Dinâmica sistêmica da insegurança hídrica em comunidades rurais do semiárido cearense: aplicação de diagramas de loop causal

Maria Adriana M. Silva [1] ; Alexandre C. Costa [2]; Rafaella P. Moreira [3] ; Tainara C. de Sousa [4];Caroline E. Lourenço [5];João D. P. Filho [6];Pedro H.A. Medeiros [7]; Pieter R. van Oel [8];Susan Geurtsen [9];Sara do N. Cavalcante [10].

Palavras-Chave – Insegurança hídrica, Vulnerabilidade socioambiental, Dinâmica de sistemas.

INTRODUÇÃO

A insegurança hídrica representa um dos principais desafios socioambientais enfrentados pelas populações residentes no semiárido brasileiro, especialmente em comunidades rurais marcadas por vulnerabilidades históricas relacionadas ao acesso à água, pobreza e limitações de infraestrutura hídrica. Caracterizada pela irregularidade pluviométrica, elevadas temperaturas e recorrência de secas prolongadas, a região semiárida apresenta condições climáticas que favorecem a redução da disponibilidade hídrica e intensificam os impactos sobre o abastecimento humano, produção agrícola, segurança alimentar e condições de saúde das populações (Marengo; Cunha; Alves, 2020).

Nos últimos anos, as mudanças climáticas têm ampliado significativamente os riscos associados à disponibilidade de água no Nordeste brasileiro. O aumento da temperatura média global, a intensificação dos eventos extremos e a maior variabilidade das chuvas contribuem para o agravamento das secas e da vulnerabilidade hídrica em regiões semiáridas (IPCC, 2023). Segundo o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, áreas já vulneráveis à escassez hídrica tendem a sofrer impactos desproporcionais decorrentes das alterações climáticas, especialmente em contextos de desigualdade social e baixa capacidade adaptativa (IPCC, 2023).

Nesse cenário, a insegurança hídrica deve ser compreendida como um fenômeno multidimensional e sistêmico, que ultrapassa a simples insuficiência física de água. Jepson et al.

1) Mestranda em Enfermagem, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), adrianamartinssilva.ams@gmail.com
2) Docente do Instituto de Ciências da Saúde e do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), cunhacos@unilab.edu.br
3) Docente do Instituto de Ciências da Saúde, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB). rafaellapessoa@unilab.edu.br
4)) Mestranda em Enfermagem, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), tainarachagas.sousa@gmail.com
5) Mestranda em Enfermagem, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB). carolineevaristol@gmail.com
6) Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). joao.pontes@funceme.br
7) Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará (IFCE). phamedeiros@gmail.com
8) Grupo de Gestão de Recursos Hídricos, Universidade de Wageningen, Wageningen. pieter.vanoel@wur.nl
9) Institute for Environmental Studies (parto f vrije Universiteit amsterdam). S.geurtsen@vu.nl
10) Doutoranda em Enfermagem, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB). saracavalcante@unilab.edu.br

(2017) definem a insegurança hídrica como a incapacidade de acessar água adequada, confiável e segura para manutenção da saúde, bem-estar e meios de subsistência. Além disso, estudos recentes ressaltam que a insegurança hídrica resulta da interação entre fatores climáticos, ambientais, econômicos, institucionais e sociais, que atuam de maneira interdependente e dinâmica (Van Vliet et al., 2021).

Em comunidades rurais do semiárido cearense, essa realidade é agravada pela dependência de fontes hídricas vulneráveis às variações climáticas, como açudes, poços e reservatórios superficiais, além das limitações relacionadas à infraestrutura de abastecimento e saneamento. Embora políticas públicas e tecnologias sociais, como cisternas e abastecimento por carros-pipa, tenham contribuído para ampliar o acesso à água, persistem fragilidades estruturais que mantêm as populações expostas aos efeitos das secas prolongadas (Moreira et al., 2024).

Diante da complexidade que envolve os sistemas socioambientais relacionados à água, abordagens analíticas tradicionais frequentemente apresentam limitações para compreender as múltiplas interações, causalidades e mecanismos de retroalimentação que influenciam a dinâmica da insegurança hídrica. Nesse contexto, a perspectiva do pensamento sistêmico tem sido amplamente utilizada em estudos ambientais e de saúde coletiva por possibilitar análises integradas de problemas complexos (Sterman, 2000).

Entre as ferramentas utilizadas na Dinâmica de Sistemas, destacam-se os Diagramas de Loop Causal (Causal Loop Diagrams – CLD), que permitem representar visualmente relações de causalidade, ciclos de reforço e mecanismos de balanceamento existentes em sistemas complexos (Forrester, 1961). Essa abordagem favorece a compreensão das conexões entre fatores ambientais, sociais e institucionais, possibilitando identificar como determinadas variáveis influenciam a manutenção ou agravamento da insegurança hídrica.

Estudos recentes têm demonstrado a relevância da aplicação de ferramentas sistêmicas na análise de problemas relacionados à água e às mudanças climáticas, especialmente por permitirem identificar vulnerabilidades, padrões de interação e pontos estratégicos para intervenção (Bennett Et Al., 2021; Mirchi; Madani; Watkins, 2022). Além disso, a utilização de Diagramas de Loop Causal contribui para construção de modelos participativos e apoio ao planejamento de políticas públicas voltadas à adaptação climática e fortalecimento da resiliência comunitária.

Assim, compreender a dinâmica sistêmica da insegurança hídrica em comunidades rurais do semiárido torna-se fundamental para subsidiar estratégias integradas de gestão da água, adaptação às mudanças climáticas e redução das vulnerabilidades socioambientais.

METODOLOGIA

Trata-se de um estudo de abordagem qualitativa, de caráter descritivo e exploratório, desenvolvido em três comunidades rurais localizadas nos municípios de Quixeramobim e Quixadá, inseridos no semiárido cearense. A escolha da abordagem qualitativa ocorreu devido à sua capacidade de compreender fenômenos complexos relacionados às experiências, percepções e condições de vida das populações em contextos de vulnerabilidade socioambiental, especialmente no que se refere à insegurança hídrica e às estratégias de convivência com a seca.

A coleta de dados foi realizada por meio de visitas domiciliares, utilizando-se instrumento semiestruturado elaborado para investigação de aspectos relacionados ao acesso, uso e armazenamento da água, fontes de abastecimento utilizadas pelas famílias, condições socioeconômicas, características habitacionais e condições de saúde. O instrumento também contemplou questões voltadas à percepção comunitária sobre o risco de falta d'água, experiências vivenciadas durante períodos de estiagem e estratégias adotadas pelas famílias para enfrentamento da escassez hídrica.

As informações obtidas permitiram identificar fatores ambientais, sociais e estruturais associados à insegurança hídrica nas comunidades investigadas. A partir da análise dos dados empíricos, foram selecionadas variáveis consideradas relevantes para compreensão da dinâmica do sistema hídrico local, incluindo disponibilidade de água, capacidade de armazenamento, dependência de reservatórios, ocorrência de secas, abastecimento por carro-pipa, uso de cisternas, vulnerabilidade socioeconômica e impactos sobre a saúde e condições de vida da população.

Com base nessas variáveis, foram elaborados Diagramas de Loop Causal (Causal Loop Diagrams – CLD), ferramenta pertencente à abordagem da Dinâmica de Sistemas, utilizada para representar visualmente relações de causalidade, ciclos de retroalimentação e interações entre componentes de sistemas complexos (Sterman, 2000). Os diagramas permitiram mapear relações de reforço e balanceamento existentes entre os fatores associados à insegurança hídrica, favorecendo a compreensão integrada dos mecanismos que influenciam a vulnerabilidade das comunidades rurais frente às secas e às mudanças climáticas.

A utilização dos diagramas neste estudo buscou compreender a dinâmica sistêmica da insegurança hídrica nas comunidades investigadas, evidenciando as interdependências entre fatores climáticos, infraestrutura hídrica, vulnerabilidade social e estratégias adaptativas desenvolvidas pelas famílias rurais do semiárido cearense.

RESULTADOS

Os Diagramas de Loop Causal elaborados a partir dos dados empíricos evidenciaram que a insegurança hídrica nas comunidades investigadas resulta de um conjunto de interações dinâmicas entre fatores socioeconômicos, ambientais, estruturais e sanitários. A análise sistêmica permitiu identificar ciclos de reforço e equilíbrio que contribuem tanto para manutenção quanto para mitigação parcial das vulnerabilidades relacionadas ao acesso à água no semiárido cearense.

Entre os principais mecanismos identificados, destacou-se a interdependência entre renda familiar, acesso à água e risco sanitário. Observou-se que famílias em situação de maior vulnerabilidade socioeconômica apresentam menor capacidade de acesso a fontes seguras de abastecimento, tornando-se mais dependentes de alternativas vulneráveis às condições climáticas e à contaminação, como açudes, poços rasos e abastecimento por carros-pipa. Essa dinâmica favorece a exposição a água de qualidade inadequada para consumo humano, aumentando o risco de doenças de veiculação hídrica e outros agravos relacionados às condições precárias de abastecimento e armazenamento domiciliar.

Os diagramas demonstraram ainda a existência de um importante ciclo de reforço associado à vulnerabilidade econômica e hídrica. Nesse ciclo, a baixa renda familiar reduz a capacidade de aquisição, armazenamento e tratamento adequado da água, aumentando a dependência de fontes inseguras. Paralelamente, o aumento dos gastos relacionados à compra, transporte ou obtenção de água compromete parte significativa da renda doméstica, reduzindo os recursos disponíveis para alimentação, saúde e melhoria das condições habitacionais. Esse processo contribui para a perpetuação das vulnerabilidades sociais e sanitárias nas comunidades investigadas.

Outro aspecto relevante identificado refere-se aos ciclos de equilíbrio relacionados à disponibilidade e ao consumo de água, especialmente no contexto do uso de cisternas. Os diagramas evidenciaram que o aumento da capacidade de armazenamento domiciliar favorece inicialmente maior disponibilidade hídrica e ampliação do consumo cotidiano. Entretanto, em períodos de estiagem prolongada e baixa recarga hídrica, o aumento do consumo contribui para redução progressiva do volume armazenado, limitando novamente a disponibilidade de água para as famílias. Essa dinâmica demonstra que, embora as cisternas constituam importante tecnologia social de convivência com o semiárido, sua efetividade permanece condicionada à regularidade das chuvas e à capacidade de reposição hídrica.

A análise sistêmica revelou ainda que a diversificação das fontes de abastecimento incluindo cisternas, poços, açudes, abastecimento encanado e carros-pipa, atua como estratégia relevante para redução parcial da insegurança hídrica nas comunidades rurais. A utilização simultânea de múltiplas

fontes possibilita maior flexibilidade no enfrentamento dos períodos de escassez e reduz a dependência exclusiva de um único sistema de abastecimento. Contudo, os diagramas evidenciaram que essa diversificação não elimina os riscos relacionados à qualidade da água, especialmente diante da utilização de fontes superficiais vulneráveis à contaminação e da ausência de tratamento adequado em parte das fontes utilizadas pelas famílias.

Além disso, observou-se que fatores climáticos, como redução das chuvas e secas prolongadas, exercem influência central sobre todo o sistema analisado, afetando diretamente a recarga dos reservatórios, a disponibilidade hídrica domiciliar e a dependência de mecanismos emergenciais de abastecimento. Nesse contexto, a insegurança hídrica mostrou-se associada não apenas à escassez física de água, mas também às limitações estruturais, econômicas e institucionais que condicionam a capacidade adaptativa das comunidades frente às mudanças climáticas.

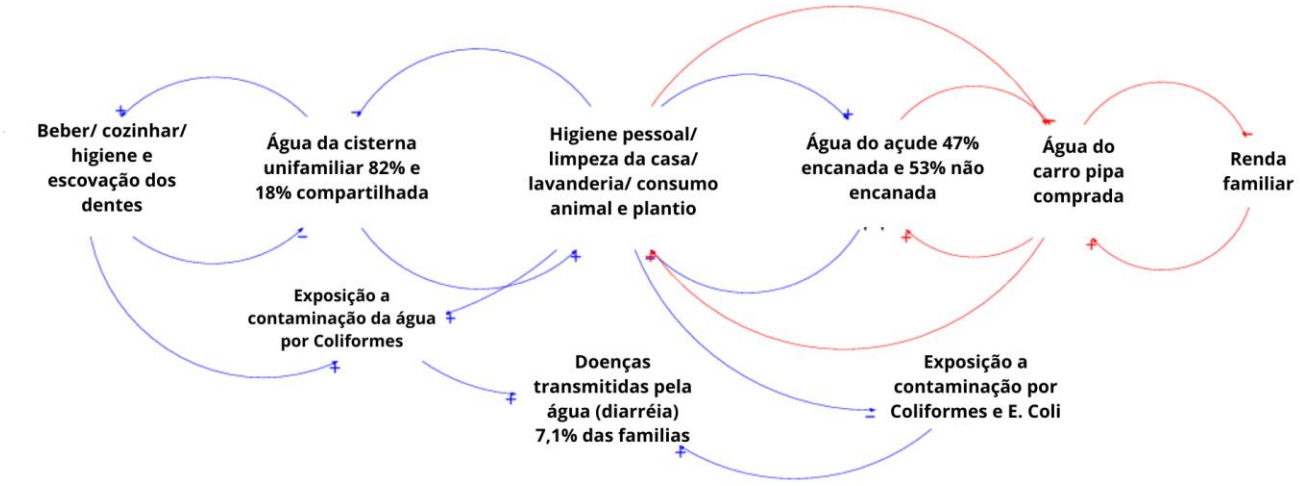


Figura 1. Diagrama de Loop causal Serrinha de Santa Maria. Autoria própria.

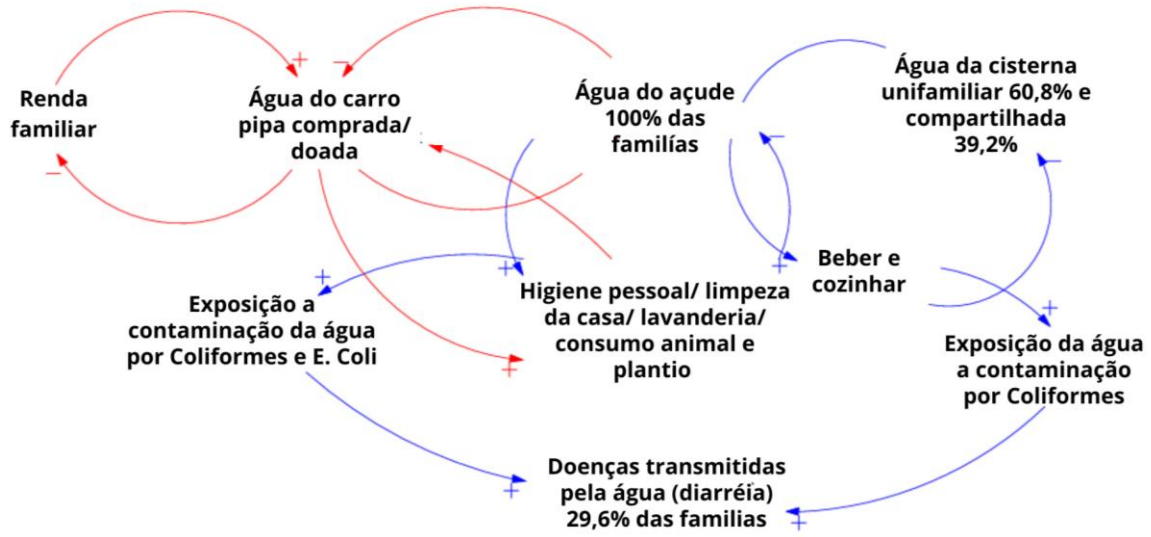


Figura 2. Diagrama de Loop causal Olho d'água do Forno. Caroline Evaristo (2025)

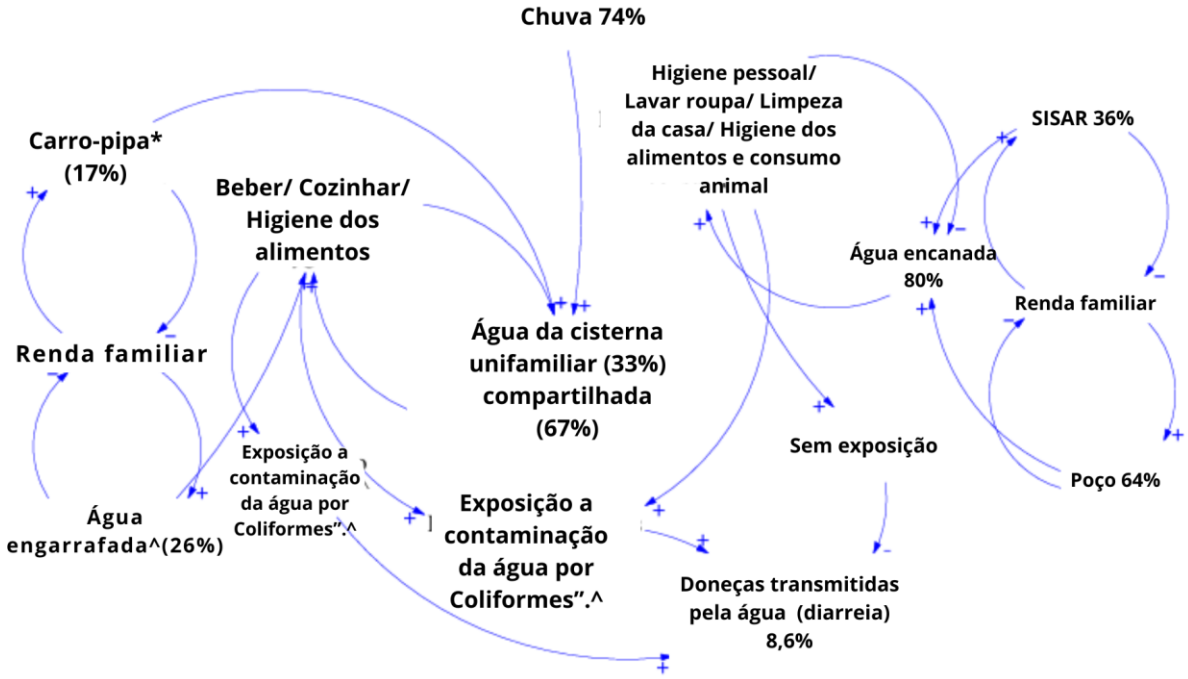


Figura 3. Diagrama de Loop causal Jatobá. Tainara Sousa (2025)

De maneira geral, os diagramas permitiram compreender que a insegurança hídrica nas comunidades estudadas constitui um fenômeno sistêmico e multifatorial, sustentado por ciclos

interdependentes de vulnerabilidade socioeconômica, precariedade estrutural e exposição aos impactos climáticos, evidenciando a necessidade de estratégias integradas de adaptação, fortalecimento da infraestrutura hídrica e promoção da segurança da água em áreas rurais do semiárido brasileiro.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A aplicação dos Diagramas de Loop Causal permitiu compreender a insegurança hídrica nas comunidades investigadas como um sistema dinâmico, multifatorial e interdependente, no qual fatores socioeconômicos, ambientais, estruturais e de saúde interagem continuamente por meio de ciclos de retroalimentação. A abordagem sistêmica evidenciou que a escassez hídrica no semiárido não se restringe à baixa disponibilidade de água, mas envolve um conjunto de vulnerabilidades relacionadas à pobreza, precariedade da infraestrutura hídrica, dependência de fontes suscetíveis à contaminação e exposição recorrente aos impactos das secas prolongadas.

Os diagramas demonstraram que variáveis como renda familiar, disponibilidade hídrica, armazenamento domiciliar, qualidade da água e ocorrência de doenças de veiculação hídrica encontram-se fortemente conectadas, influenciando diretamente as condições de vida e saúde das populações rurais. Nesse contexto, verificou-se que a vulnerabilidade socioeconômica contribui para ampliação da insegurança hídrica, ao mesmo tempo em que os custos relacionados ao acesso à água e os impactos sanitários decorrentes da utilização de fontes inadequadas reforçam os ciclos de pobreza e exclusão social.

Além disso, a análise permitiu identificar pontos críticos de intervenção relacionados ao fortalecimento da infraestrutura hídrica, ampliação do acesso a fontes seguras de abastecimento, melhoria das condições de armazenamento domiciliar e promoção da qualidade da água. Observou-se ainda que estratégias de convivência com o semiárido, como o uso de cisternas e a diversificação das fontes de abastecimento, apresentam potencial para reduzir parcialmente a vulnerabilidade hídrica, embora permaneçam limitadas pelas condições climáticas e pela irregularidade das chuvas.

A abordagem sistêmica mostrou-se relevante para compreensão integrada dos mecanismos que sustentam a insegurança hídrica em comunidades rurais vulneráveis, contribuindo para identificação de relações causais frequentemente não captadas por análises lineares tradicionais. Dessa forma, os Diagramas de Loop Causal configuram-se como ferramentas úteis para subsidiar o planejamento de políticas públicas mais integradas e sustentáveis, voltadas à promoção da segurança

hídrica, adaptação às mudanças climáticas e prevenção de doenças relacionadas à água no semiárido brasileiro.

Os achados reforçam a necessidade de estratégias intersetoriais que articulem ações de saúde, saneamento, gestão hídrica e desenvolvimento social, considerando as especificidades territoriais e as experiências das populações rurais na convivência com a seca. Assim, a incorporação de abordagens sistêmicas pode favorecer processos de tomada de decisão mais abrangentes e eficazes no enfrentamento das vulnerabilidades socioambientais associadas à insegurança hídrica.

REFERÊNCIAS

BENNETT, Elena M. et al. Systems thinking for environmental sustainability. Current Opinion in Environmental Sustainability, v. 49, p. 17-23, 2021.
FORRESTER, Jay W. Industrial Dynamics. Cambridge: MIT Press, 1961.
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2023.
JEPSON, Wendy et al. Advancing human capabilities for water security: a relational approach. Water Security, v. 1, p. 46-52, 2017.
MARENGO, José A.; ALVES, Lincoln Muniz; CUNHA, Ana Paula. A seca de 2012–2018 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. Climanálise, 2020.
MIRCHI, Ali; MADANI, Kaveh; WATKINS, David. Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. Water, v. 14, n. 3, 2022.
MOREIRA, Rafaela Pereira et al. The influence of climate, atmospheric pollution, and natural disasters on cardiovascular diseases and diabetes mellitus in drylands: a scoping review. Public Health Reviews, v. 45, art. 1607300, 2024. DOI: 10.3389/phrs.2024.1607300.
STERMAN, John D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: McGraw-Hill, 2000.
VAN VLIET, Michelle T. H. et al. Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. Nature Water, 2021.