	22.035,44	122,25	12,00	32.324,68
CANAL 07	56.264,32	122,25	12,00	82.536,40
CANAL 8.1	97.536,88	122,25	12,00	143.080,79
CANAL 8.2	24.503,92	122,25	12,00	35.945,79
CANAL 9.1	63.308,00	122,25	12,00	92.869,06
<b>TOTAL</b>	<b>358.163,68</b>			<b>525.404,77</b>

Fonte: Autoria Própria (2024).

Ou seja, a perda adicional seria de 30.809,76 m<sup>3</sup> por ano, representando 5,86% a mais que o mínimo possível dentro dessas condições.



### 6.1.2 Perdas por vazamentos: Descargas dos Drenos Profundos

Dentre os dez canais do Lote 1 do CAC, com extensões e quantidade de saídas de dreno distintas, apenas dois (02) canais não apresentaram drenos ativos (Canais 8.1 e 8.2). O projeto possui um total de 116 drenos profundos dispostos longitudinalmente abaixo do fundo dos canais, nos quais 25 apresentaram vazões no período estudado (Tabela 4).

**Tabela 4** - Quantidade de drenos ativos por canal.

Canal	Extensão (m)	Quantidade de drenos por canal	Quantidade de drenos ativos
CANAL 01	487,00	1	1
CANAL 02	648,00	1	1
CANAL 03	2.600,00	12	6
CANAL 04	3.113,00	9	7
CANAL 05	2.035,00	3	2
CANAL 06	2.071,00	5	2
CANAL 07	5.288,00	23	4
CANAL 8.1	9.167,00	19	-
CANAL 8.2	2.303,00	9	-
CANAL 9.1	5.950,00	34	2
<b>TOTAL</b>	<b>33.662,00</b>	<b>116</b>	<b>25</b>

Fonte: Aatoria Própria (2024).

Para análise hidrológica, foi calculada a perda de água do projeto levando em consideração todo seu trecho de abrangência utilizando os dados coletados *in loco* (Foto 2) e em literaturas de referência. Com esses dados, foi possível mensurar o impacto e a eficiência hídrica do canal, considerando as condições meteorológicas locais e os dados coletados em campo.

**Foto 2** - Coleta de água em recipiente aferido para teste de vazão.



**Fonte:** Autoria Própria (2024).

As águas escoadas pelas saídas de drenos profundos ativos criaram, em alguns locais, cursos hídricos artificiais podendo causar transtornos e prejuízos dentro da abrangência topográfica, como por exemplo saturação e erosões em acessos de propriedades adjacentes ao canal (Foto 3).

**Foto 3** - Água de vazamentos cruzando acessos às propriedades rurais.



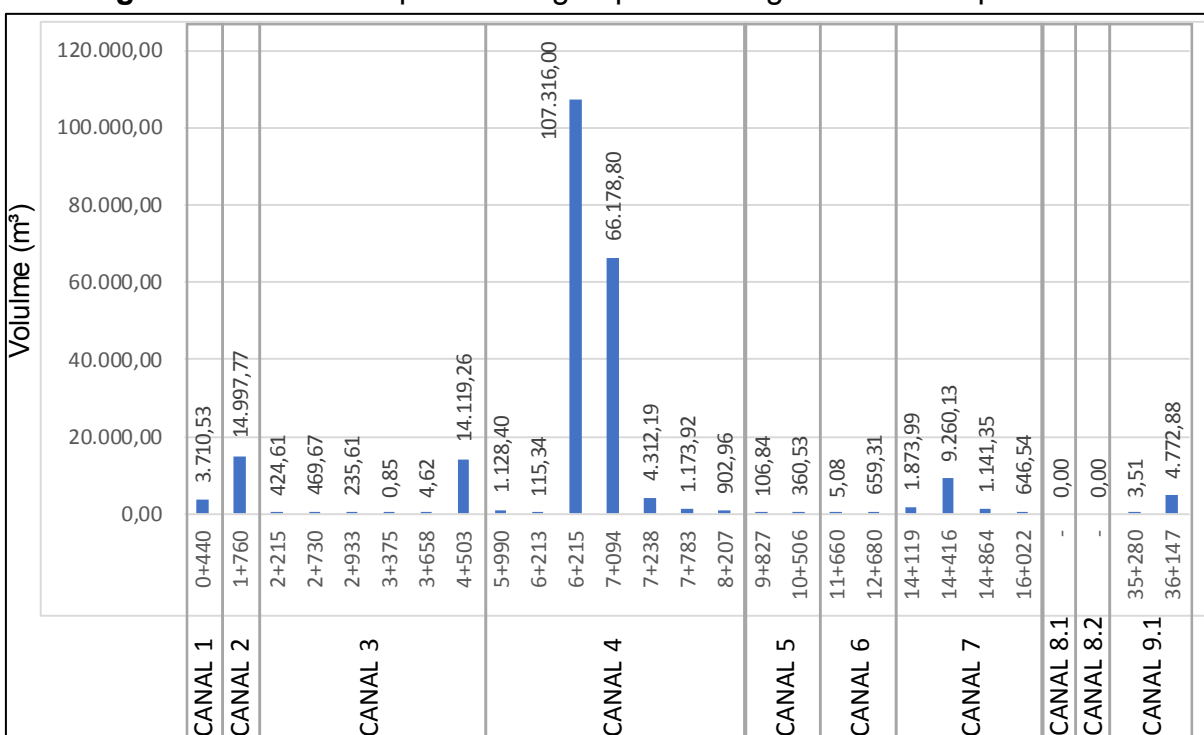
**Fonte:** Autoria Própria (2021).

Ao longo dos canais, foram observadas saídas de drenos profundos ativas, ou seja, com descarga de água, evidenciando falha na impermeabilização do canal ou drenagem do lençol freático (Foto 4). Porém, antes de encher o canal, não tinha sido observado descargas nas saídas de dreno, deixando a probabilidade de drenagem subterrânea descartada nesses locais.

**Foto 4 - Saída de dreno ativa.**

Fonte: Autoria Própria (2021).

As descargas de águas dos drenos profundos mostram, sobretudo, a perda de água e falhas na impermeabilização dos canais. As leituras das vazões demonstraram o volume de perda de água total de 233.920,70 m<sup>3</sup> no período estudado, com vazão variável entre as saídas de drenos. Vale observar que o Canal 4 obteve os maiores números de drenos ativos e volumes, enquanto os canais 8.1 e 8.2 não obtiveram nenhuma leitura de vazamento (Figura 6).

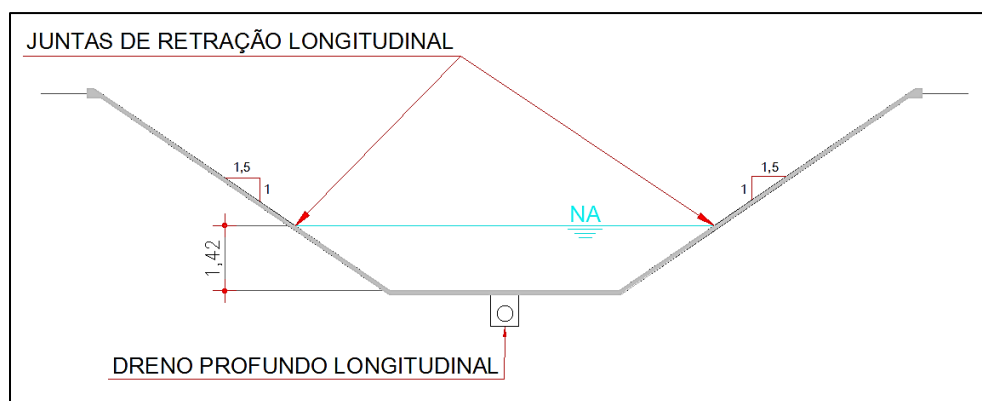
**Figura 6 - Volume de perda de água por descarga dos drenos profundos.**

Fonte: Autoria Própria (2024).

Houve grande variação da quantidade de dias em que alguns drenos ficaram ativos dentro do período total do estudo (três meses), pois neste período ocorreu variação de níveis de água.

Observou-se que os drenos com poucos dias ativos estiveram com descarga apenas quando seus níveis de água estavam com profundidade superior a aproximadamente 1,50 m. Este fato foi observado em drenos de todos os canais, denotando que havia pontos com falhas na impermeabilização nessa área. Nesta área dos taludes internos (seção hidráulica do canal), existe juntas de retração longitudinais (ambos os lados) situadas a uma profundidade de 1,42 m, como mostra a Figura 7.

**Figura 7** - Seção transversal do canal – juntas de retração longitudinal.



Fonte: Aatoria Própria (2024).

Nessas áreas podem estar as origens dos vazamentos, pois foram observados em alguns trechos que as juntas trabalharam de forma a fissurar, possivelmente gerando pontos frágeis na geomembrana. Esses pontos são capazes de evoluírem para furos, por onde percolaria a água descarregada nas saídas dos drenos. Ficou evidente que em vários canais as descargas dos drenos iniciaram apenas após o nível ultrapassar as juntas de retratação, tendo sua vazão aumentada proporcionalmente pelo aumento da coluna d'água.

Também foram analisadas as taxas de perdas por vazamentos pelas dimensões dos canais. O Canal 4 apresentou os piores resultados, chegando a uma perda de 2,89 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> de área impermeabilizada (Tabela 5).

**Tabela 5 - Taxas de vazamentos**

CANAL	EXTENSÃO (m)	DRENOS ATIVOS (und)	VOLUME DE PERDA DE ÁGUA (m <sup>3</sup> )	TAXA		
				DRENOS ATIVOS (dreno/km)	VAZAMENTOS POR KM (m <sup>3</sup> /km)	VAZAMENTOS POR ÁREA (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
CANAL 01	487,00	1	3.710,53	0,49	7.619,15	0,38
CANAL 02	648,00	1	14.997,77	0,65	23.144,71	1,15
CANAL 03	2.600,00	6	15.254,63	0,43	5.867,17	0,29
CANAL 04	3.113,00	7	181.127,61	0,44	58.184,26	2,89
CANAL 05	2.035,00	2	467,37	1,02	229,67	0,01
CANAL 06	2.071,00	2	664,39	1,04	320,81	0,02
CANAL 07	5.288,00	4	12.922,01	1,32	2.443,65	0,12
CANAL 8.1	9.167,00	-	-	-	-	-
CANAL 8.2	2.303,00	-	-	-	-	-
CANAL 9.1	5.950,00	2	4.776,39	2,98	802,75	0,04

Fonte: Autoria Própria (2024).

A perda total de água no período estudado por meio dos drenos profundos foi expressiva (233.920,70 m<sup>3</sup>), superando a perda por evaporação (139.053,63 m<sup>3</sup>), porém vale salientar que o estudo foi realizado em um período de testes, onde os níveis variaram em função da logística de operação e da precipitação local. Então, para estimar a perda de água por ano, é necessário verificar as vazões das saídas de dreno com o nível de operação do canal.

Os canais do sistema adutor Cinturão das Águas do Ceará foram projetados para operar com a vazão de 30,00 m<sup>3</sup>/s, porém na primeira fase desse projeto foi executado apenas uma das três linhas de sifões que interligam os canais, ou seja, o sistema possui atualmente 1/3 de sua capacidade projetada.

## 6.2 PRINCIPAIS IMPACTOS

### 6.2.1 Estruturais

Os vazamentos e seus agentes causadores provocaram danos nas estruturas dos canais abertos. Os mais notórios são as trincas no revestimento em concreto (proteção mecânica da impermeabilização) encontradas com frequência no fundo e nos taludes em todos os canais onde ocorreram vazamentos, principalmente das juntas de retração longitudinais para o fundo do canal (Foto 5).

**Foto 5 - Fundo do canal fissurado.**



**Fonte:** Aatoria Própria (2021).

Em um local do Canal 4 houve uma movimentação de massa no dique do canal causando uma trinca com pelo menos 3 cm de largura e aproximadamente 20,00 m na junta longitudinal por onde se infiltrava água. Apesar deste movimento, seus efeitos causaram apenas danos aparentes nas placas (Foto 6).

**Foto 6 - Junta longitudinal trincada.**



**Fonte:** Aatoria Própria (2021).

Em outros locais o movimento de massa causou trincas e recalques na berma do canal, onde foram encontrados inclusive buracos em pelo menos três pontos em canais diferentes. O fato incomum entre eles foi a presença de vazamentos nas áreas próximas evidenciados pelas vazões em saída de drenos, ou seja, vazamentos em suas áreas de contribuição (Foto 7).

**Foto 7 - Recalque na berma do canal.**



**Fonte:** Autoria Própria (2021).

Esse incidente revelou que o sistema de drenagem não foi capaz de escoar água suficiente para manter a zona de saturação abaixo do fundo do canal. Como resultado, o maciço ficou tão umedecido que colapsou, causando o deslizamento de solo (movimento de massa) para dentro do canal, comprometendo a impermeabilização e o revestimento de concreto (Foto 8).

**Foto 8 - Escorregamento de solo na seção hidráulica do canal.**



**Fonte:** Autoria Própria (2021).

Apesar do dreno profundo servir com um equipamento de proteção, tendo a função de escoar água caso haja vazamento na impermeabilização, em alguns locais

o dispositivo de drenagem teve capacidade para escoar a vazão de água infiltrada no dique do canal (maciço), pois foi detectado saturação de parte do dique do canal (Foto 9).

**Foto 9** - Talude do dique do canal saturado.



**Fonte:** Autoria Própria (2021).

Em pelo menos um local a saturação do maciço evoluiu para o aparecimento de surgência no talude com fluxo de água contínuos (vazões). Este fenômeno pode ser caracterizado como *piping*<sup>1</sup> em sua segunda etapa, “continuação”, onde uma vez iniciado o processo este não cessará até que as forças erosivas sejam minimizadas ou o carreamento de partículas seja interrompido (Mourão e Torres, 2019, p. 18, apud Icold, 2017), como evidenciado na Foto 10.

---

<sup>1</sup> *Piping* é um fenômeno hidráulico que envolve a erosão interna de materiais granulares em estruturas de engenharia, especialmente em barragens e diques, podendo comprometer sua estabilidade. Conforme mencionado por Foster, Fell e Spannagle (2000, p. 12-19), *piping* ocorre quando a água flui através do solo ou dos materiais granulares ao redor ou sob uma estrutura, causando a remoção de partículas e a formação de canais, o que pode levar à instabilidade e ao colapso da obra.



**Foto 10** - Escoamento de água no maciço (dique) do canal.



**Fonte:** Autoria Própria (2021).

Apesar do fenômeno ocorrido levantar suspeitas quanto ao risco de evolução para as próximas fases do *piping*, se observou que a água escoada estava cristalina e sem evidências de carreamento de partículas de solo (Foto).

### 6.2.2 Financeiros

Atribuindo o valor unitário da tarifa de disponibilidade de R\$ 0,264/m<sup>3</sup> (Resolução N° 67/ANA) e o volume médio calculado de 77.973,57m<sup>3</sup>/mês, o custo do desperdício de água por vazamentos é de R\$ 247.020,26 por ano. Todavia, se calcular atribuindo o valor unitário da tarifa de consumo (R\$ 0,474/m<sup>3</sup>) o custo é de R\$ 443.513,65 por ano.

Quanto às perdas por evaporação adicional, ou seja, o volume total perdido para a atmosfera menos o volume mínimo que poderia ser perdido nas melhores condições de operação, o volume real é de aproximadamente 30.809,76m<sup>3</sup> por ano. Aplicando as taxas supracitadas, teríamos um custo anual de disponibilidade ou consumo de R\$ 8.133,78 ou R\$ 14.603,83, respectivamente. Um custo irrisório diante do custo total de operação do empreendimento.

### 6.2.3 Socioambientais

Os vazamentos observados causaram alguns transtornos quanto à mobilidade em alguns locais onde as águas escoaram causando atoleiros e erosões nos acessos a propriedades rurais. Normalmente, estas são produtoras de alimentos e podem ter o escoamento da produção prejudicados. Esses cursos d'água artificiais também podem invadir propriedades, causando danos a casas, instalações e plantações.

Ainda na questão da mobilidade, os buracos causados pelos recalques nas bermas dos canais (Foto 7) também causaram bloqueios na passagem de pessoas e veículos, além de aumentar os riscos de acidentes naquelas áreas. Apesar disso, nos casos aqui relatados os locais foram devidamente isolados até a conclusão dos reparos e não ocorreram acidentes.

Além desses pontos, os vazamentos também causaram alagamentos de áreas mais baixas adjacentes aos canais (Figura 8). Apesar do ocorrido, não foi observado nenhum dano desse tipo à população circunvizinha ou à infraestrutura rodoviária próxima (BR-116). Quando os vazamentos foram detectados, medidas foram tomadas para reduzir ou bloquear as vazões do canal até que os devidos reparos fossem realizados.

**Figura 8** - Áreas afetada por alagamentos causados por vazamentos.



Fonte: Adaptada do Google Earth (2024).

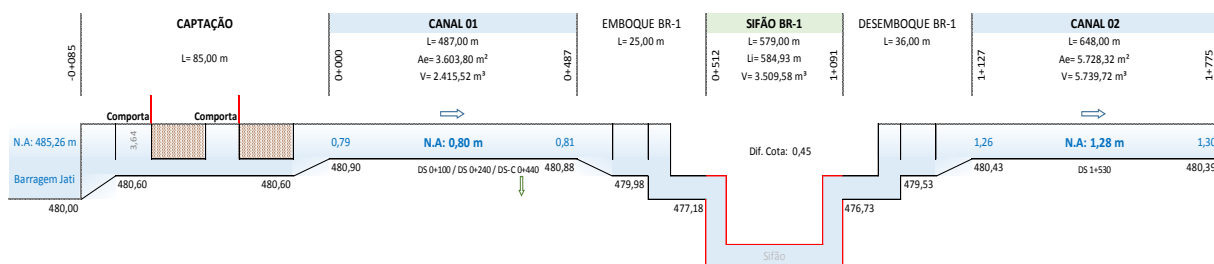
## 6.3 PRINCIPAIS AGENTES CAUSADORES DAS PERDAS DE ÁGUA

### 6.3.1 Agente causador de evaporação excedente

É inerente do tipo de equipamento (canal aberto) a perda de água por evaporação. Porém, para atender à determinada vazão, há um nível e espelho d'água mínimos. Quando as dimensões da seção hidráulica superam as pré-estabelecidas há perda excedente, ou seja, além da calculada. Estas perdas são causadas principalmente por má operação dos canais, quando se deixam os níveis além dos estabelecidos para a vazão programada.

Devido às diferenças de níveis entre os canais, a maioria deles possui comportas de controle à montante dos sifões invertidos que os interliga (Figura 9), as aberturas das comportas devem ser calculadas para manter a vazão requerida.

**Figura 9 - Perfil da captação, canais e sifão invertido.**



Fonte: Autoria própria (2024).

### 6.3.2 Agentes causadores de perdas por vazamentos

Os vazamentos ocorrem, logicamente, quando a impermeabilização falha e a partir daí se inicia o processo de agravamento do sinistro a ponto de colapsar a estrutura total ou parcialmente. Investigando as causas dos vazamentos, apontou-se diversos agentes.

#### 6.3.2.1 Tipo de Solo

Durante a análise do percurso do projeto, foi notado que os canais construídos em seção mista, tanto em corte quanto em aterro nas encostas rochosas, apresentam o maior número de drenos ativos proporcionalmente, conforme indicado na Tabela 6.

**Tabela 6** - Quantidade de drenos profundos ativos de acordo com a geologia local.

Canal	Extensão (m)	Quantidade de drenos por canal	Quantidade de drenos ativos	% de drenos ativos	Tipo de solo (corte/aterro)
CANAL 01	487,00	1	1	100%	Rchoso
CANAL 02	648,00	1	1	100%	Rchoso
CANAL 03	2.600,00	12	6	50%	Rchoso
CANAL 04	3.113,00	9	7	78%	Rchoso
CANAL 05	2.035,00	3	2	67%	1ª categoria
CANAL 06	2.071,00	5	2	40%	1ª categoria
CANAL 07	5.288,00	23	4	17%	Rchoso
CANAL 8.1	9.167,00	19	-	-	1ª categoria
CANAL 8.2	2.303,00	9	-	-	1ª categoria
CANAL 9.1	5.950,00	34	2	6%	1ª categoria
<b>TOTAL</b>	<b>33.662,00</b>	<b>116</b>	<b>25</b>		

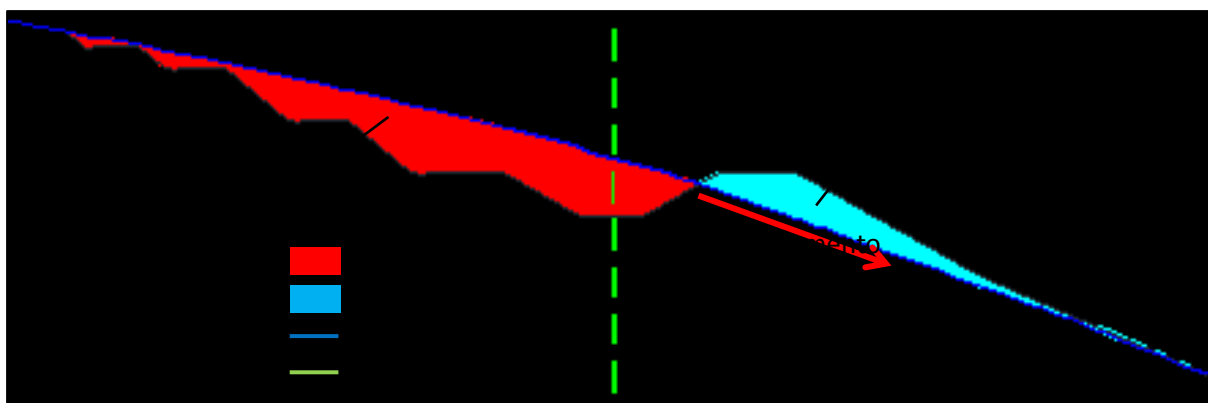
Fonte: Autoria própria (2024).

Observou-se também que apenas dois canais, 8.1 e 8.2, não apresentaram vazamentos. O Canal 9.1 se destaca por possuir a maior extensão e número de saídas de drenos entre todos os outros canais, totalizando 34 drenos, embora apenas dois estivessem ativos durante o período de estudo. Esses três canais, que abrangem uma extensão total de 17.420,00 m, representam aproximadamente 51,75% do comprimento total dos canais do projeto. É importante ressaltar que esses canais foram construídos em solo de 1ª categoria.

### 6.3.2.2 Seção transversal do canal: Corte e aterro

O tipo de seção transversal dos canais também evidenciou características que podem ser associadas a danos no equipamento. Devido o projeto ser 100% por gravidade e buscar o equilíbrio entre os volumes de corte e aterro, os canais foram construídos na maior parte de sua extensão em encostas de morros, em sua maioria rochosas, formando uma seção mista, em corte e aterro (Figura 10), onde o material escavado foi integral ou parcialmente aplicado nos aterros dos diques dos canais.

**Figura 10** - Seção transversal do canal – mista (corte e aterro).



Fonte: Autoria própria (2024).

O aterro compactado do dique na encosta deve ser incorporado ao terreno natural agregando-o ao maciço existente, porém, caso haja alguma falha geológica, uma trinca por exemplo, ou a incorporação não ser aderente, aquele local poderá ser um ponto de fragilidade sobretudo quando o canal for carregado.

Esta carga pode empurrar o aterro causando um movimento de massa, um escorregamento, e conseqüentemente o rompimento da impermeabilização e vazamentos. Tal hipótese é corroborada pela presença de drenos ativos em todos os canais construídos em encostas.

### 6.3.2.3 Impermeabilização: geomembrana

A impermeabilização dos canais é composta por uma geomembrana em PVC e material têxtil, disposta entre o solo e a proteção mecânica (revestimento em placas de concreto) em locais em corte de material de 1ª categoria ou entre o concreto poroso e o revestimento em concreto (placas) em locais em corte de materiais de 2ª e 3ª categorias.

Tendo o segundo caso duas superfícies em condições distintas, supõe-se que os trabalhos realizados pelas duas partes (concreto poroso e revestimento em concreto) sejam diferentes, pois uma está sob a geomembrana (concreto poroso) e a outra exposta às intempéries (placas em concreto). Também são duas superfícies ásperas e que o trabalho das partes pode causar atrito de modo a fragilizar a geomembrana.

Durante os reparos, foram encontradas geomembranas danificadas em alguns trechos com aparência de desgaste (Foto 11), porém não é conclusivo que tal

fenômeno tenha sido causado pelo atrito entre a placa de revestimento e o concreto poroso, pois nem todos os locais com as mesmas características (rompimento da impermeabilização) possuíam o mesmo tipo de desgaste.

**Foto 11** - Geomembrana danificada.



**Fonte:** Autoria própria (2024).

#### 6.3.2.4 Drenos profundos obstruídos

Os drenos profundos também foram vistoriados para verificação de obstrução (Foto 12), principalmente em locais com saturação de maciço e surgências. Em caso de obstrução da saída ou em algum ponto ao longo do canal, a água infiltrada se acumularia na região do fundo do canal, podendo elevar o nível da água até os diques.

**Foto 12** - Inspeção de dreno profundo (tubo corrugado perfurado).



**Fonte:** Autoria própria (2024).

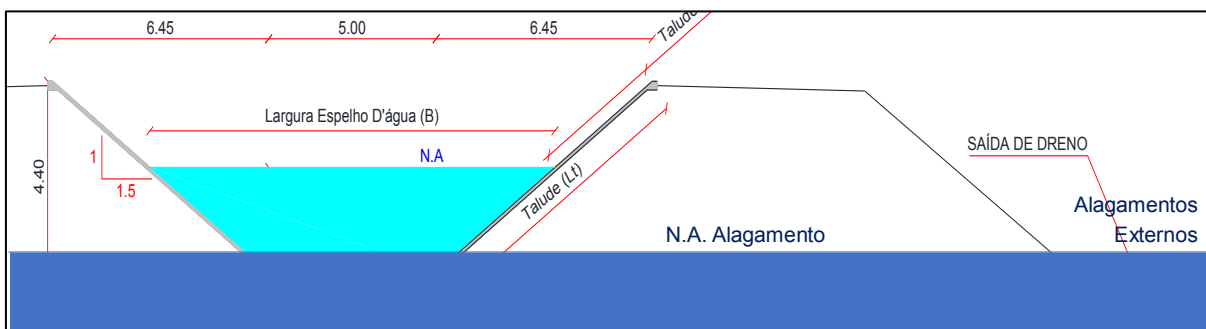
Neste estudo, não foram encontradas evidências de obstrução. Em uma das investigações, abriu-se uma janela de inspeção no tubo corrugado perfurado para verificação interna e não foram encontrados indícios de obstrução (Foto 12). Logo após a análise, o tubo foi devidamente reparado.

#### 6.3.2.5 Lençol freático

O sistema de drenagem profunda também pode agir para drenar águas subterrâneas externas ao canal, inclusive lençóis freáticos, porém não foram observados sinais de tal fenômeno. Além dessa questão ser inerente ao processo de elaboração do projeto, ao longo da sua construção seria detectado lençóis de água mais altos que a cota do fundo do canal.

Ainda neste contexto, outra hipótese seria a saturação do maciço dos diques devido ao alagamento de áreas externas aos canais onde os níveis d'água ficassem acima da saída do dreno, criando um fluxo de água para dentro do sistema de drenagem (Figura 11).

**Figura 11 - Seção transversal do canal – alagamento de áreas externas.**



**Fonte:** Autoria própria (2024).

Tal situação foi observada em apenas um local e neste foi construída uma vala de drenagem para evitar que águas externas e lençóis freáticos sazonais comprometessem a drenagem profunda.

## 6.4 MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO EFICIENTES

### 6.4.1 Manutenção

Os danos estruturais foram severos em alguns locais dos canais, tais como rompimento da impermeabilização (vazamentos), recalque nas bermas, saturação dos diques, *piping* no maciço (terreno natural e diques do canal), colapso da proteção mecânica (revestimento em placas de concreto), porém todos eles foram reparados utilizando técnicas de geotecnia e de manutenção estrutural.

#### 6.4.1.1 Impermeabilização

A maior parte dos vazamentos foram identificados pelas trincas no revestimento do canal. Após a demolição das placas de concreto no local, o reparo da geomembrana foi realizado removendo-se toda a área com furos e rasgos. Nos locais foram soldados quimicamente uma faixa de geomembrana nova (Foto 13). Logo após isso, a proteção mecânica (revestimento em placas) foi reparada com concreto não estrutural.



**Foto 13** - Reparo com geomembrana nova.



**Fonte:** Autoria própria (2024).

#### 6.4.1.2 Recalque nas bermas

No local onde ocorreu recalque e escorregamento de solo, o material saturado do dique foi removido e substituído com concreto ciclópico acabado (Foto 14). No que diz respeito à superfície da berma, o revestimento primário foi reparado com uma camada de cascalho compactado. Em outros locais, onde ocorreu apenas o vazamento sem movimentação de massa, foi realizado o aterro em solo compactado.

**Foto 14** - Reparo do dique do canal – recalque e escorregamento.



**Fonte:** Autoria própria (2024).

#### 6.4.1.3 Saturação de diques e piping

Os vazamentos causaram vários danos a estrutura dos canais, porém os que denotaram mais riscos ao equipamento e às áreas circunvizinhas foram a saturação

dos diques e os *pipings*. Se continuassem evoluindo, essas condições poderiam levar ao colapso da estrutura e, em último caso, o rompimento dos diques. Até que os reparos na impermeabilização desses locais fossem feitos, estruturas externas foram construídas para conter o carreamento de partículas e estabilizar o talude, chamadas de *rockfill* (Foto 15).

**Foto 15** - Processo construtivo do *rockfill* em áreas de saturação e *piping*.



Fonte: Autoria própria (2024).

A aplicação do *rockfill*<sup>2</sup> se deu pelas suas características de contenção de partículas e estabilização de taludes. Após a remoção do material saturado, o *rockfill* foi construído em camadas de material de diferentes granulometrias (areia, brita e rochas), criando um filtro para escoamento de água. Assim, havia a contenção das partículas de solo, evitando a evolução do *piping* e de erosões. A camada final em rochas tem como principal ação a estabilização do dique.

#### 6.4.1.4 Revestimento em concreto

Após todos os procedimentos de demolição da proteção mecânica (placas em concreto) e reparos de aterros em solo compactado, concretos porosos e substituição da geomembrana rasgada, o revestimento dos canais foram executados para proteger a nova impermeabilização.

<sup>2</sup> Rockfill, também conhecido como enrocamento, é uma técnica de engenharia utilizada na construção de estruturas de contenção, como barragens, diques, muros de proteção e revestimentos de encostas. Essa técnica consiste na disposição controlada de grandes blocos de rocha, geralmente de granito, basalto ou calcário, para formar uma estrutura robusta e resistente. O rockfill é empregado para resistir a forças externas, como pressões hidrostáticas, erosão fluvial ou movimentos de terra, proporcionando estabilidade e segurança às obras civis (Pereira et al, 2019. p. 130-145; Fell et al, 2013. p. 87-94.)

Vale salientar que a demolição é uma etapa importante, pois deve ser realizada com ferramentas manuais e com cuidado para não ferir a geomembrana para não mascarar a quantidade de furos identificados no local inspecionado (Foto 16).

**Foto 16** - Demolição de placas na linha da junta longitudinal.



**Fonte:** Autoria própria (2024).

Após a substituição da geomembrana danificada, o revestimento em concreto não estrutural foi executado em placas de 3,50 m de largura, alternando a concretagem em primárias e secundárias, formando uma junta secas entre elas (Foto 17).

**Foto 17** - Recomposição de revestimento em placas de concreto.



**Fonte:** Autoria própria (2024).

#### 6.4.2 Operação

A operação eficiente tem como premissa manter a vazão requerida no equipamento respeitando os níveis de água de acordo com o calculado para tal fluxo.

Para isso, é necessário o monitoramento dos níveis dos canais para operação das comportas localizadas nos emboques dos sifões invertidos (Foto 18). A manutenção dos níveis e conseqüente área do espelho d'água evita as perdas adicionais por evaporação.

**Foto 18** - Comporta de controle de vazão no emboque do sifão invertido.



**Fonte:** Autoria própria (2024).

Durante o estudo, o sistema adutor do CAC estava em fase de teste para iniciar a operação. Nesse período, a automação ainda não estava concluída, pois seria instalada apenas após a finalização de todos os lotes do projeto. A operação estava sendo realizada manualmente, com o auxílio de geradores posicionados nas comportas. Este estudo mostrou que a operação manual durante esse período teve bons resultados em relação às perdas por evaporação, com um excedente de apenas 5,86%. No entanto, para uma operação eficiente e segura, há necessidade de empregar dispositivos automatizados de controle e monitoramento no equipamento, tais como: sensores de vazão e nível de água, além dos dispositivos de controle das comportas. Estes seriam todos interligados pela automação, sendo monitorados e controlados por uma central de operação.

### **6.4.3 Monitoramento**

Muitos dos vazamentos encontrados tiveram como indícios as trincas e fissuras no fundo e nos taludes dos canais. Após os reparos, alguns desses drenos ainda continuaram ativos, demandando uma nova inspeção para detecção de vazamentos.

Como não havia sinais aparentes nas áreas de abrangência desses drenos profundos, utilizou-se o método de geofísica por eletrorresistividade (Foto 19).

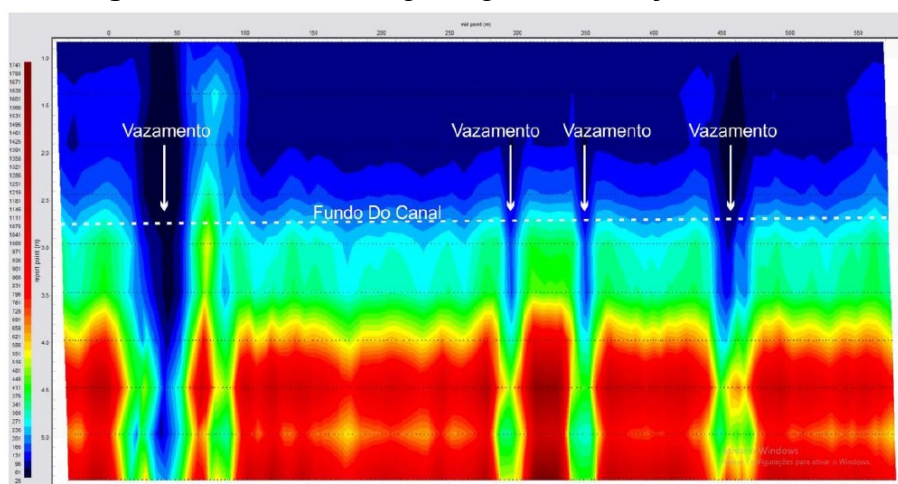
**Foto 19** - Inspeção geofísica dos canais para detecção de vazamentos.



Fonte: Autoria própria (2024).

Estas inspeções geraram relatórios com perfis hidrogeológicos, como no exemplo da Figura 12, mostrando onde as águas estavam percolando no fundo do canal, servindo como indicadores para novas inspeções, aberturas no fundo do canal, investigação e reparos da impermeabilização destes locais.

**Figura 12** - Perfil hidrogeológico - Detecção de vazamentos.



Fonte: Autoria própria (2024).

Além das inspeções internas na seção hidráulica dos canais, seja por métodos visuais ou tecnológicos, como a geofísica por eletrorresistividade, é também necessário monitorar externamente as bermas e os taludes dos diques. A detecção de recalques, trincas, fissuras, áreas úmidas com ou sem vegetação, e surgências pode

indicar problemas nos maciços dos canais. Esses problemas devem ser investigados e reparados a tempo para evitar o surgimento de danos estruturais mais graves.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que diz respeito às perdas por evaporação, verificou-se que, mesmo em um período de menor taxa de evaporação, as perdas são significativas, representando uma parcela considerável do déficit hídrico do sistema. No período do estudo (três meses), a taxa de evaporação média foi de 122,25 mm/mês, sendo perdido para a atmosfera aproximadamente 46.351,21 m<sup>3</sup>/mês. Extrapolando este valor, a perda seria de 556.214,53 m<sup>3</sup>/ano, volume suficiente para abastecer por volta de 10.159 pessoas por ano.

Embora esses números sejam consideráveis em relação ao uso humano, quando comparados ao volume total transportado, representam apenas 15,45 horas de operação do canal adutor. Além disso, ao manter os níveis de água e a área do espelho d'água conforme a vazão requerida, a perda excedente seria de apenas 30.809,76 m<sup>3</sup>/ano, equivalente a 5,86% do total.

Já as perdas por vazamentos demonstraram ser ainda mais expressivas, comprometendo a eficiência hídrica do sistema. O projeto apresentou 25 drenos ativos de um total de 116 ao longo dos 33,66 km de canais, com perda de 223.920,70 m<sup>3</sup> em três meses, uma média de 77.973,57 m<sup>3</sup>/mês. Extrapolando para uma perda anual, ter-se-ia 935.682,80 m<sup>3</sup>, volume suficiente para o consumo de 27.249 pessoas pelo período de um ano.

No que diz respeito às taxas de vazamentos, os resultados mostraram que ocorreu uma média de 0,74 drenos ativos por quilômetro, com um volume médio de 6.949,10 m<sup>3</sup>/km de canal e um volume médio de 0,35 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> de área impermeabilizada de canal. O Canal 4 apresentou as piores taxas, com 58.184,26 m<sup>3</sup>/km de canal e 2,89 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> de área impermeabilizada. Entre os dez canais, apenas dois não apresentaram drenos ativos: os canais 8.1 e 8.2. O Canal 9.1 também apresentou leituras mais baixas em comparação com os outros canais.

Também foram observados que alguns drenos apresentaram descargas de água apenas quando os níveis de água ultrapassaram 1,50 m de altura, denotando que havia falhas na impermeabilização nesta faixa longitudinal, tal fato evidenciado pela presença de juntas de retração longitudinais (ambos os lados) situadas a uma altura de 1,42 m, em muitos casos com danos estruturais aparentes graves.

Os vazamentos causaram impactos hidrológicos, estruturais, financeiros e socioambientais, com destaque para os estruturais, pois além do custo dos reparos também inferiram riscos à segurança do equipamento. Estes efeitos foram de nível leve a grave, de uma pequena fissura no revestimento em concreto a formação de *piping* no maciço do canal, ou seja, danos de várias amplitudes. Dentre os vários tipos de impactos estruturais, os principais foram: as trincas no fundo, taludes e juntas longitudinais do revestimento (placas em concreto); os recalques nas bermas que, em um local ocorreu um escorregamento (movimento de massa) para dentro da seção hidráulica do canal; e saturação dos maciços que, em um dos pontos, evoluiu para um *piping*.

Quanto aos custos financeiros das perdas de água, valores calculados para a evaporação excedente foram de apenas R\$ 14.603,83 por ano quando cobrada a taxa de consumo. Por outro lado, as perdas por vazamento, se cobradas as taxas de disponibilidade ou consumo, teriam um custo anual de R\$ 247.020,26 ou R\$ 443.513,65, respectivamente. Tais recursos poderiam ser economizados e empregados na manutenção preventiva do equipamento ou em melhorias pontuais, a exemplo dos acessos às pontes transversais dos canais.

No que diz respeito aos impactos socioambientais, a criação de cursos d'água artificiais ao longo dos canais foi o principal. Isso causou transtornos aos transeuntes das vias transversais e adjacentes, resultando em erosões e atoleiros. Em áreas com vazões muito altas, houve alagamentos expressivos próximos à BR 116 e a residências vizinhas, mas sem danos aparentes. Quanto aos impactos na fauna e flora, estes exigiriam estudos mais aprofundados, fora do escopo deste trabalho.

Os agentes causadores dos vazamentos foram investigados, destacando-se fatores como tipo de solo, impermeabilização, tipo de seção transversal do canal, lençol freático e obstrução dos drenos profundos. Os resultados quantitativos e qualitativos demonstraram evidências de como estes fatores influenciaram ou não nos problemas identificados.

Dentre os fatores salientados, o tipo de solo onde os canais foram construídos é o que mais apresenta indícios de causa e efeito dos vazamentos, pois pelo menos 76% dos drenos ativos (19) estavam em canais construídos em encostas rochosas, por meio de corte e aterro com o mesmo material. Em termos de magnitude, 97% de todo o volume perdido ocorreu nos Canais 1, 2, 3, 4 e 7, devido às condições de construção. É importante notar que nessas áreas a geomembrana impermeabilizante



não estava diretamente sobre o talude; em vez disso, a superfície rochosa era sempre revestida e nivelada com concreto poroso.

Após inspeções nos locais reparados, foram observadas geomembranas com sinais de desgaste, mais uma vez, nestes locais onde havia concreto poroso sob a geomembrana e o revestimento em concreto sobre a mesma. Entendendo que, apesar da geomembrana ser projetada para suportar atrito, tração e outras cargas, a diferença de intensidade de trabalho entre os dois tipos de concreto pode ter ocasionado condições suficientes para fragilizar a geomembrana em alguns pontos. Essa hipótese se baseia no fato de que todos os revestimentos foram construídos em placas com juntas secas e de dilatação, projetadas para resistir ao trabalho intenso causado pela exposição à radiação solar e às mudanças de temperatura, especialmente quando os níveis de água variam rapidamente. Por outro lado, o concreto poroso estava sempre confinado, com variações de temperatura mínimas e, portanto, sujeito a menos estresse.

Mais uma característica predominante nestes locais com altos índices de vazamentos é o tipo de seção transversal, em sua maioria seções mistas (corte e aterro), onde o lado construído em aterro compactado está disposto em condições que, se não for competentemente incorporado ao terreno natural, estará susceptível a um movimento de massa, escorregamento devido à topografia local.

Os impactos estruturais identificados exigiram reparos para garantir a integridade do equipamento, abrangendo desde o revestimento de concreto até o maciço dos diques de contenção em aterro. Os serviços executados incluíram: demolição e reconstrução do revestimento em concreto para impermeabilização; reparos na geomembrana danificada; reaterro em áreas com perda de solo na seção hidráulica, geralmente na base do talude; compactação do reaterro nas bermas onde ocorreu recalque; e construção de *rockfill* nos taludes onde houve saturação ou *piping*. Estes reparos deram estabilidade e resistência a estes locais com fragilidade demonstrada, porém diante das condições em que a maioria dos vazamentos ocorreram, medidas complementares foram aplicadas, pois após os reparos alguns drenos ainda continuaram ativos, denotando que haviam pontos não detectados visualmente e nem com auxílio da geofísica por eletrorresistividade. Situação que infere um problema crônico destas condições locais em que o equipamento se encontra.

Sobre a operação, ela se mostrou eficaz durante o período de estudo, já que os volumes de perdas extras devido à evaporação não ultrapassaram significativamente o previsto. No entanto, é essencial implementar procedimentos de medição e monitoramento para evitar níveis de água acima do projetado para a vazão requerida. Além disso, é fundamental instalar equipamentos de controle e monitoramento interligados por automação. Além dos equipamentos automatizados que podem controlar e monitorar todo o sistema hidráulico dos canais, é necessário o monitoramento da seção hidráulica, bermas, taludes, bueiros, canaletas de drenagens superficiais e drenagens subterrâneas (dreno profundos) dos canais por meio de vistoria periódica. A detecção rápida de danos estruturais, como os já citados, é essencial para as tomadas de decisões ágeis pelos gestores do equipamento. Caso algo seja encontrado, o local deve ser investigado para mitigação e/ou resolução do problema.

## 8 CONCLUSÃO

Diante desse cenário, torna-se evidente a importância de manutenção e operação eficientes do sistema. As medidas de reparo e prevenção, como a substituição da geomembrana danificada, a estabilização dos taludes e a automação do controle e monitoramento, são essenciais para minimizar as perdas e garantir a segurança e sustentabilidade do Cinturão das Águas do Ceará – CAC.

Por fim, é fundamental ressaltar a necessidade de um monitoramento contínuo e abrangente, tanto interno quanto externo aos canais, a fim de detectar precocemente quaisquer problemas e realizar intervenções adequadas. Somente através de uma abordagem integrada e proativa será possível enfrentar os desafios relacionados às perdas de água no sistema adutor CAC e garantir o fornecimento sustentável de água para a região.

## REFERÊNCIAS

ABDELLAH, M. et al. Experimental analysis of concrete-lined irrigation canals on clayey soil. *Irrigation and Drainage Systems Engineering*, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2019.

Agência Nacional de Águas. (ANA). Transposição do Rio São Francisco. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/assuntos/temas/transposicao-do-rio-sao-francisco>. Acesso em: 04 de fev. 2024.

Agência Nacional de Águas (ANA). Resolução Nº 67, de 15 de março de 2021. Publicada no Diário Oficial da União, 2021.

ALLAN, J. A. et al. Water availability: from research to policy and practice. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 376, n. 2121, 2018.

ALMEIDA, L. P. et al. Impactos socioeconômicos da transposição do rio São Francisco para as comunidades quilombolas e ribeirinhas. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 14, n. 1, p. 1-19, 2020.

ALMEIDA, R. A. et al. Viabilidade técnica da transposição do rio São Francisco: análise hidrológica e hidráulica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 24, n. 3, p. 1-12, 2019.

ALVES, G. P. et al. A transposição do Rio São Francisco: uma reflexão sobre os impactos socioeconômicos e ambientais no Semiárido nordestino. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental*, v. 14, n. 4, p. 111-124, 2020.

ASANO, T. et al. Water resources management in Asia: Mainstreaming approaches and challenges. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 31, 2020.

BALCIK, F. et al. Maintenance and Rehabilitation of Irrigation Canals. *Water*, v. 12, n. 1, p. 158, 2020.

BRASIL. Há 12 anos em obras, transposição do São Francisco custará mais R\$ 1,4 bi. Disponível em: <https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/transposicao-rio-sao-francisco/ha-12-anos-em-obras-transposicao-do-sao-francisco-custara-mais-r-1-4-bi>. Acesso em: 17 de mar. 2024.

BRASIL. Como a Transposição do Rio São Francisco é paga?. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br/fatos/brasil-contra-fake/noticias/2023/3/como-a-transposicao-do-rio-sao-francisco-e-paga>. Acesso em: 17 de mar. 2024

BRITO, A. C. R. O CAC – Cinturão das Águas do Ceará e as (des)continuidades das grandes obras na América Latina. In: *Anais... XI ENANPEGE: Presidente Prudente*, 2015.

Blog do Professor Marciano Dantas. As sub-regiões geoeconômicas do Nordeste. Disponível em: <https://professormarcianodantas.blogspot.com/2015/01/as-sub-regioes-geoeconomicas-do-nordeste.html>. Acesso em: 02 de Mar. 2024.

BUIJS, F. A. et al. A Critical Review of Internet of Things Applications in Water Management: Opportunities and Challenges. *Water*, v. 13, n. 1, p. 1-28, 2021.

CÂMARA, L. N. Gestão integrada dos recursos hídricos: uma alternativa à transposição do Rio São Francisco. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 15, n. 2, p. 16-34, 2019.

CASAREJOS, F.; MEIRA, P. Políticas públicas de gestão de recursos hídricos no Brasil. *Revista de Administração Pública*, v. 54, n. 4, p. 899-918, 2020.

CASTRO NETO, P. et al. (2020). Perdas de água em sistemas de irrigação: causas e formas de redução. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 14(2), 265-285. doi: 10.7127/rbai.v14n200840.

CEARÁ, Governo do Estado. Secretaria de Recursos Hídricos. Estudo de Impacto Ambiental – EIA, Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. Estudo de viabilidade técnico-econômica, estudo ambiental e anteprojeto do trecho Jatí - Cariús do Cinturão de Águas do Ceará – CAC. 2010.

CHEN, Q. et al. Application of Drones and Artificial Intelligence in Canal Maintenance: A Review. *Water*, v. 12, n. 5, 2020.

CHOW, Ven Te. et al. *Open-Channel Hydraulics*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

COSTA, R. C. et al. Eficiência dos canais de transposição do rio São Francisco na redução da perda de água. *Engenharia Agrícola*, v. 40, n. 3, p. 457-466, 2020.

COSTA, R. S. et al. A transposição do rio São Francisco e os impactos sociais nas comunidades indígenas. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 15, n. 2, p. 1-19, 2019.

DIETZ, T.; BICKEL, K.; BRINKERHOFF, D. W. Environmental governance revisited: challenges, opportunities, and lessons for the United Nations' post-2015 global development agenda. *Public Administration Review*, v. 77, n. 2, p. 191-201, 2017.

FEITOSA, D. G. et al. Aproveitamento de águas subterrâneas na região semiárida do Nordeste brasileiro: desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 24, n. 1, p. 43-55, 2019.

FELL, R., et al. "Guidelines for design of rockfill dams." *International Journal of Hydropower & Dams* 20.1 (2013): p. 87-94.

FOSTER, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). *Piping in embankment dams*. Canberra: Australian National Committee on Large Dams. p. 12-19.

FRANÇA, J. R. C. et al. Avaliação da qualidade da água em trechos do rio São Francisco afetados pela transposição. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, n. 1, p. 1-12, 2020.

GARCIA, R. et al. Transboundary water governance in the Americas: the role of shared basin organizations. *Water Policy*, v. 23, n. 3, p. 384-402, 2021.

GLEESON, T., MOOSDORF, N., HARTMANN, J., & VAN BEEK, L. (2020). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience*, 13(8), p. 605-612.

GUIMARÃES, R. P.; OLIVEIRA, S. L.; DIAS, R. S. Políticas públicas de recursos hídricos no Brasil: um estudo sobre a governança da bacia do Rio Paraíba do Sul. *Revista de Administração Pública*, v. 53, n. 6, p. 1089-1107, 2019.

HANAK, E. et al. Economic incentives for water conservation and efficiency in California. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, v. 168, n. 1, p. 4-19, 2020.

HOEKSTRA, A. Y., WIEDMANN, T. O., & WANG, M. (2019). Accounting for water use in global trade and investment. *Environmental Research Letters*, 14(3), 035008.

IBGE. Cidades e Estados. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/fortaleza.html?>. Acesso em: 19 de fev. 2024.

IPCC. Global warming of 1.5°C. Summary for policymakers. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acesso em: 12 mar. 2023.

JANKOWSKI, S. E., PRÜSS-USTÜN, A., & WALKER, C. L. (2020). Monitoring drinking water, sanitation, and hygiene: progress under Sustainable Development Goal 6. *The Lancet Public Health*, 5(3), p. 185-186.

JONES, A. B., et al. (2020). Effects of Anthropogenic Alterations on Aquatic Fauna and Flora. *Environmental Science Review*, 15(2), p. 105-122.

LIMA, L. R. B. et al. A gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas: conceitos, objetivos e perspectivas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 24, p. 54, 2019.

LI, R. et al. Irrigation canal maintenance: Importance and cooperation issues. *Agricultural Water Management*, v. 198, p. 51-56, 2018.

LUNA, H de A. Manutenção em Canais de Irrigação Revestidos em Concreto. 2013.126 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013. Recife-PE.

MACEDO, T. B. et al. Potencial da gestão ambiental dos canais para conservação da biodiversidade em regiões semiáridas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, n. 7, p. 499-505, 2021.

MARZOUK, M.; GHAZALA, M. Performance of concrete-lined irrigation canals in different soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 143, n. 4, 2017.

MEDEIROS, R. F. et al. Impactos ambientais da transposição do Rio São Francisco: uma revisão crítica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 24, n. 2, p. 1-14, 2019.  
MEKONNEN, M. A. et al. The use of remote sensing and hydrological modelling to assess the impacts of canal irrigation on the environment: a review. *Journal of Arid Environments*, v. 184, 2021.

MENDONÇA, M. B. Comportamento de Solos Colapsíveis da Região de Bom Jesus da Lapa – Bahia. 1990. 268p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 1990. Rio de Janeiro – RJ.

Ministério do Desenvolvimento Regional. (2022). Projeto de Integração do Rio São Francisco. Disponível em: <http://www.mi.gov.br/web/guest/projeto-de-integracao-do-rio-sao-francisco>. Acesso em: 04 de fev. 2024.

LOURÃO, B. G e TORRES, C. de O. Análise probabilística de piping em barragens. 2019. 75 p. Monografia de projeto final em Geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

NOVAK, Pavel et al. *Hydraulic Structures*. 4ª edição. Taylor & Francis, 2007.

OKU, T. et al. Restoration ecology of canals: a review. *Ecological Engineering*, v. 158, 2020.

OLIVEIRA, C. C. et al. Transposição do rio São Francisco: impactos e desafios para o desenvolvimento regional. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, v. 10, n. 1, p. 1-19, 2021.

PEREIRA, L. A. et al. A participação social nas políticas públicas de recursos hídricos no Brasil: uma análise dos conselhos de recursos hídricos estaduais. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 17, n. 3, p. 1-13, 2020.

PEREIRA, José Manuel, et al. "Rockfill Dams—A State-of-the-Art Review." *Geosciences* 9.3 (2019): p. 130-145.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos Avançados*. p. 44-51. 2008.

RAHMAN, A. et al. Automation and Digitalization of Irrigation Systems: Potential, Challenges, and Policy Implications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 146, n. 8, p. 1-17, 2020.

RIBEIRO, L. A. et al. Transposição do rio São Francisco: impactos na segurança hídrica e na conservação dos ecossistemas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 26, n. 3, p. 1-11, 2021.

SAKO, Y.; MARUYAMA, Y.; MIZUTANI, N. Effect of soil on deformation behavior of concrete-lined irrigation canals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 142, n. 4, 2016.

SÁNCHEZ-CARRACEDO, F. et al. Automation of hydraulic systems using SCADA technology. In: *Water Resources and River Engineering*. London: IntechOpen, 2018. p. 27-44.

SILVA, R. N. C. et al. Gestão integrada e participativa de bacias hidrográficas no semiárido brasileiro: abordagens e desafios. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, 2020.

SILVA, R. C., et al. (2017). Padrões de Consumo de Água em Áreas Urbanas Brasileiras. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 22(4), p. 112-125.

SMITH, J. (2018). Impacts of Artificial Waterways on Aquatic Ecosystems. *Journal of Aquatic Ecology*, 42(3), p. 215-230.

SOHIDRA. Cinturão das Águas do Ceará – CAC. Disponível em: <https://www.sohidra.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/40/2011/10/cac-descricao-lucena-17.08.pdf>. Acesso em: 23 de mar. 2020.

SOUZA, J. L. et al. (2020). Obstrução em canais de irrigação e sua influência nas perdas de água. *Irriga*, 25(1), p. 67-80. doi: 10.15809/irriga.2020v25n1p67-80

SOUZA, J. S. et al. A transposição do rio São Francisco é viável economicamente? Uma análise de custo-benefício do projeto. *Revista Brasileira de Desenvolvimento Regional*, v. 6, n. 2, p. 115-133, 2020.

VALIANTZAS, J.D. (2006) Simplified Versions for the Penman Evaporation Equation Using Routine Weather Data. *Journal of Hydrology*, 331, p. 690-702. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.012>.

WADA, Y., FLÖRKE, M., HANASAKI, N., EISNER, S., FISCHER, G., TRAMBEREND, S., SATOH, Y., & VAN VLIET, M. T. H. (2021). Modeling global water use for the 21st century: Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, 14(1), p. 103-133.

WADA, Y. et al. Global effects of changes in drought, temperature, and river flows on water availability and stress. *Science*, v. 351, n. 6277, p. 1233-1238, 2018.

ZHANG, C. et al. Machine learning techniques for hydrological prediction: a review. *Journal of Hydrology*, v. 585, 2020.



## APÊNDICE – QUADRO DE MANUTENÇÃO CORRETIVA

Principais problemas	Causas	Possíveis soluções
Trincas e fissuras no revestimento do canal - fundo do canal	Empuxo causado por nível de lençol freático acima da cota do fundo do canal	Construção de sistema de drenagem para rebaixamento do lençol freático; investigação do local e reparo da impermeabilização e do revestimento em concreto
	Empuxo causado por dreno profundo ativo obstruído - local com vazamento	Investigação do dreno profundo para desobstrução local e de sua saída; investigação do local e reparo da impermeabilização e do revestimento em concreto
	Águas pluviais de áreas adjacentes com níveis acima da cota das saída do dreno causando fluxo contrário	Construção de sistema de drenagem para rebaixamento do lençol freático; investigação do local e reparo da impermeabilização e do revestimento em concreto
	Movimento de massa causado por saturação do maciço abaixo do fundo do canal	Investigação do local e troca do solo; investigação do local e reparo da impermeabilização e do revestimento em concreto
Trincas e fissuras no revestimento do canal - taludes e juntas longitudinais	Movimento de massa causado por saturação do dique - local com vazamento (dano na impermeabilização)	Investigação do local e troca do solo; investigação do local e reparo da impermeabilização e do revestimento em concreto
		Construção de sistema de drenagem superficial para garantir o escoamento das águas pluviais das bermas

	Movimentação de massa por escorregamento em seção mista (corte e aterro)	Estabilização do maciço com a construção de estrutura adjacente ao talude externo - rockfill
Recalques e trincas nas bermas; escorregamento de massa dos diques	Saturação dos diques por infiltração na berma	Recomposição das bermas com troca de solo; construção de sistema de drenagem superficial para garantir o escoamento das águas pluviais das bermas
	Saturação dos diques por vazamentos	Recomposição dos diques com troca de solo; investigação do local e reparo da impermeabilização e do revestimento em concreto
Saturação do maciço do dique externo	Saturação dos diques por infiltração na berma	Recomposição das bermas com troca de solo; construção de sistema de drenagem superficial para garantir o escoamento das águas pluviais das bermas
	Saturação dos diques por vazamentos	Troca do material saturado e estabilização do dique com rockfill; investigação do local e reparo da impermeabilização e do revestimento em concreto
Surgência no maciço - piping	Saturação dos diques por vazamentos	Remoção do material saturado e estabilização do dique com rockfill; investigação do local e reparo da impermeabilização e do revestimento em concreto
Evaporação excedente	Níveis de água e espelho d'água acima do calculado para a vazão requerida	Operação assistida para manutenção dos níveis adequados os requeridos

Interferência na mobilidade local	Alagamentos causados pelas descargas nas saídas de drenos profundos	Construção de sistema de drenagem e acesso no locais de movimentação da população circunvizinha; investigação do local e reparo da impermeabilização e do revestimento em concreto
	Recalque nas bermas	Recomposição das bermas com troca de solo
Alagamentos de áreas adjacentes	Descargas nas saídas de drenos profundos	Construção de sistema de drenagem e acesso nos locais de movimentação da população circunvizinha; investigação do local e reparo da impermeabilização e do revestimento em concreto