

Potabilidade de águas oriundas de fontes alternativas de abastecimento em municípios do Paraná

Potability of water from alternative supply sources in municipalities of Paraná

Guilherme Pinheiro Dias Kruger¹ , Kelly Geronazzo Martins¹ 

Citação: Kruger, G. P. D. & Martins, K. G. (2025).

Potabilidade de águas oriundas de fontes alternativas de abastecimento em municípios do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 10, e025007
<https://doi.org/10.18554/rbcti.v10i00.8579>

Recebido: 04 set. 2025

Aceito: 31 out. 2025

Publicado: 30 dez. 2025



Copyright: este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença de atribuição Creative Commons, que permite uso irrestrito, distribuição, e reprodução em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1. Universidade Estadual do Centro-Oeste RORIX, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Iriti (PR), Brasil.

* Autor correspondente: gui.pdkruger@gmail.com

RESUMO: A potabilidade de águas de fontes alternativas no Paraná é essencial para garantir saúde pública, qualidade de vida e sustentabilidade ambiental. Este estudo avaliou a qualidade da água em municípios do Paraná, com foco na presença de *Escherichia coli* (*E. coli*), coliformes totais e os parâmetros físico-químicos, pH, temperatura, condutividade e dureza, correlacionando esses dados com informações de gênero e raça/cor das populações. As amostras foram coletadas em parceria com a Quarta Regional de Saúde e analisadas na UNICENTRO. Os resultados revelaram presença de *E. coli* e coliformes, indicando contaminação fecal e problemas relacionados ao saneamento básico. Em relação aos parâmetros físico-químicos, a condutividade elétrica não apresentou valores fora de conformidade nos municípios. Já a turbidez foi de 15,5 uT em Guamiranga, excedendo o valor máximo permitido. Variáveis socioeconômicas também mostraram correlação com a qualidade da água, evidenciando melhores condições em áreas urbanizadas. Os resultados indicaram a inadequação da infraestrutura de saneamento nas áreas rurais, expondo populações a riscos à saúde pública, e ressaltam a urgência de implementação de políticas públicas para garantir acesso equitativo à água potável.

Palavras-chave: Equidade de gênero, Qualidade da água, Saneamento rural, Vulnerabilidade socioambiental.

ABSTRACT: The potability of water from alternative sources in Paraná is essential to ensure public health, quality of life, and environmental sustainability. This study assessed water quality in Paraná municipalities, focusing on the presence of *Escherichia coli* (*E. coli*), total coliforms, and physicochemical parameters such as pH, temperature, conductivity, and hardness, correlating these findings with gender and race/color data of the populations. Samples were collected in partnership with the Fourth Health Region and analyzed at UNICENTRO. Results revealed the presence of *E. coli* and coliforms, indicating fecal contamination and issues related to basic sanitation. Regarding physicochemical parameters, electrical conductivity showed some non-compliant values in the municipalities. Turbidity reached 15.5 NTU in Guamiranga, exceeding the maximum permissible value. Socioeconomic variables also correlated with water quality, showing better conditions in urbanized areas. The findings highlighted inadequate sanitation infrastructure in rural areas, exposing populations to public health risks and underscoring the urgent need for public policies to ensure equitable access to potable water.

Keywords: Gender equity, Rural sanitation, Socio-environmental vulnerability, Water quality.

1. Introdução

O acesso à água potável é fundamental tanto para a saúde pública quanto para a dignidade e sobrevivência humana. A qualidade da água, influenciada pela presença de patógenos como *E. coli* e parâmetros como turbidez, está diretamente relacionada ao risco de transmissão de doenças. Além de ser essencial para a saúde, o acesso à água potável e ao saneamento básico é crucial para o desenvolvimento social e econômico das populações. Estudos demonstram que a melhoria nos serviços de abastecimento de água traz benefícios significativos, como a redução das taxas de mortalidade infantil e o aumento da expectativa de vida (Pasini & Damke, 2020).

No âmbito dos direitos humanos, os Estados são reconhecidos como responsáveis por garantir a proteção e a promoção dos direitos humanos, incluindo o direito fundamental à água. Isso implica que os governos têm a obrigação de garantir que todos os indivíduos, enquanto titulares desses direitos, tenham acesso a água potável e segura, essencial para uma vida digna e saudável (Heller, 2022).

No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888/2021, do Ministério da Saúde, estabelece diretrizes para o controle e a vigilância da qualidade da água por meio do Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Vigiagua), com o objetivo de assegurar que a água fornecida atenda aos padrões de potabilidade e segurança (Brasil, 2021). Esse progresso tem conduzido à implementação de sistemas de tratamento de água e ao desenvolvimento de normas regulatórias para assegurar a qualidade da água.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) e outras entidades internacionais têm promovido diretrizes e padrões para garantir a segurança e a qualidade da água destinada ao consumo humano. Desde a publicação das primeiras diretrizes da OMS em 1956, os critérios mínimos de qualidade da água foram aprimorados progressivamente ao longo dos anos (Fortes *et al.*, 2019).

No contexto brasileiro, a conformidade com essas normas e a transparência na divulgação das informações sobre a qualidade da água são aspectos essenciais para garantir o acesso seguro e adequado à água, refletindo a importância das ações de controle e vigilância para a proteção da saúde pública e do meio ambiente.

Nas zonas rurais, é comum que o abastecimento de água seja feito por fontes alternativas, muitas vezes consideradas de excelente qualidade e "puras" devido ao senso comum da população (Valias *et al.*, 2000).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade das águas de fontes alternativas no Centro-Sul do Paraná, considerando parâmetros microbiológicos e físico-químicos. A pesquisa também buscou identificar diferenças entre os municípios e correlacionar os resultados com variáveis populacionais, como raça/cor, gênero e idade, para compreender como esses fatores podem influenciar a percepção e os impactos da qualidade da água nas diferentes comunidades.

2. Métodos

Os municípios analisados no presente estudo foram Fernandes Pinheiro, Guamiranga, Rio Azul, Inácio Martins, Rebouças, Imbituva, Mallet, Irati e Teixeira Soares, localizados na região centro-sul do estado do Paraná.

A coleta das amostras de água foi realizada no primeiro semestre de 2024, em domicílios rurais selecionados de forma a representar as principais fontes alternativas de abastecimento utilizadas pela população local, incluindo poços escavados, nascentes e poços artesianos. Os procedimentos de amostragem seguiram os protocolos estabelecidos pela NBR 15847 (ABNT, 2015), contemplando a esterilização prévia dos pontos de coleta com álcool 70%, a coleta em frascos de polietileno previamente esterilizados, o acondicionamento das amostras em caixas isotérmicas contendo gelo e o transporte imediato para análise laboratorial, a fim de preservar a integridade física-química e microbiológica das amostras.

O transporte das amostras foi realizado em colaboração com a Quarta Regional de Saúde, responsável pelo encaminhamento até o Laboratório de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO – Campus Irati). Nesse

laboratório, foram conduzidas as análises microbiológicas para a determinação dos indicadores *Escherichia coli* (*E. coli*) e coliformes totais. Paralelamente, no laboratório BIO3 da UNICENTRO – Campus Iriti, foram realizadas as análises físico-químicas para a determinação dos parâmetros de pH, temperatura, condutividade elétrica, dureza e turbidez da água, para posterior comparação com padrões de potabilidade da água (Tabela 1).

Tabela 1 - Padrões de potabilidade segundo a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021

Parâmetro	Padrão de Potabilidade
<i>E. coli</i>	Ausência em 100 mL de amostra
CT	Para fontes alternativas, 1 em 100 mL
pH	6,0 a 9,5
Temperatura	Não especificado
Turbidez	1,0 uT (unidades de turbidez) em 95% das amostras. 5,0 uT no restante das amostras mensais coletadas.
Condutividade	O valor máximo recomendado 1.500 µS/cm
Dureza	O valor máximo recomendado 300 mg/L de CaCO ₃

Fonte: Portaria GM/MS nº 888/2021 adaptado pelo autor.

As análises laboratoriais foram executadas conforme os métodos padronizados descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017). O pH foi determinado pelo método eletrométrico (método 4500-H⁺), a condutividade elétrica pelo método 2510 B, a turbidez pelo método nefelométrico (método 2130 E), enquanto os coliformes totais e *E. coli* foram quantificados pelo método 9222 J. A determinação de endosporos bacterianos seguiu o método 9218 B, conforme especificações da mesma referência.

No total, foram obtidas 25 amostras únicas de água. A distribuição por município ocorreu da seguinte forma: três amostras em Fernandes Pinheiro (uma de poço, uma de nascente e uma de poço artesiano); três amostras em Guamiranga (duas de poços e uma de nascente); três amostras em Rio Azul (duas de poço e uma de nascente); duas amostras em Inácio Martins (uma de poço e uma de nascente); três amostras em Rebouças (uma de poço, uma de nascente e uma de poço artesiano); três amostras em Imbituba (uma de poço, uma de nascente e uma de poço artesiano); três amostras em Mallet (uma de poço, uma de nascente e uma de poço artesiano); três amostras em Irati (uma de poço, uma de nascente e uma de poço artesiano); e duas amostras em Teixeira Soares (uma de poço e uma de nascente). Para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados, cada amostra única foi analisada em triplicata para todos os parâmetros investigados.

As práticas de tratamento da água nas localidades estudadas apresentam um cenário dual. Nos Sistemas de Abastecimento Comunitário (SAC), onde a água é distribuída coletivamente, aplica-se o tratamento centralizado, sendo a cloração o método de desinfecção predominante. Entretanto, para as fontes de abastecimento individuais — poços, nascentes e poços artesianos de uso particular —, que constituem o foco deste estudo, não há tratamento coletivo prévio. Nesses casos, conforme diretrizes da vigilância sanitária, a desinfecção é de responsabilidade do usuário, sendo realizada no âmbito domiciliar por meio de dois protocolos recomendados: i) fervura seguida de filtração, ou ii) cloração seguida de filtração.

As variáveis relacionadas ao sexo e à raça/cor dos moradores de cada município foram obtidas a partir dos dados do Censo Demográfico de 2020, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A análise estatística dos dados foi realizada utilizando uma versão de teste do software STATISTICA 7.0 e o ambiente RStudio. O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, considerando como variáveis dependentes os parâmetros de turbidez, condutividade elétrica, pH, *E. coli* e coliformes totais. Os municípios e os tipos de fonte de abastecimento (poço artesiano, poço escavado e nascente) foram definidos como fatores experimentais. As variáveis sociodemográficas de raça/cor e gênero foram utilizadas em análises de correlação de Pearson.

Adicionalmente, buscou-se identificar semelhanças e diferenças entre os municípios da região, bem como correlacionar os resultados de qualidade da água com variáveis populacionais, como raça/cor, gênero e classe etária, por meio da aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA). Essa técnica estatística multivariada foi empregada com o objetivo de identificar padrões multivariados entre as variáveis físico-químicas, microbiológicas e sociodemográficas avaliadas, permitindo reduzir o conjunto de variáveis originais em novas dimensões não correlacionadas, denominadas Componentes Principais (Dim). Para a construção da matriz de dados utilizada na PCA, foram empregadas as médias dos valores obtidos para cada variável por município, integrando as informações provenientes das diferentes campanhas de amostragem.

Nessa etapa, não foi considerada a estratificação das amostras por tipo de fonte de abastecimento (poço escavado, poço artesiano ou nascente), de modo a reduzir a dimensionalidade dos dados e possibilitar uma análise integrada em escala municipal. A PCA foi realizada a partir de uma matriz padronizada, centrada e escalada pela variância, de forma a equalizar a contribuição das variáveis com diferentes unidades de medida. A interpretação dos resultados baseou-se no Gráfico dos Indivíduos, que permite a visualização de agrupamentos e outliers entre os municípios, e no Gráfico das Variáveis, que evidencia a contribuição e a correlação entre os parâmetros analisados, possibilitando uma análise integrada da qualidade da água e do perfil sociodemográfico das populações estudadas.

3. Resultados e discussão

Com base nos padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (Tabela 1), foram analisados os parâmetros de qualidade da água nas diferentes fontes alternativas dos municípios estudados. As amostras foram coletadas no ponto de consumo. O que permite avaliar a qualidade da água efetivamente disponível para uso pela população, representando a condição final da água, seja ela proveniente de um sistema comunitário (após possível tratamento centralizado) ou de fontes individuais, independentemente de qualquer tratamento domiciliar adicional que possa ou não ser realizado pelos usuários.

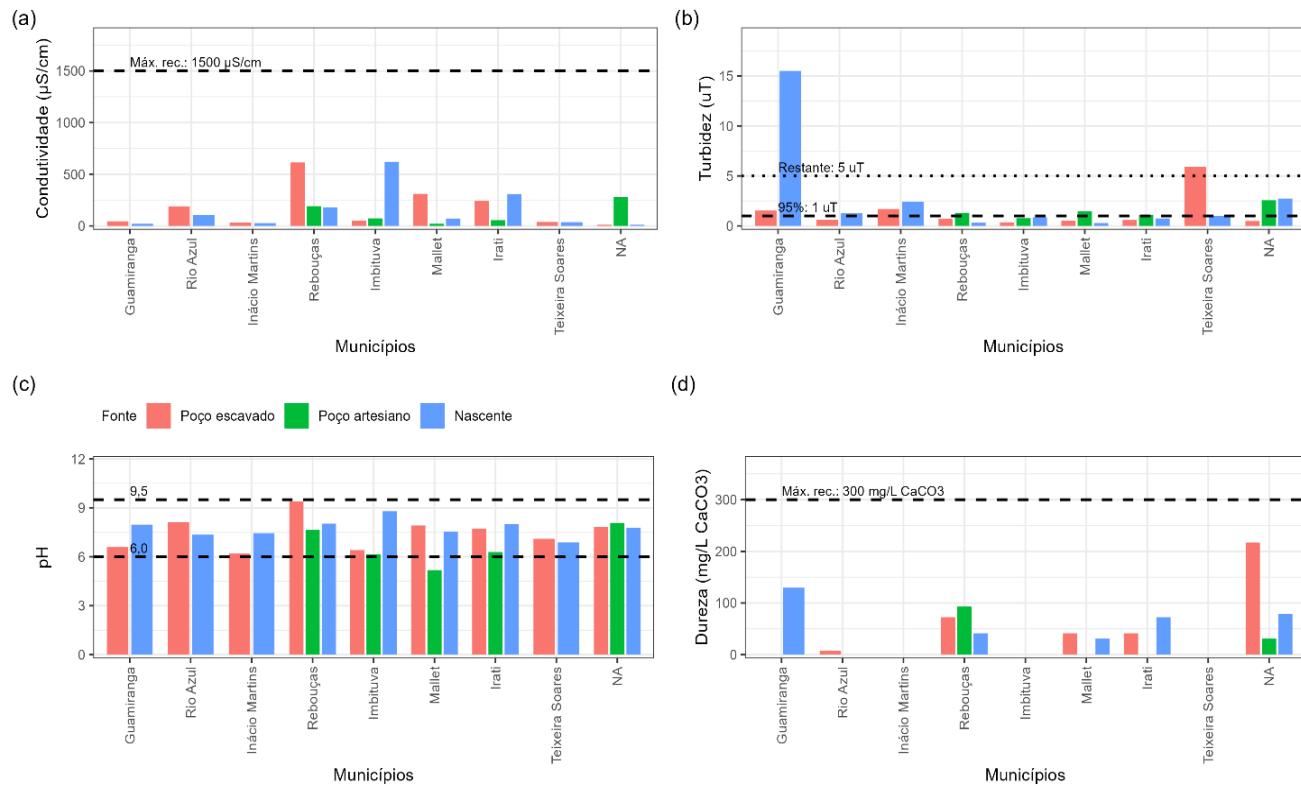
Na Figura 1 são apresentados quatro parâmetros de qualidade da água nos municípios analisados: condutividade (a), turbidez (b), pH (c) e dureza (d), com medições em poços escavados, nascentes e poços artesianos.

A faixa de pH observada encontra-se dentro dos limites considerados normais, não evidenciando influência antrópica significativa na qualidade da água. Estudos anteriores, como o de Carvalho, Ferreira e Stapelfeldt (2004), corroboram essa observação, indicando que o pH de águas superficiais tende a permanecer estável na ausência de fatores perturbadores. Entretanto, destaca-se que o pH, por si só, não é um indicador suficientemente sensível ou confiável para diagnosticar possíveis contaminações, sendo necessário combiná-lo com outros parâmetros físico-químicos e microbiológicos para uma avaliação mais abrangente da qualidade da água.

Em relação à dureza da água, Fernandes Pinheiro apresentou o maior valor entre os municípios, especialmente em poços escavados, com um valor próximo a 220 mg/L de CaCO₃. Em contrapartida, Guamiranga apresentou valores significativamente menores, em torno de 50 mg/L de CaCO₃ para nascentes. Nos municípios de Rio Azul e Inácio Martins, os valores de dureza foram próximos de zero tanto em nascentes quanto em poços artesianos. Rebouças apresentou maiores valores de dureza em poços artesianos, atingindo cerca de 50 mg/L de CaCO₃, enquanto em Imbituva os valores foram mais elevados nos poços artesianos, aproximando-se de 100 mg/L de CaCO₃. Já os municípios de Mallet, Irati e Teixeira Soares apresentaram dureza moderada, variando entre 25 e 50 mg/L de CaCO₃, sendo que Irati e Teixeira Soares mostraram valores semelhantes em poços escavados e nascentes.

Com base nas faixas classificatórias estabelecidas (Alvarado & Herrera, 1999), a dureza da água é categorizada em: água branda (0-60 mg/L de CaCO₃), água moderadamente dura (61-120 mg/L de CaCO₃), água dura (121-180 mg/L de CaCO₃) e água muito dura (acima de 180 mg/L de CaCO₃). Conforme essa classificação, os resultados encontrados nos municípios variaram desde água branda até água muito dura.

Figura 1 - Parâmetros de qualidade da água (condutividade (a), turbidez (b), pH (c) e dureza (d)) em diferentes fontes de abastecimento nos municípios do Paraná



A dureza da água variou significativamente entre os municípios, com níveis mais altos em Fernandes Pinheiro e mais baixos em Guamiranga. Esses dados indicam a presença de minerais como cálcio e magnésio, que, embora não representem risco direto à saúde, afetam a qualidade da água quanto ao sabor e à formação de incrustações em sistemas hidráulicos. Importante destacar que os valores de dureza observados se mantiveram abaixo do limite de 300 mg/L de CaCO_3 estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021), o que indica conformidade com os padrões de potabilidade.

A condutividade da água variou entre os municípios, mas todos os valores permaneceram dentro dos limites normativos. Municípios como Rebouças e Imbituva apresentaram condutividades mais elevadas, o que pode estar associado à geologia local. Além disso, pode indicar a existência de possíveis fontes de poluição (ROSA; UCKER, 2019).

Quanto ao pH, Fernandes Pinheiro apresentou valores ligeiramente alcalinos em poços escavados. Guamiranga e Rio Azul mantiveram pH próximo ao neutro. Inácio Martins apresentou aumento de pH em nascentes, enquanto Rebouças teve valores mais baixos. Já Imbituva mostrou pH mais elevado em nascentes. Mallet, Iraty e Teixeira Soares mantiveram pH próximo ao neutro, com pequenas variações entre os tipos de fonte. Observa-se maior variação de pH em poços escavados, embora todos os valores estejam dentro da faixa usual e aceitável.

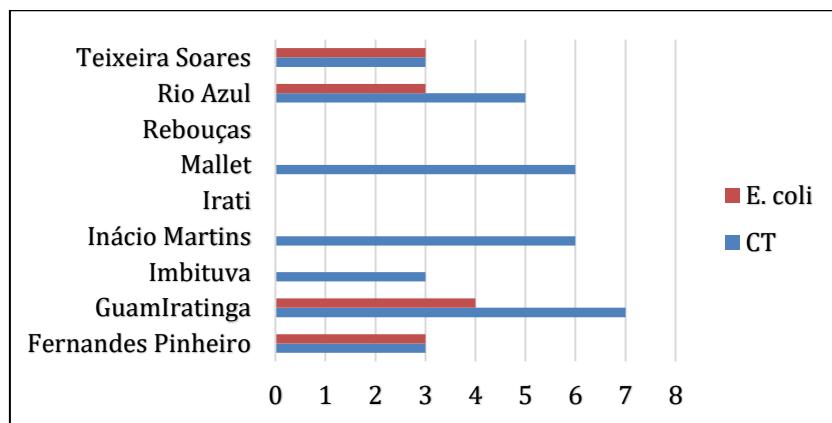
A faixa de pH observada não evidencia influência antrópica significativa, estando dentro dos padrões esperados. Conforme apontado por Carvalho, Ferreira e Stapelfeldt (2004), o pH de águas superficiais tende a permanecer estável na ausência de fontes de contaminação. Ainda assim, o pH isoladamente não é um indicador suficientemente sensível para diagnosticar contaminações, sendo necessário associá-lo a outros parâmetros físico-químicos e microbiológicos.

Em relação à turbidez, Guamiranga apresentou os valores mais elevados, com picos acima de 18 uT, principalmente em nascentes. Nos demais municípios, a turbidez permaneceu baixa, variando pouco entre os diferentes tipos de fonte. Municípios como Fernandes Pinheiro, Rio Azul, Inácio Martins, Rebouças, Imbituva, Mallet, Iraty e Teixeira Soares apresentaram turbidez próxima de zero a dois.

Embora não esteja necessariamente relacionada a riscos sanitários imediatos, a turbidez indica a presença de partículas em suspensão que podem abrigar microrganismos patogênicos, conforme apontado por Perpétuo (2014) e von Sperling (2005).

A Figura 2 apresenta os dados referentes a quantidade de vezes que foi detectado a presença de *E. coli* e CT nas amostras analisadas.

Figura 2. Soma da presença de CT e *E. coli* nas amostras coletadas por município



Das amostras analisadas, Guamiranga teve destaque apresentando maior número de amostras com presença de CT e *E. coli*, seguida por Inácio Martins e Mallet que também apresentaram maior presença de CT, nas amostras dos municípios de Rebouças e Iratí não foi detectado a presença de CT ou *E. coli*, indicando que as medidas para garantir a qualidade da água nesses municípios são eficientes.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam um padrão de qualidade da água compatível com aquele observado em investigações recentes conduzidas no estado do Paraná, que também analisaram fontes alternativas de abastecimento utilizadas em áreas rurais. Santos *et al.* (2023) identificaram que a contaminação por coliformes totais e *E. coli* constitui o principal fator de risco à potabilidade da água em sistemas alternativos, resultado convergente com os achados do presente estudo, no qual as inconformidades microbiológicas se concentraram majoritariamente em poços escavados e nascentes.

De forma semelhante, Manzatto *et al.* (2023), ao avaliarem fontes alternativas de abastecimento no Paraná, observaram elevada frequência de amostras em desacordo com os padrões microbiológicos, mesmo quando os parâmetros físico-químicos se mantinham dentro dos limites recomendados. Esse comportamento também foi observado neste estudo, reforçando que a ausência de contaminação físico-química não implica, necessariamente, segurança sanitária da água consumida.

A variabilidade dos resultados entre os municípios analisados também encontra respaldo na literatura. Santos *et al.* (2023) destacam que fatores locais, como tipo de fonte, uso do solo no entorno e práticas domiciliares de manejo da água, influenciam significativamente os níveis de contaminação microbiológica. Essa heterogeneidade espacial é compatível com os resultados observados neste trabalho, nos quais municípios geograficamente próximos apresentaram perfis distintos de qualidade da água.

Além disso, Manzatto *et al.* (2023) demonstraram que as inconformidades na qualidade da água tendem a coincidir com áreas caracterizadas por maior vulnerabilidade social, evidenciando que a exposição a riscos sanitários está associada a desigualdades estruturais no acesso a serviços e tecnologias de abastecimento. Os resultados do presente estudo reforçam essa interpretação, ao indicar que a qualidade da água proveniente de fontes alternativas permanece como um fator crítico para populações rurais, mesmo em regiões com relativa disponibilidade hídrica.

Dessa forma, a comparação com estudos conduzidos sob metodologias semelhantes evidencia que os resultados aqui apresentados não constituem um fenômeno isolado, mas refletem um padrão regional de vulnerabilidade hídrica associado ao uso de fontes alternativas de abastecimento, especialmente no que se refere à contaminação microbiológica.

3.1 Marcadores de vulnerabilidade, raça cor gênero

Na Tabela 2 são apresentadas as análises de correlações de Pearson e valores de significância entre as variáveis sociodemográficas e as variáveis de qualidade da água. Observou-se relações significativas entre as variáveis sociodemográficas e as variáveis de qualidade da água, com ênfase nos valores de p menores que 0,10. A população branca apresentou uma correlação negativa significativa com a presença de *E. coli* ($r = -0,45$, $p = 0,05$) e a turbidez ($r = -0,30$, $p = 0,10$), sugerindo que áreas com maior proporção de população branca tendem a ter melhor qualidade da água. Por outro lado, a condutividade apresentou uma correlação positiva ($r = 0,70$, $p = 0,02$), possivelmente associada à fatores geológicos ou à presença de minerais dissolvidos na água.

Tabela 2 - Correlações de Pearson e valores de p entre variáveis sociodemográficas e de qualidade da água em municípios do estado do Paraná

Variável	<i>E. coli</i> (r)	<i>E. coli</i> (p)	Turbidez (r)	Turbidez (p)	Condutividade (r)	Condutividade (p)
População Amarela	0,15	0,25	0,35	0,08	0,05	0,70
População Branca	-0,45	0,05	-0,30	0,10	0,70	0,02
População Indígena	0,20	0,15	0,10	0,30	-0,25	0,12
População Parda	-0,50	0,03	-0,40	0,05	0,60	0,04
População Preta	0,10	0,30	0,25	0,12	0,15	0,25
Homens	-0,40	0,05	-0,35	0,08	0,65	0,03
Mulheres	-0,35	0,08	-0,30	0,10	0,60	0,04

A população parda apresentou padrões semelhantes aos da população branca, com correlações negativas significativas para *E. coli* ($r = -0,50$, $p = 0,03$) e turbidez ($r = -0,40$, $p = 0,05$), e uma correlação positiva com a condutividade ($r = 0,60$, $p = 0,04$). Essa última pode refletir condições ambientais ou práticas de uso da terra que influenciam a qualidade da água. Estudos como o de Batista (2004) indicam que condutividades mais altas podem estar associadas a contaminação por agrotóxicos.

As variáveis relacionadas ao gênero também apresentaram correlações significativas. O número de homens mostrou correlações negativas com *E. coli* ($r = -0,40$, $p = 0,05$) e turbidez ($r = -0,35$, $p = 0,08$), enquanto a correlação com a condutividade foi positiva ($r = 0,65$, $p = 0,03$). Mulheres seguiram um padrão semelhante, com correlações negativas para *E. coli* ($r = -0,35$, $p = 0,08$) e turbidez ($r = -0,30$, $p = 0,10$), e uma correlação positiva com a condutividade ($r = 0,60$, $p = 0,04$). Esses resultados sugerem que a distribuição de gênero pode estar associada a fatores comportamentais ou de infraestrutura de saneamento.

Em resumo, as correlações de Pearson indicam que variáveis sociodemográficas como a composição étnica e o gênero podem ter uma influência significativa na qualidade da água, especialmente em relação à presença de *E. coli*, turbidez e condutividade. As correlações negativas com *E. coli* e turbidez sugerem que áreas com maior proporção de populações branca e parda, bem como maior número de homens e mulheres, tendem a ter melhor qualidade da água.

As variáveis de pH e temperatura não alcançaram coeficientes de correlação significantes. Em relação à presença de *E. coli* e coliformes totais, ambas estão de acordo com os resultados encontrados nos estudos de Amaral *et al.* (2003), Oliveira (2008) e Rocha *et al.* (2006) sobre a qualidade da água em áreas rurais. A contaminação por *E. coli* foi significativa nos municípios de Fernandes Pinheiro, Guamiranga, Rio Azul e Teixeira Soares, onde os laudos de análise de água indicaram níveis de contaminação fora dos padrões legais estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021). Isso sugere uma forte ligação com o uso inadequado do solo e a falta de tratamento de esgoto, corroborando estudos de Mendonça, Moreira e Rossoni (2019) e Malheiros *et al.* (2009), que indicam

que a contaminação microbiológica por coliformes é um problema recorrente em áreas com baixa infraestrutura de saneamento.

Os resultados refletem desafios significativos na gestão de recursos hídricos em áreas rurais do Paraná. A presença de *E. coli*, coliformes totais e a turbidez fora dos padrões indicam que a infraestrutura de saneamento nessas áreas é inadequada e que as populações dependentes de soluções alternativas de abastecimento estão expostas a riscos à saúde pública.

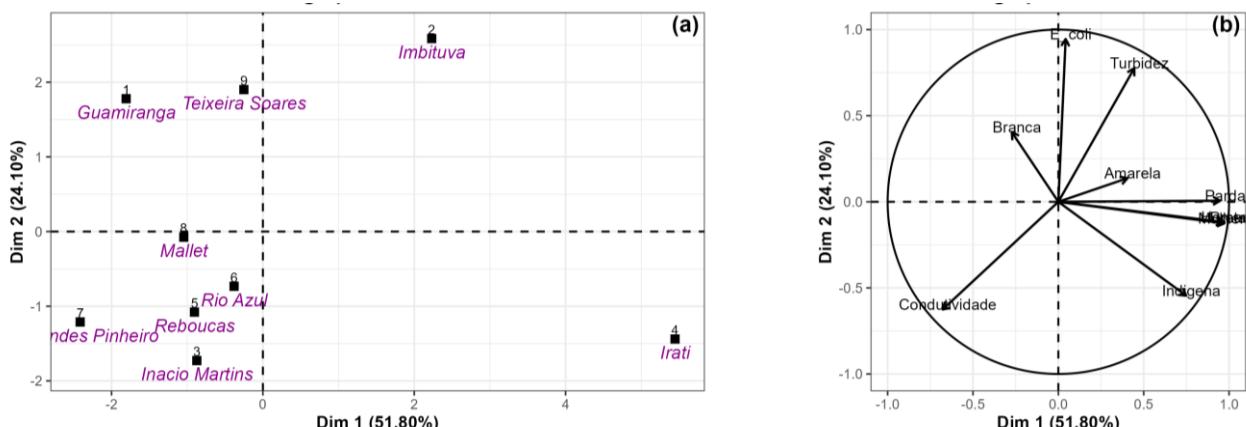
3.2 Análise de componentes principais (ACP)

A Figura 3 apresenta a análise de componentes principais (ACP) dos municípios, dividida em duas partes:

(a) Gráfico dos indivíduos: Ilustra a distribuição dos municípios em função das duas dimensões principais, que juntas explicam 75,90% da variabilidade dos dados (Dim 1: 51,80%; Dim 2: 24,10%). Essas dimensões refletem combinações das variáveis analisadas, incluindo fatores relacionados à qualidade da água (turbidez, pH, temperatura, condutividade e *E. coli*) e características sociodemográficas (composição étnica e proporção de gênero).

(b) Gráfico das variáveis: Mostra a contribuição e as correlações das variáveis para as mesmas duas dimensões principais (Dim 1: 51,80%; Dim 2: 24,10%). As variáveis representam tanto aspectos da qualidade da água (turbidez, pH, temperatura, condutividade e *E. coli*) quanto fatores sociodemográficos (composição étnica e proporção de gênero).

Figura 3 - Análise de componentes principais (PCA) aplicada aos dados da qualidade da água: (a) gráfico de dispersão dos indivíduos; (b) gráfico de contribuição das variáveis



A PCA, conduzida a partir das médias municipais das variáveis analisadas, evidenciou padrões de associação entre os parâmetros físico-químicos, microbiológicos e sociodemográficos, permitindo discriminar os municípios ao longo dos dois primeiros eixos principais. A utilização de valores médios possibilitou a identificação de tendências gerais, minimizando o efeito de variações pontuais associadas às campanhas de amostragem e aos diferentes tipos de fonte de abastecimento. Dessa forma, a ordenação refletiu diferenças estruturais entre os municípios, associadas à composição populacional e às condições de qualidade da água, destacando gradientes ambientais e sanitários relevantes. Os resultados indicam que a abordagem adotada é adequada para explorar relações multivariadas em escala municipal, fornecendo subsídios para a interpretação integrada dos fatores que influenciam a qualidade da água e o contexto socioambiental analisado.

Na Dim 1 (Figura 3a), observa-se que a separação dos municípios ocorre principalmente em função de variáveis associadas à qualidade da água, com destaque para a turbidez e a presença de *E. coli*, que apresentaram elevada correlação positiva nessa dimensão. Essa configuração indica que a Dimensão 1 representa um gradiente de vulnerabilidade sanitária, no qual municípios posicionados

mais à direita do gráfico tendem a apresentar piores condições microbiológicas e físico-químicas da água. O posicionamento isolado de Irati no extremo direito sugere um comportamento distinto em relação aos demais municípios, possivelmente associado à maior ocorrência de contaminação microbiológica ou maior variabilidade nos parâmetros analisados. Em contrapartida, municípios agrupados próximos ao centro do gráfico, como Rio Azul e Mallet, indicam maior homogeneidade nos resultados, refletindo condições intermediárias de qualidade da água.

O Gráfico dos Indivíduos (Figura 3a) evidencia, portanto, padrões espaciais relevantes, nos quais municípios como Irati e Teixeira Soares se destacam como outliers em diferentes direções do plano fatorial. Essa diferenciação sugere a necessidade de estratégias específicas de gestão e intervenção localizadas, uma vez que os fatores que influenciam a qualidade da água não se distribuem de forma homogênea entre os municípios analisados. Esse comportamento corrobora os achados de Santos *et al.* (2023), que identificaram elevada heterogeneidade espacial na contaminação por coliformes totais e *E. coli* em fontes alternativas de abastecimento no Sul do Brasil, associando esses padrões à proteção inadequada das fontes e à ausência de tratamento sistemático.

No Gráfico das Variáveis (Figura 3b), a Dim 1 concentra as variáveis turbidez e *E. coli*, ambas com vetores longos e orientados na mesma direção, indicando forte correlação positiva e elevada contribuição para a variância explicada. Esse resultado reforça que a contaminação microbiológica, frequentemente associada à presença de material particulado e à turbidez elevada, constitui o principal fator discriminante entre os municípios. Por outro lado, a condutividade elétrica apresenta vetor orientado em direção oposta à Dim 1, sugerindo correlação negativa com turbidez e *E. coli*. Esse padrão indica que águas com maior carga microbiológica não necessariamente apresentam maiores concentrações de sais dissolvidos, refletindo diferenças nos processos de contaminação e nas características hidrogeoquímicas das fontes.

A Dim 2 (Figura 3b) apresenta maior associação com variáveis sociodemográficas, como população parda, indígena e amarela, além das variáveis relacionadas ao gênero. A proximidade e o paralelismo desses vetores indicam correlação positiva entre essas variáveis, sugerindo que a Dimensão 2 reflete principalmente o perfil populacional dos municípios. Esse resultado aponta que aspectos sociodemográficos contribuem para diferenciar os municípios em uma dimensão distinta daquela associada diretamente à qualidade da água, evidenciando que a vulnerabilidade hídrica não é apenas um fenômeno ambiental, mas também social.

As correlações observadas entre variáveis microbiológicas e sociodemográficas reforçam os achados de Manzatto *et al.* (2023), que mapearam grupos vulneráveis no estado do Paraná e identificaram maior exposição a riscos sanitários em municípios com maior dependência de fontes alternativas de abastecimento e maior presença de populações socialmente vulnerabilizadas. Segundo os autores, a combinação entre características sociais e limitações estruturais no acesso ao saneamento contribui para a persistência de padrões de risco à saúde associados ao consumo de água inadequada.

Adicionalmente, estudos internacionais apontam que a permanência desses padrões de vulnerabilidade está relacionada a desafios estruturais na implementação sustentável de soluções de tratamento em áreas rurais. Lauwen e Nowicki (2024) destacam que fatores institucionais, governança local e capacidade de operação e manutenção das tecnologias influenciam diretamente a eficácia das intervenções, o que ajuda a explicar por que municípios com fontes de abastecimento semelhantes apresentam resultados distintos de qualidade da água. De forma complementar, Edokpayi *et al.* (2018) demonstraram que, em comunidades rurais, a variabilidade da qualidade da água ao longo do tempo e entre localidades está fortemente associada à ausência de tratamento adequado e à vulnerabilidade socioeconômica das populações atendidas.

Assim, a Análise de Componentes Principais reforça os resultados obtidos nas análises descritivas, ao evidenciar que a contaminação microbiológica constitui o principal elemento diferenciador entre os municípios estudados (Dim 1), enquanto os aspectos sociodemográficos contribuem para explicar padrões secundários de variabilidade (Dim 2). Esses achados confirmam que a qualidade da água em áreas rurais resulta da interação entre fatores ambientais e sociais, destacando a centralidade da vulnerabilidade sanitária como um desafio persistente para a garantia do direito humano à água segura.

4. Conclusões

Os dados sobre a qualidade da água nas fontes alternativas de abastecimento na região centro-sul do Paraná destacam uma série de problemas relacionados à contaminação microbiológica e à infraestrutura inadequada de saneamento. A contaminação por *E. coli*, valores de turbidez fora dos padrões e os níveis de condutividade e dureza variáveis refletem um cenário de precariedade que afeta diretamente a saúde pública dessas comunidades, especialmente as mais vulneráveis.

Os resultados obtidos apontam para a necessidade urgente de melhorias nos sistemas de monitoramento e gestão da qualidade da água, bem como para a implementação de políticas públicas que garantam o acesso equitativo à água potável, especialmente para populações indígenas e mulheres que enfrentam maior vulnerabilidade.

Referências

- Alvarado, D. M. & Herrera, N. A. (1999). Caracterización y distribución por cantones de la dureza del agua en las fuentes utilizadas para consumo humano en Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 8(15), 1-15.
- Amaral, L. A., Nader Filho, A., Rossi Jr., O. D., Ferreira, F. L. A. & Barros, L. S. S. (2003). Água de consumo humano como fator de risco à saúde em propriedades rurais. *Revista de Saúde Pública*, 37, 510-514. <https://doi.org/10.1590/S0034-89102003000400017>
- American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environment Federation (WEF). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23. ed. Washington, D.C.: APHA/AWWA/WEF, 2017. 1504 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 15847: Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento – Método de purga*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- Batista, L. F. R. (2004). *Caracterização da degradação hídrica no alto e médio rio das Velhas a partir da condutividade elétrica das águas*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Brasil. Ministério da Saúde. *Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021*. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/GM/MS, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF. https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_24_05_2021_rep.html
- Carvalho, C. F., Ferreira, A. L. & Stapelfeldt, F. (2004). Qualidade das águas do ribeirão Ubá – MG. *Revista Escola de Minas*, 57(3), 165-172. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672004000300005>
- Edokpayi, J. N. et al. (2018). Challenges to sustainable safe drinking water: A case study of water quality and use across seasons in rural communities in Limpopo Province, South Africa. *Water*, 10(2), 159.
- Fortes, A. C. C., Barrocas, P. R. G. & Kligerman, D. C. (2019). A vigilância da qualidade da água e o papel da informação na garantia do acesso. *Saúde em Debate*, 43(spe 3), 20-34. <https://doi.org/10.1590/0103-11042019S302>
- Heller, L. (2022). Direitos humanos à água e ao saneamento. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). *Censo demográfico de 2020*. <https://www.ibge.gov.br>
- Laauwen, M. & Nowicki, S. (2024). Reinforcing feedbacks for sustainable implementation of rural drinking-water treatment technology. *ACS ES&T Water*, 4(4), 1763-1774. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00779>

Malheiros, P. S., Schäfer, D. F., Herbert, I. M., Capuani, S. M., Silva, E. M. & Sardiglia, C. U. (2009). Contaminação bacteriológica de águas subterrâneas da região oeste de Santa Catarina, Brasil. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, 68(2), 305-308. <https://doi.org/10.53393/rial.2009.v68.32731>

Manzatto, C., Silva, J. R. & Costa, L. A. (2023). Water from alternative supply sources in Paraná State: Potability and map of vulnerable groups. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 8(2), 122-131. <https://doi.org/10.18554/rbcti.v8i2.XXXX>

Mendonça, R. O. L., Moreira, S. M. & Rossoni, H. A. V. (2019). Identificação de perigos da qualidade da água de abastecimento humano e proposição de soluções aplicadas à atuação da vigilância sanitária municipal. In *Anais do V Seminário dos Estudantes de Pós-Graduação (SEP)*.

Oliveira, D. G. S. (2008). *Potabilidade da água de fontes alternativas (nascente, poço raso e poço profundo) na zona rural de Formiga (MG) e sua relação com a condição ambiental da microbacia*. (Dissertação de mestrado). Universidade do Estado de Minas Gerais.

Pasini, F. & Damke, T. (2020). A importância da potabilidade da água no saneamento básico para a promoção da saúde pública no Brasil. *Revista Eletrônica TECCEN*, 13(1), 8-15. <https://doi.org/10.21727/teccen.v13i1.2200>

Perpétuo, E. A. (2014). *Parâmetros de caracterização da qualidade das águas e efluentes industriais*. CEPEMA-USP.

Rocha, C. M. B. M., Silva, A. A. & Pereira, L. M. (2006). Avaliação da qualidade da água e percepção higiênico-sanitária na área rural de Lavras, Minas Gerais, Brasil, 1999–2000. *Cadernos de Saúde Pública*, 22, 1967–1978. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2006000900028>

Rosa, M. C. V. S. & Ucker, F. E. (2019). Influência do lençol freático na condutividade elétrica e pH em cemitério. *Águas Subterrâneas*, 33(1). <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29484>

Santos, N. G. N., Silva, L. C. S., Guidone, G. H. M., Montini, V. H., Oliva, B. H. D., Nascimento, A. B. et al. (2023). Water quality monitoring in southern Brazil and the assessment of risk factors related to contamination by coliforms and *Escherichia coli*. *Journal of Water and Health*, 21(10), 1550–1561. <https://doi.org/10.2166/wh.2023.182>

Valias, A. P. G. S, Roqueto, M. A., Hornink, D. G., Koroiva, E. H., Vieira, F. C. & Rosa, G. M. (2000). Qualidade microbiológica de águas de poços rasos e de nascentes de propriedades rurais do município de São João da Boa Vista – São Paulo. *Águas Subterrâneas*.

Von Sperling, M. (2005). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos* (3^a ed.). Universidade Federal de Minas Gerais.