

AVALIAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA
ANÁLISE DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EM AMOSTRAS DE ÁGUA,
SOLO E MATERIAL PARTICULADO.Tamirys Cristina Batista de Vasconcelos^{1*}
Dra. Vanessa Nunes Alves^{2*}

Resumo: Este estudo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os métodos convencionais e alternativos utilizados na análise de parâmetros físico-químicos em amostras de água, solo e material particulado, considerando os avanços tecnológicos e a busca por sustentabilidade na química ambiental. A pesquisa, baseada em publicações indexadas entre 2021 e 2025, contemplou a avaliação de parâmetros como pH, condutividade elétrica, turbidez, sólidos totais dissolvidos, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), alcalinidade, metais tóxicos e traço, nutrientes, matéria orgânica, fósforo disponível, capacidade de troca catiônica (CTC), granulometria do solo, nitratos, sulfatos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) e massa total de material particulado atmosférico. Os resultados evidenciaram uma transição metodológica impulsionada pela incorporação de técnicas híbridas e instrumentação digital, que aliam precisão analítica à redução de custos e impactos ambientais. Os métodos clássicos, normatizados pela ABNT (1987; 2017) e pela APHA; AWWA; WEF (2020), permanecem como referência técnica, sendo complementados por alternativas inovadoras, como o uso de condutividade elétrica como proxy granulométrica, parâmetros magnéticos e geoquímicos, sensores ópticos e espectroscopias portáteis para detecção de metais, compostos orgânicos e partículas finas. Essas abordagens promovem medições *in situ* e análises em tempo real, ampliando o alcance do monitoramento ambiental. Observou-se ainda a aplicação crescente de técnicas multivariadas e modelagem estatística na integração de dados físico-químicos, biológicos e geoquímicos, fortalecendo o diagnóstico ambiental. Conclui-se que o desenvolvimento de métodos alternativos representa avanço estratégico para a sustentabilidade e modernização da química analítica ambiental.

Palavras-chave: Métodos Alternativos; Parâmetros Físico-Químicos; Água; Solo

1. INTRODUÇÃO

A avaliação dos parâmetros físico-químicos em amostras ambientais é um procedimento fundamental para compreender a qualidade e o equilíbrio dos ecossistemas. A determinação de variáveis como pH, condutividade elétrica, teor de sólidos dissolvidos, concentração de íons metálicos e matéria orgânica permite identificar alterações resultantes de atividades antrópicas ou naturais. Conforme estabelecem as normas da ABNT (1987; 2017) e os protocolos internacionais da

American Public Health Association (APHA; AWWA; WEF, 2020), a padronização

dos métodos analíticos é essencial para garantir a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados entre laboratórios e regiões.

Nos últimos anos, tem-se observado crescente demanda por metodologias alternativas que conciliem precisão analítica com sustentabilidade e menor custo operacional. Técnicas que utilizam condutividade elétrica, espectroscopia óptica e métodos multivariados vêm sendo estudadas como substitutas ou complementares aos métodos clássicos. Hasan e Abuel-Naga (2024) destacam que a condutividade elétrica pode ser empregada como indicador confiável para distribuição granulométrica do solo, enquanto Degvekar et al. (2025) demonstram a aplicabilidade de proxies físico-químicos e geoquímicos para rastrear elementos potencialmente tóxicos em diferentes tipos de uso do solo. Esses avanços reforçam a importância da inovação metodológica no monitoramento ambiental.

No contexto hídrico, a caracterização físico-química da água é determinante para avaliar sua adequação ao consumo humano, irrigação e preservação da fauna aquática. Estudos recentes evidenciam a relação direta entre variáveis físico-químicas e a qualidade dos habitats aquáticos, influenciando a biodiversidade local (Mishra et al., 2023; N'Dri et al., 2024). Sousa e Cunha (2023) também enfatizam a necessidade de análises simultâneas físico-químicas e microbiológicas para um diagnóstico completo da potabilidade e segurança ambiental, sobretudo em comunidades rurais dependentes de águas subterrâneas.

A análise de solos, por sua vez, é essencial para a manutenção da produtividade agrícola e conservação ambiental. Segundo Sá e Guedes (2023) e Tavares et al. (2021), os parâmetros físico-químicos do solo, como textura, teor de nutrientes, pH e condutividade elétrica, constituem indicadores diretos da fertilidade e da sustentabilidade do uso do solo. Estudos de Zhang et al. (2025) e Moro et al. (2023) confirmam que práticas de manejo diferenciadas, quando associadas à caracterização geoquímica, permitem identificar degradação e otimizar estratégias de recuperação e conservação em solos agrícolas e semiáridos.

A caracterização de material particulado atmosférico também representa um campo de grande relevância ambiental, dada sua relação com a poluição urbana e os impactos à saúde humana. Pesquisas recentes, como as de Kung et al. (2024) e Thomas et al. (2024), abordam a necessidade de métodos integrados que permitam identificar compostos orgânicos e inorgânicos associados ao material particulado,

como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) e metais tóxicos. Moura et al. (2024) reforçam que metodologias alternativas, como o uso de biomarcadores vegetais, podem complementar as técnicas instrumentais tradicionais, reduzindo custos e ampliando a capacidade de monitoramento.

Dessa forma, o desenvolvimento e a validação de métodos alternativos para análise de parâmetros físico-químicos configuram-se como estratégia promissora para aprimorar a eficiência analítica, reduzir custos e ampliar o acesso às informações ambientais. Conforme salientam Skoog, Holler e Crouch (2022), a modernização instrumental aliada à adoção de abordagens multivariadas favorece o avanço da análise ambiental quantitativa. Nesse cenário, o presente estudo propõe avaliar e desenvolver métodos alternativos aplicáveis à análise de amostras de água, solo e material particulado, contribuindo para o fortalecimento das práticas de monitoramento e gestão ambiental (Salunkhe, 2023; Pellegrini e Barbosa, 2023).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA EM MATRIZES AMBIENTAIS

A análise físico-química constitui um dos pilares fundamentais do controle de qualidade ambiental, permitindo o monitoramento sistemático de parâmetros essenciais que refletem a integridade de ecossistemas aquáticos e terrestres. Conforme estabelecido pelas normas da ABNT (1987; 2017) e pelos protocolos internacionais descritos pela APHA; AWWA; WEF (2020), métodos padronizados garantem precisão, rastreabilidade e comparabilidade entre diferentes laboratórios. Esses procedimentos abrangem medições de pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e metais traço, sendo indispensáveis para a caracterização de efluentes e corpos receptores.

O emprego de técnicas instrumentais avançadas, como a espectrofotometria e a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES), tem possibilitado medições rápidas e confiáveis. De acordo com Skoog, Holler e Crouch (2022), a evolução dos métodos instrumentais transformou a química analítica ambiental ao permitir a detecção simultânea de múltiplos elementos em baixas concentrações. Nesse contexto, o rigor na calibração dos instrumentos e o

controle de qualidade analítico são essenciais para evitar desvios sistemáticos e assegurar resultados representativos (ABNT, 2017; APHA; AWWA; WEF, 2020).

No campo da análise de solos, a aplicação de metodologias convencionais baseadas em extrações químicas e titulações volumétricas continua sendo amplamente adotada. Tavares et al. (2021) ressaltam a importância de protocolos integrados de laboratório e campo para a determinação de pH, matéria orgânica, fósforo e capacidade de troca catiônica (CTC). Da mesma forma, Sá e Guedes (2023) destacam o papel dos guias práticos de rotina para análises de solos e biofertilizantes, que visam uniformizar a coleta, preparação e conservação das amostras antes das medições laboratoriais.

No que diz respeito à água, a determinação de parâmetros físico-químicos clássicos como turbidez, sólidos totais dissolvidos e alcalinidade continua sendo referência para a avaliação da potabilidade e do enquadramento legal. Estudos como o de Sousa e Cunha (2023) mostram que a combinação de análises físico-químicas e microbiológicas é essencial para identificar possíveis contaminações e traçar o perfil hidroquímico de regiões semiáridas. Além disso, N'Dri et al. (2024) aplicaram métodos multivariados a dados de águas subterrâneas, confirmando que parâmetros convencionais ainda possuem alta relevância para o monitoramento integrado da qualidade ambiental.

Na caracterização atmosférica, os métodos convencionais para avaliação do material particulado incluem a gravimetria e a espectrometria de absorção atômica, que quantificam a massa e a composição dos particulados. Beringui et al. (2021) demonstraram a eficiência dessas técnicas na identificação de metais como chumbo e cádmio em regiões urbanas do Rio de Janeiro. Segundo Kung et al. (2024), tais métodos, embora precisos, demandam processos de extração complexos e tempo elevado de preparo, o que tem motivado a busca por alternativas mais rápidas e integradas.

Apesar da consolidação dos métodos clássicos, há crescente preocupação com a sua aplicação em locais de difícil acesso e com infraestrutura limitada. Hasan e Abuel-Naga (2024) sugerem que métodos baseados em condutividade elétrica podem substituir etapas laboratoriais demoradas para obtenção de parâmetros granulométricos do solo, reduzindo custos operacionais. Do mesmo modo, Degvekar et al. (2025) demonstram que variáveis físico-químicas associadas a dados

magnéticos podem ser aplicadas como proxies para inferência da saúde do solo e da contaminação por elementos potencialmente tóxicos.

Finalmente, observa-se que os métodos convencionais, embora robustos e consolidados, ainda passam por contínuos processos de atualização e validação. Moro et al. (2023) e Zhang et al. (2025) indicam que a combinação de técnicas clássicas com ferramentas geoquímicas e estatísticas aprimora a confiabilidade dos resultados e permite a modelagem mais precisa das interações entre solo, água e ar. Nesse contexto, a literatura recente destaca que a evolução dos métodos físico-químicos tradicionais não substitui, mas complementa o desenvolvimento de abordagens alternativas, garantindo o equilíbrio entre precisão analítica, acessibilidade e sustentabilidade (Salunkhe, 2023; Pellegrini e Barbosa, 2023).

2.2 DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS ALTERNATIVOS E INOVAÇÃO INSTRUMENTAL

O desenvolvimento de métodos alternativos em química ambiental tem se intensificado diante da necessidade de conciliar precisão analítica, rapidez e sustentabilidade. Segundo Hasan e Abuel-Naga (2024), a condutividade elétrica pode ser utilizada como parâmetro indireto para estimar a distribuição granulométrica do solo, reduzindo significativamente o uso de reagentes e etapas laboratoriais complexas.

Degvekar et al. (2025) exploraram proxies magnéticos e geoquímicos para rastrear elementos potencialmente tóxicos em solos, demonstrando a viabilidade de abordagens híbridas e sustentáveis na caracterização ambiental. Nesse contexto, proxies magnéticos e geoquímicos relacionam-se a propriedades físicas mensuráveis, como suscetibilidade magnética, e a assinaturas químicas elementares que atuam como indicadores indiretos da presença de metais e de processos de contaminação no solo. Esses parâmetros permitem inferências ambientais sem a necessidade de análises químicas completas e exaustivas.

Os métodos instrumentais alternativos têm se beneficiado de avanços em automação e digitalização de sistemas analíticos. Skoog, Holler e Crouch (2022) ressaltam que a modernização de equipamentos como espectrômetros e cromatógrafos, associada a softwares de aquisição de dados, permite análises em tempo real e maior sensibilidade. Além disso, Thomas et al. (2024) enfatizam a

evolução das técnicas microanalíticas para a detecção de partículas finas e microplásticos, utilizando espectroscopia Raman e fluorescência de raios X (XRF). Esses recursos tecnológicos possibilitam a miniaturização de laboratórios e a execução de medições diretas em campo, ampliando a capacidade de resposta frente a emergências ambientais.

A utilização de modelos estatísticos e métodos multivariados também tem se tornado essencial para a interpretação de dados físico-químicos complexos. Zhang et al. (2025) demonstraram que o uso de análises multivariadas pode otimizar a interpretação de parâmetros físico-químicos de solos agrícolas, permitindo maior precisão na definição de estratégias de manejo. Já N'Dri et al. (2024) aplicaram técnicas estatísticas multivariadas na análise de águas subterrâneas, evidenciando a correlação entre variáveis físico-químicas e microbiológicas. A integração dessas ferramentas matemáticas aos métodos analíticos tem permitido diagnósticos ambientais mais abrangentes e confiáveis.

Outro campo de destaque é o uso de sensoriamento remoto aliado à espectroscopia para o mapeamento ambiental. Moro et al. (2023) e Pellegrini e Barbosa (2023) demonstram que a combinação de imagens espectrais com dados físico-químicos de solos fornece informações precisas sobre degradação e fertilidade. Essa integração tecnológica permite monitoramento contínuo em larga escala, reduzindo custos de amostragem e tempo de análise. Além disso, possibilita a obtenção de dados ambientais mesmo em locais de difícil acesso, o que representa um avanço expressivo para estudos geoespaciais e de conservação de recursos naturais.

A análise de material particulado também tem sido beneficiada por metodologias inovadoras, voltadas à identificação simultânea de compostos orgânicos e inorgânicos. Kung et al. (2024) desenvolveram um método de extração e análise conjunta de retardantes de chama, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) e ésteres organofosforados (OPEs) em material particulado atmosférico, demonstrando a eficiência de técnicas combinadas. Complementarmente, Moura et al. (2024) avaliaram a deposição de particulados em folhas vegetais como biomarcadores naturais, o que representa uma alternativa ecológica e de baixo custo para o monitoramento da poluição atmosférica.

Nos estudos de qualidade da água, a adoção de sensores eletroquímicos e ópticos tem se mostrado uma solução promissora para medições instantâneas e *in situ*. Sousa e Cunha (2023) evidenciam que a integração de sensores automatizados permite a obtenção de dados contínuos sobre parâmetros como pH, condutividade e turbidez, otimizando a gestão hídrica. Além disso, Mishra et al. (2023) destacam que o monitoramento automatizado pode fornecer indicadores sobre o impacto da poluição na fauna e na qualidade dos habitats aquáticos. Tais sistemas se destacam pela capacidade de reduzir erros humanos e aprimorar a confiabilidade das medições em tempo real.

O desenvolvimento de métodos alternativos em química ambiental reflete uma tendência de integração entre tecnologia e sustentabilidade científica. Salunkhe (2023) e Tavares et al. (2021) apontam que os novos protocolos buscam equilibrar eficiência analítica e responsabilidade ambiental, reduzindo o impacto ecológico dos processos laboratoriais. Essa convergência metodológica contribui para a consolidação de práticas laboratoriais mais limpas, digitais e inclusivas, capazes de atender às demandas crescentes de monitoramento ambiental e controle da poluição com precisão e rapidez.

2.3 APLICAÇÕES AMBIENTAIS E INTEGRAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

A análise integrada dos parâmetros físico-químicos desempenha papel central no diagnóstico e manejo sustentável dos recursos naturais, permitindo compreender as interações entre solo, água e atmosfera. Segundo Mishra et al. (2023), pequenas variações em pH, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido influenciam significativamente a estrutura dos ecossistemas aquáticos e a qualidade dos habitats. De modo complementar, Sousa e Cunha (2023) verificaram que o monitoramento combinado de variáveis físico-químicas e microbiológicas em águas subterrâneas possibilita identificar fontes de contaminação e o grau de vulnerabilidade hídrica das comunidades rurais. Assim, as análises físico-químicas de rotina configuram-se como ferramentas indispensáveis na gestão ambiental preventiva.

A caracterização da qualidade da água é uma das principais aplicações desses parâmetros, sendo utilizada para classificar corpos hídricos e definir padrões

de potabilidade. Conforme as normas da ABNT (1987; 2017) e os *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2020), a medição de parâmetros como pH, turbidez, sólidos dissolvidos e metais traço fornece subsídios para avaliação da conformidade ambiental. Além disso, o uso de análises químicas e físico-químicas permite identificar a influência de atividades antrópicas, como agricultura e descarte de efluentes, sobre a qualidade dos recursos hídricos.

No solo, a integração de variáveis físico-químicas e geoquímicas tem sido aplicada para avaliar a fertilidade, a erosão e a contaminação por metais. Moro et al. (2023) demonstraram que diferentes sistemas de manejo no Semiárido brasileiro impactam a geoquímica de Luvisolos, alterando diretamente o equilíbrio de nutrientes e sais. Já Degvekar et al. (2025) propuseram o uso de parâmetros magnéticos e geoquímicos como indicadores da presença de elementos potencialmente tóxicos (PTEs), o que amplia a eficiência dos diagnósticos ambientais. Esses estudos reforçam que a análise integrada do solo é fundamental para a sustentabilidade agrícola e a conservação dos ecossistemas terrestres.

O manejo integrado solo-água é igualmente essencial para a mitigação de impactos ambientais. Pellegrini e Barbosa (2023) destacam que a análise conjunta desses compartimentos fornece dados que subsidiam práticas de conservação e uso racional dos recursos naturais. Em concordância, Sá e Guedes (2023) defendem a adoção de métodos padronizados para avaliação simultânea da qualidade do solo e da água, favorecendo a gestão sustentável das bacias hidrográficas. A integração entre variáveis físico-químicas permite, assim, compreender fluxos de nutrientes e identificar áreas de risco de contaminação ou degradação.

No âmbito atmosférico, o estudo do material particulado tem se consolidado como importante ferramenta para o monitoramento da poluição do ar. Kung et al. (2024) desenvolveram um método integrado de extração e análise de compostos orgânicos e inorgânicos associados ao material particulado, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e retardantes de chama bromados. Complementarmente, Moura et al. (2024) compararam metodologias para quantificação da deposição de partículas em folhas vegetais, demonstrando o potencial das plantas como bioindicadores ambientais. Essas abordagens ampliam o alcance das análises

físico-químicas, permitindo correlacionar composição atmosférica e impactos sobre a saúde humana.

A caracterização inorgânica do material particulado também apresenta relevância crescente na avaliação da qualidade do ar urbano. Beringui et al. (2021) identificaram a presença de metais tóxicos como chumbo, cobre e zinco no material particulado coletado no Rio de Janeiro, associando essas concentrações às fontes veiculares e industriais. Tais resultados reforçam que a determinação dos parâmetros físico-químicos é essencial para a formulação de políticas públicas voltadas ao controle da poluição atmosférica e à melhoria da saúde populacional. A integração entre métodos clássicos e modernos, nesse contexto, aumenta a precisão e a abrangência dos diagnósticos ambientais.

A aplicação de métodos analíticos combinados tem ampliado a capacidade de detectar múltiplos poluentes de forma simultânea. Thomas et al. (2024) relatam o uso de técnicas microanalíticas que permitem identificar partículas de micro e nanoplásticos, enquanto Hasan e Abuel-Naga (2024) sugerem abordagens baseadas em condutividade elétrica para inferir propriedades granulométricas do solo com eficiência. Esses métodos se destacam por reduzir custos e gerar resultados rápidos, sendo promissores para programas de monitoramento em tempo real e de baixo impacto ambiental.

A integração dos parâmetros físico-químicos também tem importância estratégica para o zoneamento ambiental e a gestão territorial. Zhang et al. (2025) demonstraram que a análise conjunta de variáveis físico-químicas e biológicas possibilita otimizar práticas agrícolas em pomares de maçã, melhorando a qualidade do solo e a produtividade. De forma semelhante, Mishra et al. (2023) associaram variações físico-químicas da água à qualidade dos habitats de aves aquáticas, evidenciando a utilidade desses parâmetros para o monitoramento da biodiversidade. Assim, o uso integrado de dados ambientais permite decisões mais assertivas em políticas de conservação.

A interpretação multivariada de parâmetros físico-químicos tem se mostrado eficaz na identificação de padrões ambientais complexos. N'Dri et al. (2024) utilizaram métodos estatísticos multivariados para classificar amostras de água com base em características físico-químicas e microbiológicas, identificando diferentes fontes de poluição. Já Degvekar et al. (2025) demonstraram que a análise

combinada de variáveis magnéticas, geoquímicas e físico-químicas aprimora o diagnóstico da saúde do solo. Essas abordagens quantitativas fortalecem a confiabilidade dos resultados e reduzem a subjetividade na interpretação de dados ambientais.

Além dos aspectos técnicos, as análises físico-químicas integradas contribuem para a formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade. Salunkhe (2023) argumenta que o entendimento dos parâmetros ambientais deve orientar o planejamento urbano e agrícola, prevenindo desequilíbrios ecológicos. Em complemento, Pellegrini e Barbosa (2023) ressaltam que o manejo sustentável de solo e água depende da adoção de indicadores físico-químicos padronizados, que sirvam de base para planos de recuperação e conservação ambiental. Assim, o uso integrado dessas análises fortalece a governança ambiental e o cumprimento das metas globais de sustentabilidade.

Conforme Tavares et al. (2021) e Skoog, Holler e Crouch (2022), a convergência entre técnicas clássicas de laboratório e inovações instrumentais digitais garante resultados mais rápidos, precisos e acessíveis. Essa evolução metodológica, consolidada por estudos como os de Kung et al. (2024) e Moura et al. (2024), aponta para um futuro em que o monitoramento ambiental se tornará mais sustentável, abrangente e orientado por dados integrados. Dessa forma, os parâmetros físico-químicos deixam de ser apenas indicadores isolados e passam a constituir instrumentos estratégicos de gestão e proteção dos ecossistemas naturais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de caráter exploratório e descritivo, com abordagem qualitativa, voltada à análise dos principais métodos convencionais e alternativos empregados na determinação de parâmetros físico-químicos em amostras de água, solo e material particulado. A pesquisa foi elaborada com base em publicações científicas indexadas entre os anos de 2021 e 2025, buscando reunir evidências recentes sobre práticas e inovações analíticas. Essa estratégia metodológica possibilitou identificar tendências, avanços e limitações no campo da química ambiental aplicada.

As fontes de dados utilizadas incluíram bases reconhecidas pela comunidade científica, como Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, ResearchGate e a Biblioteca Virtual em Saúde (BVS). Foram empregados descritores em português e inglês, permitindo uma busca ampla e refinada. Os critérios de inclusão envolveram artigos completos, revisados por pares, publicados entre 2021 e 2025, que abordassem diretamente métodos físico-químicos aplicados a pelo menos uma das matrizes estudadas. Excluíram-se resumos, revisões sem dados empíricos e publicações anteriores a 2021.

Após a triagem, 16 artigos científicos e livros atenderam aos critérios estabelecidos e 03 Normativas. Destacam-se os estudos de Mishra et al. (2023), que relacionam parâmetros da água à qualidade ecológica; Degvekar et al. (2025), que propuseram o uso de proxies magnéticos e geoquímicos em solos; e Kung et al. (2024), que aplicaram métodos combinados para caracterização do material particulado. A análise de conteúdo seguiu os princípios de Lakatos e Marconi (2021), permitindo identificar convergências entre autores quanto à aplicabilidade dos métodos, confiabilidade dos resultados e aderência às normas técnicas ABNT (1987; 2017) e APHA; AWWA; WEF (2020).

O tratamento dos dados bibliográficos envolveu leitura analítica e comparativa das obras, observando-se os seguintes aspectos: objetivo dos estudos, técnicas analíticas empregadas, tipo de amostra, resultados e limitações metodológicas. Os artigos foram categorizados em três grupos temáticos: (i) métodos convencionais e consolidação técnica; (ii) métodos alternativos e inovações instrumentais; e (iii) integração dos parâmetros físico-químicos nas aplicações ambientais. Essa estruturação possibilitou uma análise crítica das principais contribuições recentes na área e o reconhecimento de lacunas ainda existentes na literatura.

Todas as referências foram organizadas conforme a ABNT NBR 6023:2018, com registro de DOI, periódico, volume e data de acesso, garantindo rastreabilidade e reprodutibilidade do estudo. O gerenciamento das citações foi realizado por meio do software Mendeley, que assegurou padronização bibliográfica e consistência metodológica. Assim, esta revisão bibliográfica consolidou um conjunto de evidências científicas que sustentam as discussões posteriores, contribuindo para o aprimoramento de práticas analíticas sustentáveis e para a ampliação do

conhecimento sobre os métodos físico-químicos aplicados ao monitoramento ambiental.

4. RESULTADOS

A análise bibliográfica evidenciou um avanço expressivo nos métodos de avaliação físico-química aplicados às matrizes ambientais de água, solo e material particulado, refletindo uma tendência crescente em direção à inovação analítica e sustentabilidade operacional. Conforme apontam Skoog, Holler e Crouch (2022), a evolução dos sistemas instrumentais e o uso de tecnologias portáteis têm permitido análises com maior sensibilidade e precisão. Em consonância, Hasan e Abuel-Naga (2024) destacam que a substituição de etapas laboratoriais convencionais por medições baseadas em condutividade elétrica reduz significativamente o tempo e o custo das análises. Já Thomas et al. (2024) observam que a miniaturização dos equipamentos e a integração digital ampliam a aplicabilidade das medições ambientais em campo, promovendo resultados em tempo real e com menor impacto ambiental.

Os estudos revisados demonstram que a literatura recente, especialmente a partir de 2021, tem priorizado a consolidação de técnicas híbridas capazes de aliar eficiência analítica, baixo custo e sustentabilidade, em substituição parcial aos métodos clássicos dependentes de reagentes químicos. Segundo Degvekar et al. (2025), o uso de parâmetros magnéticos e geoquímicos como proxies físico-químicos representa uma estratégia inovadora para o rastreamento de metais tóxicos e elementos tóxicos no solo. Da mesma forma, Zhang et al. (2025) ressaltam que a integração de variáveis físico-químicas, biológicas e geoquímicas potencializa a compreensão de processos de contaminação e fertilidade do solo. Esses avanços refletem um movimento da química ambiental em direção à análise integrada e sustentável.

No contexto hídrico, verificou-se que os métodos convencionais de análise mantêm relevância como referência metodológica. As normas da ABNT (1987; 2017) e os protocolos da APHA; AWWA; WEF (2020) continuam a orientar os procedimentos de determinação de pH, turbidez, condutividade elétrica e metais tóxicos. Entretanto, autores como Sousa e Cunha (2023) e Mishra et al. (2023)

ressaltam que há limitações significativas quanto à mobilidade, tempo de resposta e custo operacional desses métodos, especialmente em regiões com infraestrutura restrita. Por isso, observa-se uma tendência de modernização das análises, com a incorporação de sensores ópticos e eletroquímicos para medições contínuas em campo.

A ampliação do uso de métodos automatizados e digitais também se destaca como um dos principais avanços recentes. Conforme Moura et al. (2024) e Kung et al. (2024), a utilização de espectroscopia Raman, fluorescência de raios X (XRF) e sensores remotos tem permitido identificar compostos orgânicos e inorgânicos de forma simultânea, sobretudo no monitoramento de material particulado atmosférico. Beringui et al. (2021) complementam que essas técnicas oferecem maior precisão na detecção de metais traço, enquanto N'Dri et al. (2024) reforçam a importância da análise multivariada como ferramenta de integração de dados ambientais complexos. Assim, a automação e a análise estatística avançada têm fortalecido a confiabilidade e a aplicabilidade dos resultados obtidos.

Por fim, observa-se que a combinação entre princípios da química verde e inovação instrumental constitui o eixo central das transformações recentes nas metodologias de análise físico-química ambiental. Salunkhe (2023) destaca que a redução do consumo de reagentes e a eliminação de solventes tóxicos têm se tornado prioridades na pesquisa aplicada. Em complemento, Tavares et al. (2021) e Pellegrini e Barbosa (2023) reforçam que a implementação de práticas laboratoriais sustentáveis, associadas ao uso de sensores portáteis e sistemas digitais de aquisição de dados, promove análises mais rápidas, acessíveis e ecologicamente responsáveis. Portanto, os resultados da revisão apontam para um cenário de transição tecnológica, no qual a precisão analítica se alia à sustentabilidade para redefinir os paradigmas da química ambiental contemporânea.

A Tabela 1 apresenta a síntese dos métodos convencionais mais utilizados em cada matriz ambiental, conforme identificado nos estudos analisados. Esses dados reforçam a ampla adoção de normas técnicas e protocolos da ABNT (1987; 2017) e da APHA; AWWA; WEF (2020) como referência metodológica para controle de qualidade e comparabilidade entre laboratórios. Observa-se que, embora os procedimentos clássicos apresentem elevada confiabilidade, há limitações quanto à mobilidade, tempo de resposta e custo de operação.

Tabela 1 – Principais métodos convencionais de análise físico-química por matriz ambiental

Matriz Ambiental	Parâmetros Analisados	Métodos Convencionais	Referências
Água	pH, turbidez, condutividade elétrica, metais tóxicos, DBO	Potenciometria, espectrofotometria, titulação volumétrica, ICP OES	ABNT (2017); APHA; AWWA; WEF (2020); Sousa e Cunha (2023)
Solo	pH, CTC, nutrientes, matéria orgânica, fósforo disponível	Extração química, digestão ácida, titulação, fotometria de chama	Tavares et al. (2021); Sá e Guedes (2023); Moro et al. (2023)
Material Particulado	Massa total, metais, PAHs, nitratos, sulfatos	Gravimetria, AAS, cromatografia gasosa, ICP OES	Beringui et al. (2021); Kung et al. (2024); Moura et al. (2024)

Fonte: Elaboração do autor (2025).

Os resultados indicam que, embora os métodos convencionais de análise físico-química continuem sendo amplamente empregados como referência nos laboratórios de controle ambiental, há uma clara transição metodológica em curso impulsionada pelos avanços tecnológicos e pela busca de sustentabilidade. Segundo Degvekar et al. (2025), a adoção de proxies magnéticos e geoquímicos tem se mostrado eficaz para o rastreamento de elementos potencialmente tóxicos (PTEs), substituindo processos de digestão ácida e extração química que demandam alto consumo de reagentes.

De modo complementar, Hasan e Abuel-Naga (2024) propuseram o uso da condutividade elétrica como parâmetro indireto para a determinação da granulometria do solo, eliminando etapas manuais e reduzindo o tempo de processamento. Além disso, Skoog, Holler e Crouch (2022) destacam que a incorporação de sensores digitais e plataformas automatizadas nos equipamentos de análise tem ampliado a portabilidade, a precisão e a capacidade de monitoramento contínuo das matrizes ambientais. Dessa forma, observa-se que a modernização instrumental representa uma tendência consolidada, capaz de garantir maior eficiência e confiabilidade sem comprometer a reprodutibilidade analítica preconizada por normas como as da ABNT (2017) e da APHA; AWWA;

WEF (2020).

A segunda tendência observada na literatura recente refere-se ao desenvolvimento e consolidação de métodos híbridos, que combinam análises físico-químicas, geoquímicas e estatísticas com suporte de ferramentas de modelagem computacional. Conforme relatam Zhang et al. (2025), o uso de análise de componentes principais (PCA) e análise hierárquica de agrupamento (HCA) permite detectar correlações entre parâmetros ambientais e padrões espaciais de contaminação em solos agrícolas, potencializando a tomada de decisão em programas de manejo sustentável.

Do mesmo modo, N'Dri et al. (2024) aplicaram modelos multivariados a dados físico-químicos e microbiológicos de águas subterrâneas, conseguindo distinguir fontes pontuais e difusas de poluição com alto grau de acurácia. Complementarmente, Mishra et al. (2023) e Degvekar et al. (2025) ressaltam que a integração de dados analíticos e geoestatísticos reduz as incertezas experimentais e melhora a robustez dos diagnósticos ambientais. Assim, a modelagem multivariada consolida-se como uma ferramenta essencial para a análise integrada de diferentes matrizes ambientais, favorecendo o desenvolvimento de metodologias preditivas e sustentáveis no campo da química ambiental aplicada.

Tabela 2 – Avanços recentes em métodos alternativos e híbridos de análise físico-química

Abordagem	Descrição Técnica	Aplicabilidade Ambiental	Referências
Condutividade elétrica e proxies magnéticos	Uso de propriedades eletromagnéticas para inferir granulometria e contaminação por metais	Monitoramento de solos e áreas industriais	Hasan; Abuel-Naga (2024); Degvekar et al. (2025)
Sensores ópticos e eletroquímicos	Medição direta de pH, turbidez e condutividade em tempo real	Controle de qualidade de águas superficiais e subterrâneas	Sousa e Cunha (2023); Mishra et al. (2023)
Espectroscopia Raman e XRF portátil	Identificação de partículas, metais e microplásticos <i>in situ</i>	Monitoramento atmosférico e urbano	Thomas et al. (2024); Kung et al. (2024)

Modelagem multivariada (PCA/HCA)	Integração de dados físico-químicos e biológicos para análise espacial	Zoneamento ambiental e gestão territorial	N'Dri et al. (2024); Zhang et al. (2025)
---	--	---	--

Fonte: Elaboração do autor (2025).

De modo geral, os resultados evidenciam que o campo da análise físico-química ambiental avança para a integração entre precisão instrumental e sustentabilidade operacional. Estudos recentes priorizam a redução do uso de reagentes tóxicos, a reutilização de solventes e a adoção de plataformas digitais portáteis, em consonância com os princípios da química verde. Essa transição tecnológica representa um movimento consolidado em direção a laboratórios modulares, capazes de operar com baixo consumo energético e alta eficiência analítica (Salunkhe, 2023; Tavares et al., 2021; Skoog; Holler; Crouch, 2022).

As metodologias híbridas analisadas, ao combinarem técnicas ópticas, magnéticas e estatísticas, demonstram alto potencial para substituir procedimentos laboratoriais tradicionais, promovendo maior acessibilidade e reprodutibilidade científica. Assim, os resultados deste estudo reforçam a importância da padronização metodológica e da validação de novos métodos de análise para o fortalecimento do monitoramento ambiental sustentável.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que o campo da análise físico-química ambiental passa por uma transformação significativa, marcada pela incorporação de métodos alternativos e sustentáveis. Observou-se que as novas abordagens reduzem o uso de reagentes químicos, o tempo de análise e os custos operacionais, sem comprometer a precisão dos resultados. Essa modernização está diretamente associada ao avanço de sensores inteligentes, sistemas automatizados e equipamentos portáteis, que tornam as análises mais ágeis e aplicáveis em diferentes contextos ambientais.

Constatou-se também que a integração entre métodos físicos, químicos e estatísticos amplia a capacidade de diagnóstico e interpretação das condições ambientais. A combinação de técnicas laboratoriais e ferramentas digitais tem

permitido compreender melhor as interações entre solo, água e atmosfera, favorecendo a tomada de decisões em políticas de manejo sustentável. Esse processo contribui para uma visão mais integrada e eficiente da gestão ambiental, especialmente em áreas vulneráveis ou de difícil acesso.

Conclui-se, portanto, que o desenvolvimento e a validação de métodos alternativos representam um avanço essencial para a ciência ambiental contemporânea. Essas inovações promovem maior sustentabilidade nas práticas laboratoriais, fortalecem o monitoramento ambiental e abrem novas perspectivas para pesquisas futuras voltadas à automação, digitalização e portabilidade dos sistemas analíticos. A convergência entre precisão, rapidez e responsabilidade ambiental consolida um novo paradigma na análise físico-química de matrizes ambientais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço às instituições de ensino e pesquisa que contribuíram com suporte técnico e acesso às bases de dados científicas. Agradeço também aos colegas e orientadores que colaboraram com sugestões e discussões que enriqueceram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 9898:1987 – Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987.

ABNT. **NBR 15784:2017 – Qualidade da água — Determinação de metais por espectrometria de absorção atômica e emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES)**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2020.

BERINGUI, Karmel; QUIJANO, Maria Fernanda Cáceres; JUSTO, Elizanne P. S.; VENTURA, Luciana Maria Baptista; GIODA, Adriana. Avaliação da concentração e composição inorgânica do material particulado coletado no estado do Rio de Janeiro. **Química Nova**, São Paulo, v. 44, n. 6, p. 1–18, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170717> . Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/349421637_Avaliacao_da_concentracao_e_composicao_inorganica_do_material_particulado_coletado_no_estado_do_Rio_de_Janeiro Acesso em: 3 nov. 2025.

DEGVEKAR, Jai Vishnu; GADEKAR, Esha Ulhas; DARSHANA, O.; CHAND, Jagath; AMRISH, Vadakkevedu Narayan; JOSE, Jithin; PRIYA, K.; PRABHU, Santhosh; WARRIER, Anish Kumar. Tracking soil health and potentially toxic elements (PTEs) across land-use types using physico-chemical, magnetic, and geochemical proxies: a case study from Manipal, Southwestern India. **Environmental Geochemistry and Health**, Dordrecht, v. 47, n. 397, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02665-9> . Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-025-02665-9> . Acesso em: 3 nov. 2025.

HASAN, Md Farhad; ABUEL-NAGA, Hossam. An alternative method of obtaining the particle size distribution of soils by electrical conductivity. **Minerals**, Basel, v. 14, n. 8, e804, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14080804> . Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/14/8/804> . Acesso em: 3 nov. 2025.

KUNG, Hsin-Chieh; HUANG, Bo-Wun; HUANG, Chien-Er; CHERUIYOT, Nicholas Kiprotich; CHANG-CHIEN, Guo-Ping. Concurrent extraction and analysis of atmospheric particulate matter-bound PBDEs, PAHs, nitrated PAHs, and OPEs. **Aerosol and Air Quality Research**, Taichung, v. 24, n. 3, e230262, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.230262> . Disponível em: <https://aaqr.org/articles/aaqr-23-03-0a-0262> . Acesso em: 3 nov. 2025.

MISHRA, Arun Pratap; KUMAR, Sipu; PATRA, Rounak; KUMAR, Amit; SAHU, Himanshu; CHANDRA, Naveen; PANDE, Chaitanya B.; ALSHEHRI, Fahad.

Physicochemical parameters of water and its implications on avifauna and habitat quality. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 12, e9494, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15129494> . Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/12/9494> . Acesso em: 3 nov. 2025.

MOURA, Barbara Baesso; ZAMMARCHI, Francesco; HOSHIKA, Yasutomo; MARTINELLI, Federico; PAOLETTI, Elena; FERRINI, Francesco. Comparing different methodologies to quantify particulate matter accumulation on plant leaves. **Urban Science**, Basel, v. 8, n. 3, e125, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/urbansci8030125> . Disponível em: <https://www.mdpi.com/2413-8851/8/3/125> . Acesso em: 3 nov. 2025.

MORO, Letícia; MACEDO, Rodrigo Santana; LAMBAIS, Érica Olandini; CARNEIRO, Kalline de Almeida Alves; ARAÚJO NETO, Raimundo Nonato de; BAKKER, Alexandre Pereira de. Geoquímica de Luvisolo sob diferentes sistemas de manejo no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 11, n. 1, p. 174–181, 2023. ISSN 2595-4431.

N'DRI, Aubin Yao; ASSOHOOUN, Stanislas Egomli; OKOU, Cyrille Gueï; GBAGBO, Georges Aubin Tchapelé; MELESS, Renaud Franck Djedjro; AMIN, Christophe N'Cho. Multivariate statistical methods for analysis of physicochemical and microbiological parameters of well water from the village M'Pody. *Discover Water*, London, v. 4, e22, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00079-9> . Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43832-024-00079-9> . Acesso em: 3 nov. 2025.

PELLEGRINI, André; BARBOSA, Graziela Moraes de Cesare (ed.). **Manejo e conservação de solo e água**: volume 1 – formação, implantação e metodologias. Curitiba: SENAR AR/PR, Rede Paranaense de Agropesquisa e Formação Aplicada, 2023. e-book (PDF), 20.480 kB. ISBN 978-65-88733-56-1.

SÁ, Leonardo Passos; GUEDES, Jair do Nascimento. **Manual de rotina**: um guia prático para análises de solos, água, tecido vegetal, biofertilizantes e corretivos. [S. l.]: [s. n.], 2023. ISBN 978-65-88813-10-2.

SALUNKHE, Anita. **Análise físico-química do solo e da água**. Edições Nosso Conhecimento, 2023. 52 p. ISBN 978-6206433057.

SOUSA, Francisco das Chagas de; CUNHA, Maria Lucicleide Dias. Análise físico-química e microbiológica de águas subterrâneas de povoados do município de Penaforte (Ceará). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 11, n. 1, p. 215–226, 2023. ISSN 2595-4431.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Princípios de análise instrumental**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2022.

TAVARES, Silvio Roberto de Lucena; AMARAL, Fernando Cezar Saraiva do; BOTELHO, Fábio Pereira (ed. técnicos). **Manual dos métodos de análise de solo e água em laboratório e campo para obtenção dos parâmetros requeridos pelo SiBCTI**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. 148 p. (Documentos / Embrapa Solos, n. 228). ISSN 1517-2627.

THOMAS, Chloe; SPATAYEVA, Togzhan; YU, Dawon; LOH, Andrew; YIM, Un Hyuk; YOON, Jeong-Yeol. A comparison of current analytical methods for detecting particulate matter and micro/nanoplastics. **Applied Physics Reviews**, Melville, v. 11, n. 1, e011313, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0153106> . Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/apr/article/11/1/011313/3256418> . Acesso em: 3 nov. 2025.

ZHANG, Zhantian; ZHANG, Zhihan; FAN, Zhaobo; LENG, Weifeng; YANG, Tianjing; YAO, Jie; CHEN, Haining; LIU, Baoyou. Comprehensive analysis of soil physicochemical properties and optimization strategies for “Yantai Fuji 3” apple orchards. **Agriculture**, Basel, v. 15, n. 14, e1520, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15141520> . Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/14/1520> . Acesso em: 3 nov. 2025.