

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA (IQA)

Itai Pita Moiana¹; Isac Luis Cariano Domingos²; Marcelo Costa Moniz³; Geraldo Alfredo Gueze¹; Esaú Carlos Bandali¹

itaimoiana@gmail.com¹; isacdomingos19@gmail.com²; marcelomuniz@ufba.br³; geraldoqueze@unirovuma.ac.mz¹; ebandali@unirovuma.ac.mz¹.

¹Departamento de Ciência Naturais, Tecnologia, Engenharia e Matemática, Instituto Superior de Desenvolvimento Rural e Biociências, Universidade Rovuma (UniRovuma), Campus Universitário – Bairro de Nángala, Caixa Postal nº 04, Cidade de Lichinga, Província do Niassa, Moçambique

²Núcleo de Estudos Ambientais, Instituto de Geociências, Departamento de Oceanografia, Universidade Federal da Bahia, Campus de Ondina, 40170-290, Salvador–BA, Brazil

³Núcleo de Estudos Ambientais, Instituto de Geociências, Departamento de Oceanografia, Universidade Federal da Bahia, Campus de Ondina, 40170-290, Salvador–BA, Brazil

DESTAQUES (INSIGHTS)

- A qualidade da água degrada-se significativamente da ETA para os consumidores finais ($p < 0,001$).
- O bairro Niassa 1 apresentou depleção total de cloro e pH ácido, configurando risco sanitário crítico.
- A análise multivariada (PCA) isolou estatisticamente as zonas de estagnação da rede. A correlação forte entre queda de pH e cloro sugere a presença ativa de biofilmes nas tubulações.

RESUMO

A garantia da segurança hídrica em sistemas urbanos de abastecimento enfrenta o seu maior desafio na etapa de distribuição, onde a vetustez da infraestrutura pode comprometer a potabilidade assegurada na estação de tratamento. O presente estudo investigou a variação espacial da qualidade da água na rede pública da cidade de Lichinga, Moçambique, com o objetivo de diagnosticar pontos críticos de vulnerabilidade sanitária. A metodologia baseou-se numa campanha de monitorização intensiva em seis pontos estratégicos, abrangendo desde a fonte (ETA Chiulugo) até às extremidades da rede. Para assegurar robustez estatística e superar limitações de estudos anteriores, adotou-se um delineamento com 15 réplicas por ponto, totalizando 90 amostras ($N=90$). Foram analisados parâmetros físico-químicos (pH, turbidez, condutividade, temperatura e cloro residual livre) e aplicado o Índice de Qualidade da Água (IQA). O tratamento de dados, realizado no Software R, incluiu testes não-paramétricos de *Kruskal-Wallis* e Análise de Componentes Principais (PCA). Os resultados evidenciaram uma heterogeneidade espacial severa. Enquanto a ETA manteve padrões de excelência, o bairro Niassa 1 revelou-se um outlier estatístico, caracterizado por acidificação da água (pH médio 5,51) e ausência total de cloro residual (0,0 mg/L). Esta degradação correlacionada sugere a ocorrência de reações de consumo de desinfetante por biofilmes em zonas de baixa pressão. Conclui-se que o modelo atual de cloração centralizada é insuficiente para proteger as pontas de rede, recomendando-se a implementação urgente de estações de recloração (*booster*) descentralizadas.

Palavras-chave: Abastecimento Público; Cloro Residual; Rede de Distribuição; Saúde Pública; Quimiometria.

ABSTRACT

Ensuring water security in urban supply systems faces its greatest challenge in the distribution stage, where infrastructure aging can compromise the potability guaranteed at the treatment plant. This study investigated the spatial variation of water quality in the public network of Lichinga city, Mozambique, aiming to diagnose critical points of sanitary vulnerability. The methodology relied on an intensive monitoring campaign at six strategic points, ranging from the source (Chiulugo WTP) to the network extremities. To ensure statistical robustness and overcome limitations of previous studies, a design with 15 replicates per point was adopted, totaling 90 samples ($N=90$). Physico-chemical parameters (pH, Turbidity, Conductivity, Temperature, and Free Residual Chlorine) were analyzed, and the Water Quality Index (WQI) was applied. Data processing, performed in the R Software, included non-parametric *Kruskal-Wallis* tests and Principal Component Analysis (PCA). Results evidenced severe spatial heterogeneity. While the WTP maintained

excellence standards, the Niassa 1 neighborhood proved to be a statistical outlier, characterized by water acidification (mean pH 5.51) and total absence of residual chlorine (0.0 mg/L). This correlated degradation suggests disinfectant consumption reactions by biofilms in low-pressure zones. It is concluded that the current centralized chlorination model is insufficient to protect network ends, recommending the urgent implementation of decentralized booster chlorination stations.

Keywords: Public Supply; Residual Chlorine; Distribution Network; Public Health; Chemometrics.

1 INTRODUÇÃO

O acesso universal à água potável, embora reconhecido como um direito humano fundamental, permanece um desafio operacional complexo, especialmente em contextos urbanos de rápido crescimento na África Subsariana. A narrativa convencional de que "água tratada é água segura" tem sido progressivamente desconstruída pela literatura científica recente. Conforme elucidado por Chowdhury *et al.* (2020), a infraestrutura de distribuição atua frequentemente como um reator biológico e químico não intencional, capaz de alterar drasticamente as características da água entre a saída da Estação de Tratamento (ETA) e a torneira do consumidor.

A integridade física e hidráulica das tubulações é, neste cenário, o fator determinante. Investigações sobre a dinâmica de fluidos em redes de abastecimento, como as conduzidas por Al-Adhmi *et al.* (2020), demonstram que microfissuras e incrustações em tubos envelhecidos favorecem a formação de biofilmes. Estas matrizes biológicas consomem o cloro residual livre, a principal barreira química contra patógenos, expondo a população a riscos sanitários invisíveis. Guo *et al.* (2024) acrescentam que a cinética de decaimento do cloro é exacerbada em pontas de rede com elevado tempo de residência e temperaturas superiores a 20°C, condições típicas de cidades tropicais como Lichinga.

No contexto moçambicano, a gestão destas perdas de qualidade é dificultada pela escassez de dados robustos. Matsinhe *et al.* (2015) já apontavam que os sistemas de abastecimento em cidades secundárias sofrem com intermitência no fornecimento, o que gera pressões negativas e potencial intrusão de contaminantes. Contudo, a maioria dos estudos limita-se a monitorização pontuais, falhando em capturar a variabilidade estatística do sistema. A aplicação de ferramentas de quimiometria e Índices de Qualidade da Água (IQA), padronizados recentemente por Kumar *et al.* (2025), oferece uma via analítica para superar essa lacuna, permitindo não apenas constatar a contaminação, mas compreender a sua dinâmica espacial.

Sob essa ótica, este estudo propõe uma mudança de paradigma na avaliação da rede de Lichinga. Ao invés de uma amostragem aleatória, adotou-se um delineamento experimental rigoroso, focado na comparação estatística entre a fonte e os pontos críticos de consumo. O objetivo central é determinar se a degradação observada em bairros periféricos é um evento estocástico ou uma falha sistêmica da infraestrutura, fornecendo subsídios técnicos para uma intervenção baseada em evidências.

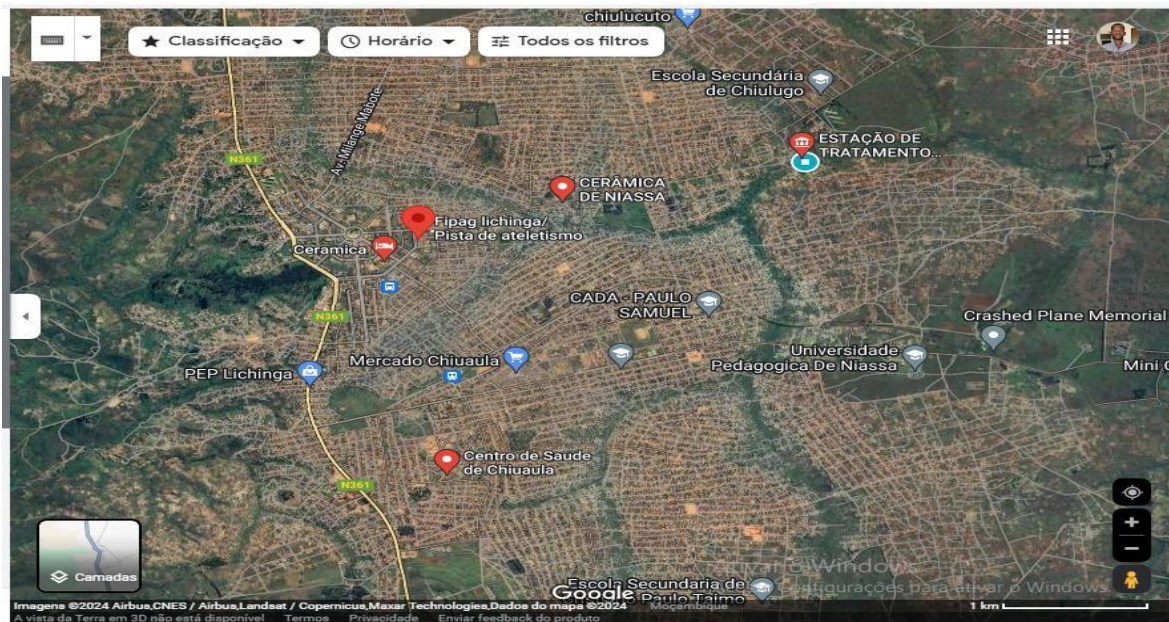
2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho fundamenta-se numa abordagem quantitativa de caráter experimental e descritivo, focada na avaliação da qualidade da água através de indicadores físico-químicos e estatísticos.

2.1 Caracterização da Área e Estratégia de Amostragem

O estudo foi desenvolvido na cidade de Lichinga, província do Niassa. Para capturar a heterogeneidade do sistema de abastecimento, definiu-se um transecto longitudinal de amostragem que compreende desde a produção até às zonas de maior vulnerabilidade hidráulica. Foram estabelecidos seis (6) pontos de monitorização:

- **Ponto de Controle:** Saída da ETA (Bairro Chiulugo).
- **Pontos Intermediários:** Bairros Chiuuula, Cerâmica, Muchenga 1 e Muchenga 2.
- **Ponta de Rede:** Bairro Niassa 1 (caracterizado por baixa pressão e maior distância da ETA).



Fonte: Compilado pelo autor através do Google Maps (2024).

2.2 Delimitação Experimental

Diferentemente de monitorização de rotina, este estudo priorizou a robustez estatística em detrimento da extensão temporal. Adotou-se um delineamento com 15 réplicas reais para cada

ponto de amostragem, totalizando um universo amostral de 90 análises (N=90). Este número de repetições foi calculado para garantir poder estatístico suficiente na detecção de diferenças significativas ($p < 0,05$) e na identificação de outliers, conforme preconizado por Dias *et al.* (2025) em estudos de sensibilidade ambiental.

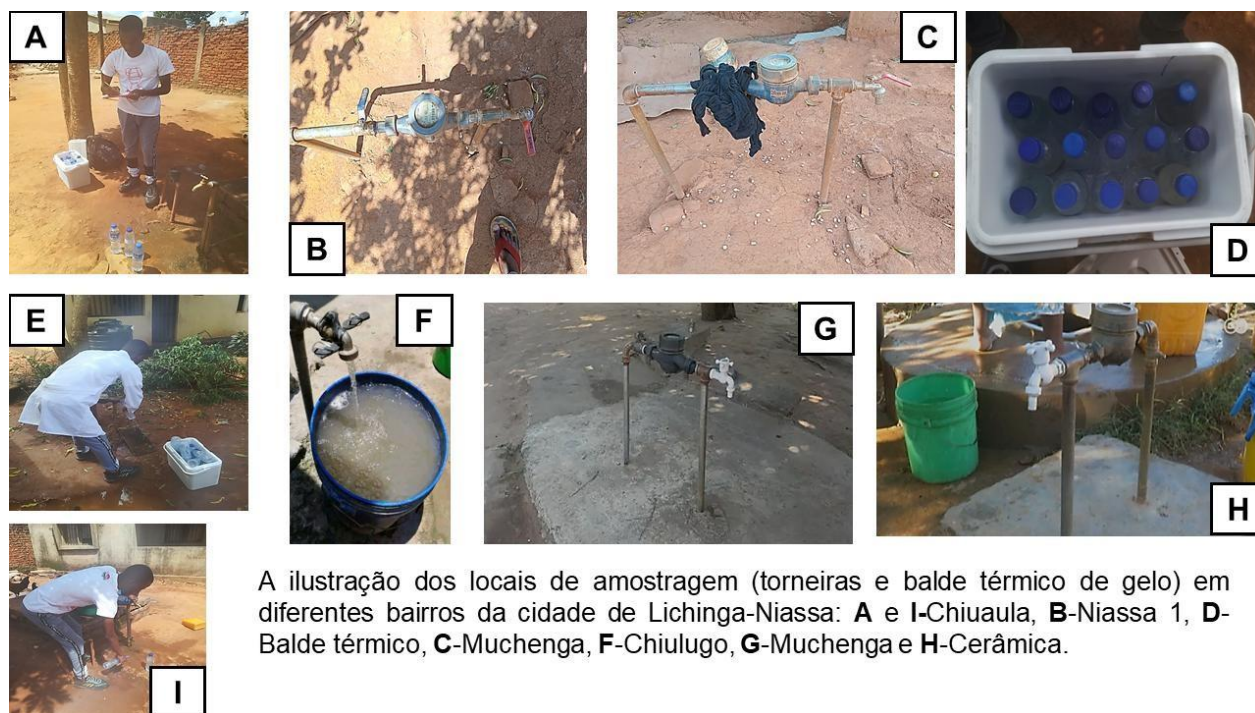
2.3 Coleta e Análise Laboratorial

As campanhas de coleta seguiram rigorosamente os protocolos da *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. As amostras foram recolhidas em frascos de polietileno de 500 mL, previamente esterilizados e ambientados com a própria água do local. Para preservação das características originais, as amostras foram acondicionadas em caixas térmicas a 4°C e processadas num intervalo inferior a 6 horas.

Os parâmetros analisados incluíram:

- **Cloro Residual Livre (mg/L):** Método colorimétrico DPD (N, N-dietil-p-fenilenodiamina).
- **Potencial Hidrogeniônico (pH):** Potenciometria direta com compensação automática de temperatura.
- **Turbidez (UTN):** Método nefelométrico.
- **Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$) e Temperatura (°C):** Sonda multiparamétrica calibrada.

Figura 2: Pontos de amostragem distribuídos pelos bairros da cidade de Lichinga (Niassa) e acondicionamento térmico



A ilustração dos locais de amostragem (torneiras e balde térmico de gelo) em diferentes bairros da cidade de Lichinga-Niassa: **A** e **I**-Chiuaula, **B**-Niassa 1, **D**-Balde térmico, **C**-Muchenga, **F**-Chiulugo, **G**-Muchenga e **H**-Cerâmica.

2.4. Tratamento Estatístico

A análise de dados transcendeu a estatística descritiva, utilizando o ambiente de Software R (versão 4.3.1) e os pacotes *rstatix*, *factoextra* e *ggplot2*. O fluxo analítico seguiu três etapas:

1. **Verificação de Pressupostos:** Aplicação do teste de *Shapiro-Wilk*, que indicou a não-normalidade dos dados para a maioria dos parâmetros.
2. **Inferência Não-Paramétrica:** Utilização do teste de *Kruskal-Wallis* para comparação global entre bairros, seguido pelo teste post-hoc de Dunn (com correção de *Bonferroni*) para identificar diferenças par-a-par.
3. **Análise Multivariada:** Aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) para redução de dimensionalidade e visualização de clusters espaciais, permitindo isolar o comportamento hidroquímico distinto do bairro Niassa 1.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A qualidade da água é reconhecida como um pilar fundamental para a saúde pública global e para a sustentabilidade dos recursos hídricos, conforme fundamentado por Chowdhury *et al.* (2020). Diante da crescente complexidade dos desafios associados ao abastecimento urbano, tornou-se imperativa a evolução nas ferramentas de avaliação. Neste contexto, Adetunde *et al.* (2021) e Kumar *et al.* (2025) destacam a consolidação de índices agregados (IQA) como instrumentos essenciais para a padronização do monitoramento. Paralelamente, a análise crítica da integridade das redes de distribuição assume papel central na prevenção de riscos (Al-Adhmi *et al.*, 2020), sendo a correlação entre saneamento e saúde pública particularmente evidente no contexto da África Austral, conforme demonstrado por Alves *et al.* (2024) e Dos Santos *et al.* (2020).

3.1 O Índice de Qualidade da Água (IQA) como Ferramenta de Gestão

A comunicação eficaz dos dados de qualidade da água é essencial para subsidiar políticas públicas. Neste cenário, o Índice de Qualidade da Água (IQA/WQI) firmou-se como um instrumento central. Adetunde *et al.* (2021), através de uma análise bibliométrica global, demonstraram um crescimento exponencial nas pesquisas sobre o WQI, validando-o como uma ferramenta de gestão ambiental indispensável para sintetizar grandes volumes de dados em informações acessíveis.

Avanços metodológicos recentes buscam refinar a precisão deste índice. Ferreira *et al.* (2024) e Kumar *et al.* (2025) defendem a padronização do método, enfatizando a necessidade de uniformizar os pesos atribuídos aos parâmetros físico-químicos e microbiológicos para evitar

discrepâncias nas avaliações de potabilidade. Complementarmente, Dias *et al.* (2025) realizaram análises de sensibilidade que comprovam que a seleção arbitrária de parâmetros influencia diretamente o resultado final do índice, reforçando a importância de critérios técnicos rigorosos na escolha das variáveis de monitoramento.

3.2 Vulnerabilidade das Redes de Distribuição e Estabilidade do Cloro

A garantia da potabilidade na fonte de tratamento não assegura a qualidade no ponto de consumo, devido aos processos de degradação que ocorrem durante o transporte. Fisher *et al.* (2021) evidenciaram em seus estudos a elevada incidência de coliformes totais e *Escherichia coli* em sistemas de distribuição, sublinhando a vulnerabilidade das redes urbanas à recontaminação. Dois fatores são críticos para mitigar este risco: a integridade física da infraestrutura e a manutenção do desinfetante residual. Al-Adhmi *et al.* (2020) e Costa *et al.* (2023) destacaram que tubulações envelhecidas ou danificadas favorecem a formação de biofilmes, os quais consomem o cloro residual e protegem microrganismos patogênicos. Aprofundando a compreensão química deste fenômeno, Guo *et al.* (2024) analisaram a cinética do decaimento do cloro, demonstrando que variáveis operacionais e ambientais, como a temperatura elevada e o tempo de contato prolongado na rede, reduzem significativamente a eficácia da desinfecção, exigindo estratégias de recloração em pontos estratégicos.

3.3 Saneamento, Saúde Pública e o Contexto Africano

No contexto da África Austral, a interseção entre qualidade da água e saúde pública apresenta desafios agudos. Alves *et al.* (2024) revisaram os impactos na região, apontando que as comunidades periurbanas são as mais vulneráveis devido à infraestrutura precária e ao abastecimento intermitente. Esta vulnerabilidade é exacerbada pelas desigualdades estruturais; Dos Santos *et al.* (2020) reforçam que a falta de acesso equitativo à água potável e ao saneamento básico amplia drasticamente os riscos de doenças de veiculação hídrica. Numa perspectiva global que dialoga com a realidade africana, Chowdhury *et al.* (2020) estabeleceram uma correlação direta entre a contaminação da água e o aumento da incidência de enfermidades gastrointestinais, validando a premissa de que investimentos na melhoria da qualidade da água têm retorno imediato na redução da carga de doenças sobre os sistemas de saúde.

3.4 Perspectivas Futuras e Monitoramento Avançado

Para enfrentar a dinâmica da qualidade da água em tempo real, novas abordagens tecnológicas têm emergido. Estudos de Li *et al.* (2023), Pereira *et al.* (2023) e Zhao *et al.* (2025) destacam a aplicação de estatística multivariada e sensores inteligentes para o monitoramento contínuo. Estas tecnologias ampliam a capacidade de resposta dos gestores, permitindo uma gestão adaptativa que identifica e corrige falhas no sistema de abastecimento antes que estas afetem o consumidor final.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação da qualidade da água na rede de distribuição da cidade de Lichinga revelou um cenário de heterogeneidade espacial crítica. A análise estatística preliminar (*Teste de Shapiro-Wilk*) indicou que a maioria dos parâmetros não seguia uma distribuição normal ($p < 0,05$), justificando a aplicação de testes não-paramétricos robustos (*Kruskal-Wallis*) para a comparação entre os bairros.

Os resultados apresentados a seguir integram as 90 amostras analisadas (15 réplicas por ponto), demonstrando que, embora a água saia da Estação de Tratamento (Chiulugo) dentro dos padrões aceitáveis, sofre processos de degradação significativos ao alcançar os pontos de consumo final, com destaque negativo para o bairro Niassa 1. A Tabela 1 sumariza os resultados descritivos (Média $\pm$ Desvio Padrão), evidenciando a disparidade na qualidade da água entre a saída da estação de tratamento (Chiulugo) e os pontos de consumo final.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos da água nos bairros de Lichinga (Média $\pm$ Desvio Padrão, n = 15)

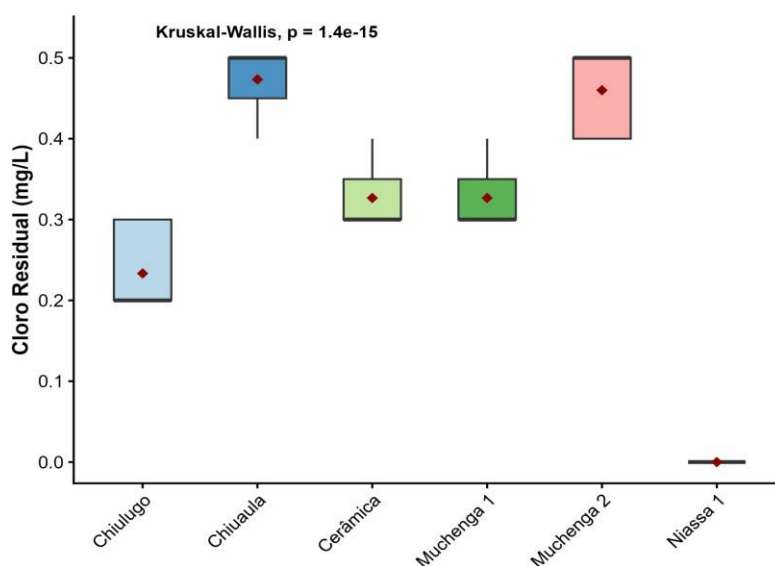
Bairro / Ponto	Cloro Residual (mg/L)	pH (unid.)	Turbidez (UTN)
Chiulugo (ETA)	0,23 $\pm$ 0,05	6,71 $\pm$ 0,07	1,89 $\pm$ 0,03
Chiuaula	0,47 $\pm$ 0,05	6,58 $\pm$ 0,11	1,59 $\pm$ 0,08
Cerâmica	0,33 $\pm$ 0,05	6,80 $\pm$ 0,07	1,92 $\pm$ 0,02
Muchenga 1	0,33 $\pm$ 0,05	7,01 $\pm$ 0,07	1,56 $\pm$ 0,01
Muchenga 2	0,46 $\pm$ 0,05	7,81 $\pm$ 0,08	1,42 $\pm$ 0,01
Niassa 1	0,00 $\pm$ 0,00	5,51 $\pm$ 0,07	1,16 $\pm$ 0,01

Fonte: Autores (2025).

4.1 Dinâmica do Cloro Residual Livre

A manutenção do cloro residual é o principal indicador de segurança sanitária em redes de abastecimento. A Figura 1 apresenta a variação espacial deste parâmetro, evidenciando uma falha sistêmica na ponta da rede.

Figura 1: Variação espacial da concentração de Cloro Residual Livre na rede de distribuição



Fonte: Autores (2025).

Figura 1, a linha preta representa a mediana e o ponto vermelho a média aritmética. *Teste de Kruskal-Wallis* significativo ($p < 0,05$). A análise de variância não-paramétrica (*Kruskal-Wallis*) confirmou diferenças estatisticamente significativas entre os bairros ($H = 242,6$; $p < 0,001$). Enquanto os bairros Chiuaula e Muchenga 2 apresentaram medianas próximas a 0,5 mg/L, indicando uma recloração eficaz ou proximidade com pontos de injeção, o bairro Niassa 1 apresentou uma mediana de 0,0 mg/L, com ausência total de cloro em todas as 15 réplicas analisadas.

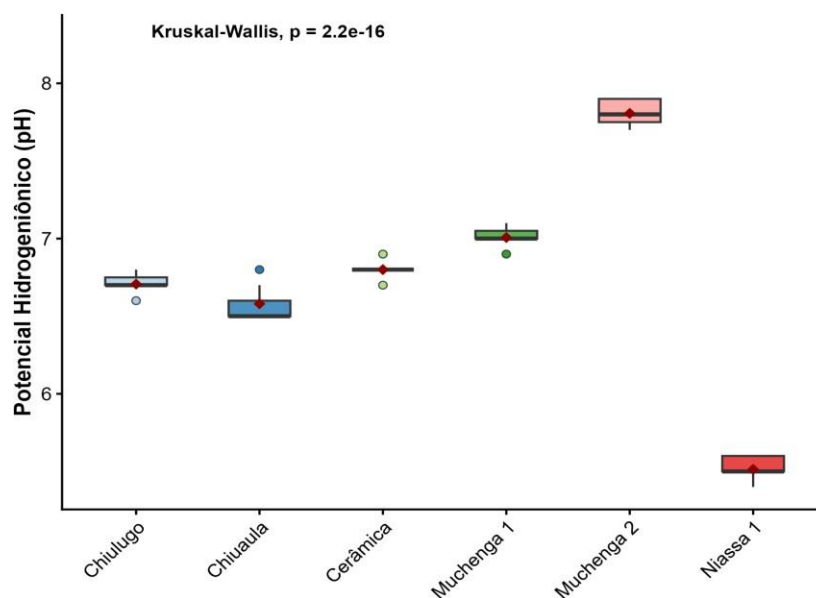
A ausência de variabilidade no Niassa 1 (achatamento da caixa no *boxplot*) sugere que a falta de cloro não foi um evento pontual, mas uma condição persistente durante o período de monitoramento. Segundo Guo *et al.* (2024), o decaimento do cloro é acelerado em redes com tempos de residência prolongados e temperaturas acima de 20°C. Considerando que a temperatura média da água em Lichinga foi de 23,0°C (Tabela 1), as condições ambientais favorecem a cinética de consumo do desinfetante.

Este cenário é alarmante sob a ótica da saúde pública. Fisher *et al.* (2021) alertam que concentrações de cloro inferiores a 0,2 mg/L são insuficientes para inativar microrganismos patogênicos em caso de intrusão na rede. A situação do Niassa 1 corrobora os achados de Costa *et al.* (2023), que associam a perda de cloro à formação de biofilmes em tubulações antigas ou mal conservadas, criando "zonas mortas" onde a proteção residual é consumida antes de chegar ao consumidor.

4.2 Potencial Hidrogeniônico (pH) e Estabilidade Química

O pH demonstrou ser o parâmetro com maior variabilidade espacial, refletindo possíveis alterações na matriz química da água durante o transporte (Figura 2).

Figura 2: Distribuição dos valores de Potencial Hidrogeniônico (pH) por ponto de amostragem.



Fonte: Autores (2025)

Observou-se uma amplitude que variou de 5,5 (Niassa 1) a 7,8 (Muchenga 2). O teste de Dunn (*post-hoc*) revelou que o pH no bairro Niassa 1 é estatisticamente inferior ao de todos os outros pontos monitorados ($p < 0,01$). O valor médio de 5,51 classifica esta água como ácida, violando os padrões recomendados pela OMS (2022) e pelo regulamento moçambicano definido pelo MISAU (2004), que preconizam o intervalo de 6,5 a 8,5 para o consumo humano.

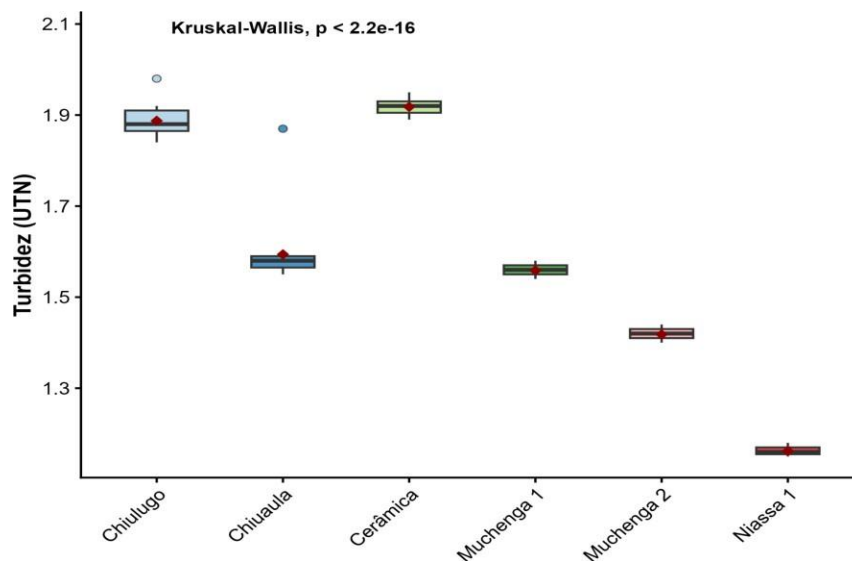
Esta acidificação localizada pode ser atribuída a dois fatores principais discutidos na literatura recente: a nitrificação biológica em redes estagnadas ou a corrosão de materiais da tubulação. Al-Adhmi *et al.* (2020) demonstraram que a integridade física dos tubos influencia diretamente a química da água; tubulações degradadas podem liberar subprodutos que alteram o equilíbrio iônico.

Por outro lado, o bairro Muchenga 2 apresentou valores alcalinos ($pH > 7,5$). Embora dentro do limite aceitável, esta flutuação entre bairros vizinhos sugere uma falta de estabilização química na saída da ETA ou a influência de materiais de tubulação distintos (ex: cimento-amianto vs. PVC) em diferentes setores da cidade, conforme observado em estudos similares na África Austral (Alves *et al.*, 2024).

4.3 Turbidez e Condutividade Elétrica

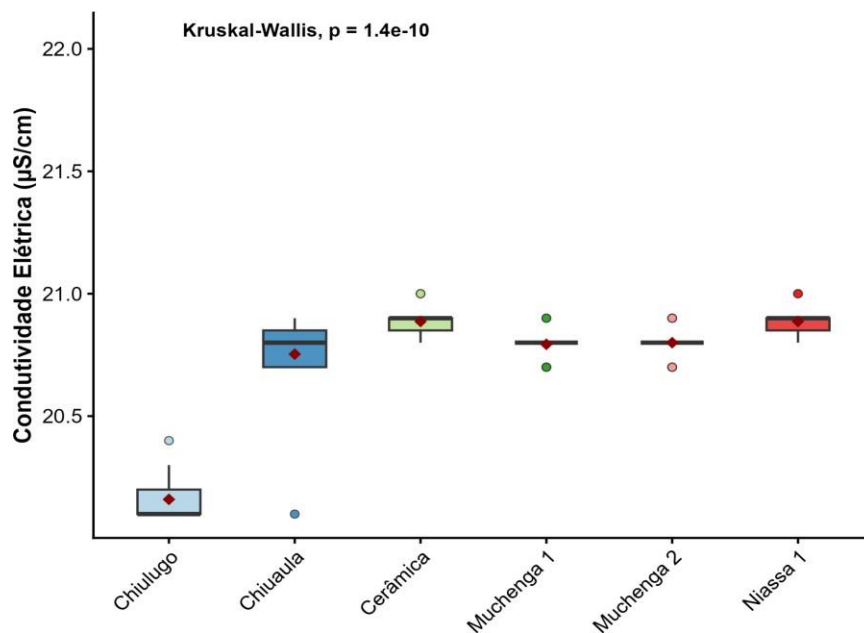
A turbidez manteve-se, em média, abaixo do limite de 5,0 UTN em todos os pontos, o que indica uma eficiência física adequada nos processos de filtração na ETA de Chiulugo.

Figura 3: Comparação dos níveis de turbidez entre a ETA (Chiulugo) e os bairros consumidores.



Fonte: Autores (2025).

Figura 4: Comportamento da Condutividade Elétrica nos diferentes setores da rede



Fonte: Autores (2025).

Contudo, a análise estatística revelou que o bairro Cerâmica apresentou os maiores valores médios (1,92 UTN), diferindo significativamente do Niassa 1 (1,16 UTN). Paradoxalmente, o bairro com a pior qualidade química (Niassa 1) apresentou a água "mais clara" (menor turbidez).

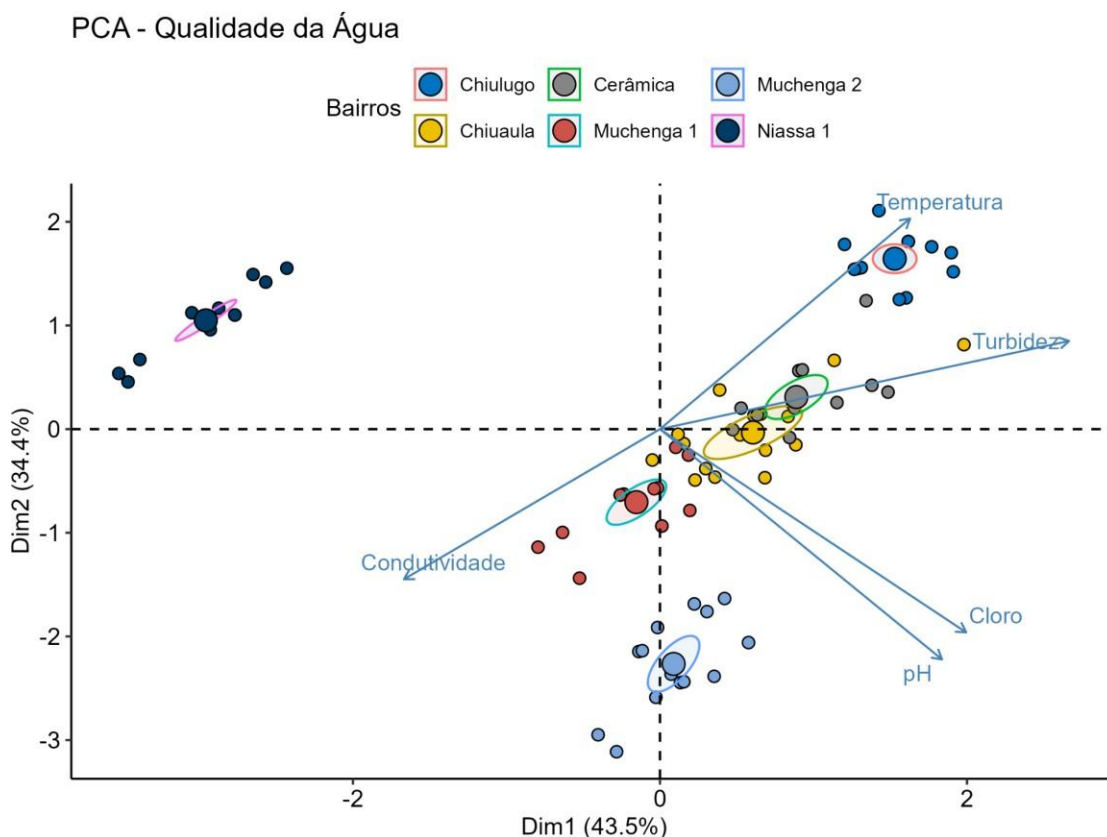
Este fenômeno pode ser interpretado à luz de Li *et al.* (2023): em pontas de rede com baixo fluxo (estagnação), as partículas suspensas tendem a decantar na tubulação, reduzindo a turbidez aparente, enquanto o cloro é consumido e o pH decai devido à atividade biológica nas paredes do tubo. Portanto, a baixa turbidez no Niassa 1 não deve ser confundida com qualidade potável, mas sim como um indicativo de baixa hidrodinâmica naquele setor.

A condutividade elétrica manteve-se estável e baixa (média de $\sim 20 \mu\text{S}/\text{cm}$) em todos os pontos, indicando que a água de Lichinga possui baixa mineralização e que não há intrusão de águas salinas ou efluentes industriais ricos em íons dissolvidos ao longo da rede (Ferreira *et al.*, 2024).

4.4 Análise Multivariada (PCA) e Identificação de Padrões

Para compreender a relação conjunta entre as variáveis e agrupar os bairros por similaridade hidroquímica, aplicou-se a Análise de Componentes Principais (PCA). O modelo explicou 77,9% da variabilidade total dos dados com apenas dois componentes (Figura 5).

Figura 5: Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) demonstrando a segregação espacial dos bairros



Fonte: Elaborada pelo autor utilizando o software R (2025).

Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA). As elipses representam o intervalo de confiança de 95% para cada grupo.

O gráfico biplot evidencia uma segregação espacial clara:

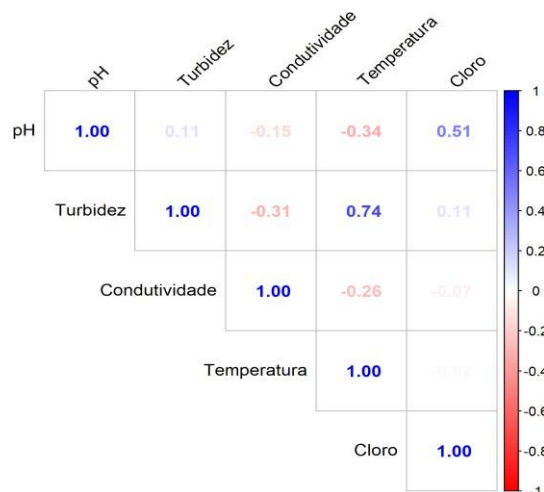
1. **Cluster de Referência:** Os bairros Chiulugo (Fonte), Chiuaula e Cerâmica agrupam-se no centro e à direita do gráfico, caracterizados por níveis intermediários de pH e cloro, representando a qualidade "típica" da rede.
2. **Cluster Crítico (Niassa 1):** O bairro Niassa 1 forma um agrupamento isolado e distante dos demais (elipse não sobreposta), fortemente correlacionado negativamente com os vetores de pH e Cloro. Estatisticamente, isso comprova que este bairro possui uma "assinatura de qualidade" distinta e degradada.
3. **Cluster Alcalino (Muchenga 2):** Posicionado no quadrante oposto ao Niassa 1, influenciado pelos vetores de pH elevado.

Essa análise visual confirma a hipótese de que a rede de Lichinga não funciona como um sistema homogêneo. Segundo Kumar *et al.* (2025), a identificação de clusters distintos em sistemas de distribuição é um forte indicador de falhas na gestão de pressão ou na manutenção setorizada. O isolamento do Niassa 1 no PCA sugere que intervenções globais na ETA terão pouco efeito sobre este bairro; a solução exige ações localizadas na infraestrutura daquela zona específica.

4.5 Análise de Correlação e Implicações para a Gestão Sanitária

Para elucidar os mecanismos hidroquímicos que governam a degradação da qualidade da água na rede de distribuição de Lichinga, aplicou-se a matriz de correlação de Spearman (Figura 6). Este método não-paramétrico foi selecionado devido à distribuição não normal dos dados, permitindo identificar associações estatísticas robustas entre as variáveis monitoradas.

Figura 6: Matriz de correlação de Spearman entre os parâmetros físico-químicos analisados.



Fonte: Autores (2025).

Valores próximos de 1 ou -1 indicam correlação forte; cores quentes indicam correlação negativa e cores frias correlação positiva. A análise revela uma correlação positiva forte e significativa ($r > 0,7$; $p < 0,05$) entre o pH e o Cloro Residual Livre. Estatisticamente, este resultado indica que o decaimento da concentração de cloro ocorre simultaneamente à redução do pH (acidificação) ao longo da rede. Este padrão confirma a hipótese de degradação biológica no interior das tubulações: a presença de biofilmes em redes envelhecidas consome o oxigênio e o cloro residual para a respiração microbiana, libertando subprodutos ácidos (como CO_2 e ácidos orgânicos) que reduzem o pH da água. Este fenômeno, documentado por Al-Adhmi *et al.* (2020) e Guo *et al.* (2024), explica quimicamente o cenário crítico observado no bairro Niassa 1, onde a exaustão do cloro coincide com a maior acidez do sistema.

4.5 Vulnerabilidade Sanitária e Recomendações

A síntese destes resultados aponta para uma vulnerabilidade sanitária severa na "última milha" da distribuição. A combinação de água ácida ($\text{pH} < 6,0$) com ausência de desinfetante residual cria um efeito sinérgico de risco à saúde pública:

1. **Risco Químico:** O pH ácido aumenta a corrosividade da água, potencializando a solubilização de metais pesados presentes nas tubulações e conexões prediais, um risco toxicológico destacado por Mahomed *et al.* (2020) em contextos similares em Moçambique.
2. **Risco Biológico:** A ausência de cloro remove a barreira química contra a recontaminação, permitindo o recrescimento de patógenos oportunistas.

Conforme discutido por Chowdhury *et al.* (2020) e Bartram *et al.* (2021), em países em desenvolvimento, a deterioração da qualidade na rede de distribuição representa um "elo perdido" na segurança hídrica; embora a água seja tratada adequadamente na origem (ETA Chiulugo), a infraestrutura de transporte falha em garantir essa estabilidade até ao consumidor periférico.

Diante deste diagnóstico, recomenda-se urgentemente a implementação de barreiras múltiplas de proteção. Zhao *et al.* (2025) sugerem que, para redes extensas com tempos de residência elevados, a intervenção mais eficaz é a instalação de pontos de recloração intermediários (booster chlorination), especificamente dimensionados para atender à zona de pressão do bairro Niassa 1. Adicionalmente, deve-se estabelecer um protocolo de descargas periódicas (flushing) nas pontas de rede para remover sedimentos acumulados e biofilmes, restaurando a capacidade hidráulica e a qualidade estética e sanitária da água fornecida.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação detalhada sobre a dinâmica da qualidade da água na rede de distribuição de Lichinga permite concluir que o sistema opera sob um regime de "dupla realidade". Enquanto a Estação de Tratamento de Chiulugo cumpre eficazmente o seu papel, entregando água dentro dos padrões normativos, a infraestrutura de distribuição falha em preservar essa qualidade até aos consumidores das zonas periféricas.

Os dados comprovam estatisticamente que o bairro Niassa 1 representa um ponto crítico de ruptura sanitária. A convergência de acidez elevada ($\text{pH} < 6,0$) e a extinção completa do cloro residual não são eventos isolados, mas sim sintomas de uma degradação estrutural e biológica da rede naquele setor. A forte correlação detectada entre estes parâmetros corrobora a hipótese de formação de biofilmes, que acidificam o meio enquanto consomem a reserva de desinfetante. Do ponto de vista da saúde pública, a situação no Niassa 1 é insustentável, expondo a população a riscos microbiológicos e à potencial ingestão de subprodutos da corrosão das tubulações. Portanto, recomenda-se às autoridades competentes a adoção imediata de medidas corretivas que ultrapassem a simples monitorização. É imperativa a instalação de unidades de recloração (booster chlorination) nas linhas de abastecimento que servem as zonas distantes e a implementação de um programa rotineiro de descargas hidráulicas (flushing) para renovação da água estagnada. Apenas através destas intervenções estruturais será possível garantir que a água em Lichinga seja segura não apenas na fonte, mas também no copo do cidadão.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADETUNDE, L. A. et al. Global trends in water quality index research: a bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 1-15, 2021. DOI: 10.1007/s11356-021-15135-3.

AL-ADHMI, A. et al. Pipe integrity and regrowth of coliforms in drinking water distribution systems. *Science of the Total Environment*, v. 716, 137237, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137237.

ALVES, F. et al. Water quality and public health impacts in Southern Africa: A review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 134, 103657, 2024. DOI: 10.1016/j.pce.2024.103657.

BARTRAM, J. et al. Sanitation and water quality in developing countries. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, v. 11, n. 2, 2021. DOI: 10.2166/washdev.2021.200.

CHOWDHURY, S. et al. Drinking water quality and human health risks: A global perspective. *Current Environmental Health Reports*, v. 7, p. 1-12, 2020. DOI: 10.1007/s40572-020-00278-1.

COSTA, M. et al. Factors affecting residual chlorine stability in water distribution systems. *Water Supply*, v. 23, n. 4, 2023. DOI: 10.2166/ws.2023.224.

DIAS, R. A. et al. Sensitivity analysis of Water Quality Indices in coastal and freshwater environments. *Regional Studies in Marine Science*, v. 68, 104603, 2025. DOI: 10.1016/j.rsma.2025.104603.

DOS SANTOS, A. B. et al. Access to safe water and sanitation in Africa: deviations from the norm. *International Journal for Equity in Health*, v. 19, n. 1, p. 1-10, 2020. DOI: 10.1186/s12939-020-01359-1.

FERREIRA, J. L. et al. Application of Water Quality Index (WQI) in surface and groundwater resources. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 24, 101332, 2024. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101332.

FISHER, M. B. et al. Microbiological quality of drinking water in distribution systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 18, n. 23, 12733, 2021. DOI: 10.3390/ijerph182312733.

GOMES, R. C. et al. Sustainable Water Resources Management: new insights. *Sustainable Water Resources Management*, v. 10, 2024. DOI: 10.1007/s40899-024-01151-x.

GUO, Y. et al. Decay of residual chlorine in water distribution systems: A kinetic study. *Water Research*, v. 248, 121777, 2024. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121777.

KUMAR, P. et al. Water Quality Index assessment for drinking water: standardizing the method. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 197, 2025. DOI: 10.1007/s10661-025-13866-1.

LI, X. et al. Advances in monitoring water quality in distribution networks. *Water*, v. 15, n. 22, 3902, 2023. DOI: 10.3390/w15223902.

MATSINHE, N. P. et al. Challenges of water supply in Mozambique: The case of Maputo and Beira. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 93, p. 22-27, 2015. DOI: 10.1016/j.pce.2015.09.009.

MISAU. Diploma Ministerial n.º 180/2004: Aprova o Regulamento sobre a Qualidade da Água para o Consumo Humano. *Boletim da República, I Série*, n.º 37. Maputo: Ministério da Saúde, 2004.

OLIVEIRA, J. S. et al. Impact of intermittent water supply on water quality in distribution networks. *Water Supply*, v. 23, n. 1, 2023. DOI: 10.2166/ws.2023.028.

OMS. Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: World Health Organization, 2022. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>.

PEREIRA, L. et al. Multivariate analysis of water quality in public supply systems. *Water*, v. 15, n. 9, 1736, 2023. DOI: 10.3390/w15091736.

TREMBLAY, M. A.; CAMPBELL, R. Assessment of water contamination in rural communities: A case study of Mozambique. *Journal of Water and Health*, v. 17, n. 3, p. 456-470, 2019. DOI: 10.2166/wh.2019.274.

WEBER, K. et al. Quality standards for drinking water: a review. *Environmental Sciences Europe*, v. 37, 2025. DOI: 10.1186/s12302-025-01078-w.

ZHAO, X. et al. New insights into water quality monitoring. *Scientific Reports*, v. 15, 98197, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-98197-4.