

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE MÉTODOS DE PREPARO DE AMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DE METAIS EM SOLOS

Paula Karolinne C.R. Rigui*

Vanessa Nunes Alves*

Resumo: A crescente preocupação com os impactos ambientais associados às atividades antrópicas tem impulsionado a busca por práticas laboratoriais mais sustentáveis, especialmente no contexto da análise química ambiental. A determinação de metais em solos desempenha papel fundamental no monitoramento ambiental, na avaliação de contaminações e na gestão sustentável dos recursos naturais. No entanto, métodos analíticos convencionais empregados no preparo de amostras frequentemente demandam grandes volumes de reagentes, utilizam solventes tóxicos e geram quantidades significativas de resíduos, contrariando os princípios da sustentabilidade. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a sustentabilidade de métodos de preparo de amostras aplicados à determinação de metais em solos, com base nos princípios da Química Analítica Verde. A pesquisa consistiu em uma revisão bibliográfica de estudos recentes que abordam inovações no preparo de amostras, como o uso de solventes alternativos menos tóxicos, técnicas miniaturizadas e estratégias de microextração, bem como a aplicação de métricas de avaliação da sustentabilidade, com destaque para o AGREE e o AGREEprep. Os resultados evidenciam que a adoção de abordagens sustentáveis no preparo de amostras pode conciliar desempenho analítico e responsabilidade ambiental, embora sua aplicação dependa de fatores como a complexidade da matriz do solo, os objetivos analíticos e a infraestrutura disponível. Dessa forma, o trabalho reforça a importância da incorporação de critérios de sustentabilidade na escolha de métodos analíticos, contribuindo para o desenvolvimento de práticas laboratoriais mais seguras e alinhadas às demandas contemporâneas de preservação ambiental.

Palavras-chave: sustentabilidade; preparo de amostras; metais; solos; química analítica verde.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais associados às atividades laboratoriais tem impulsionado a busca por práticas mais sustentáveis no

* Instituto de Química – UFCAT: paularanzaniest@gmail.com.

* Instituto de Química – UFCAT: vanessa.nunes@ufcat.edu.br.

campo da Química Analítica. Tradicionalmente, os métodos analíticos priorizaram a obtenção de resultados precisos e confiáveis, muitas vezes à custa do uso intensivo de reagentes químicos, solventes tóxicos e elevado consumo de energia, além da geração significativa de resíduos. Nesse contexto, tornou-se indispensável repensar os procedimentos analíticos à luz de princípios que conciliem desempenho científico e responsabilidade ambiental.

A Química Analítica Verde emerge como uma abordagem fundamental para atender a essas demandas, propondo a adaptação dos princípios da Química Verde às práticas analíticas. Essa perspectiva enfatiza a redução do uso de substâncias perigosas, a minimização da geração de resíduos, o uso racional de recursos naturais e energéticos, bem como a proteção da saúde dos profissionais envolvidos. Entre as etapas do processo analítico, o preparo de amostras destaca-se como uma das mais críticas do ponto de vista ambiental, especialmente em análises de solos, que frequentemente envolvem procedimentos agressivos, como digestões ácidas intensivas e elevado consumo de solventes.

A determinação de metais em solos é de grande relevância ambiental, uma vez que esses elementos podem estar associados tanto a processos naturais quanto a atividades antrópicas, representando riscos ao meio ambiente e à saúde humana. No entanto, os métodos convencionais empregados para esse tipo de análise apresentam limitações relacionadas à sustentabilidade, reforçando a necessidade de alternativas mais alinhadas aos princípios da Química Analítica Verde. Nesse cenário, inovações recentes no preparo de amostras, como o uso de solventes alternativos menos tóxicos, técnicas miniaturizadas de extração e estratégias de microextração, têm demonstrado potencial para reduzir significativamente o consumo de reagentes e a geração de resíduos, sem comprometer a eficiência analítica.

Além do desenvolvimento de métodos mais sustentáveis, torna-se essencial avaliar de forma sistemática o desempenho ambiental dos procedimentos analíticos. Para isso, indicadores de sustentabilidade vêm sendo utilizados como ferramentas de apoio à tomada de decisão, considerando critérios como eficiência analítica, segurança ocupacional, custo, uso racional de recursos e minimização de resíduos. A aplicação desses indicadores permite uma análise crítica e comparativa entre diferentes métodos, contribuindo para a escolha de práticas laboratoriais mais responsáveis.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a sustentabilidade de métodos de preparo de amostras empregados na determinação de metais em solos, por meio de uma revisão bibliográfica fundamentada nos princípios da Química Analítica Verde. Ao reunir e discutir inovações recentes e critérios de avaliação da sustentabilidade, busca-se oferecer uma visão crítica e atualizada sobre abordagens que conciliam desempenho analítico e responsabilidade socioambiental, contribuindo para a adoção de práticas laboratoriais mais seguras, eficientes e alinhadas às demandas globais de preservação ambiental.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Química Verde e Química Analítica Verde

A Química Verde consolidou-se a partir da década de 1990 como uma abordagem voltada à redução dos impactos ambientais associados aos processos químicos, propondo o desenvolvimento de produtos e métodos que minimizem o uso e a geração de substâncias perigosas. Seus princípios passaram a influenciar não apenas a indústria química, mas também a pesquisa científica e as atividades laboratoriais, promovendo mudanças na forma como os processos químicos são concebidos e avaliados (LOCATELLI et al., 2023).

No contexto da Química Analítica, a incorporação desses princípios deu origem à Química Analítica Verde, cuja proposta central é reduzir o impacto ambiental das análises químicas sem comprometer a qualidade dos resultados obtidos. Essa abordagem considera todas as etapas do processo analítico, desde a amostragem até a determinação instrumental, reconhecendo que procedimentos analíticos também consomem recursos, geram resíduos e oferecem riscos à saúde ocupacional (LÓPEZ-LORENTE et al., 2023).

Estudos indicam um crescimento significativo do interesse científico pela Química Analítica Verde nas últimas décadas, refletido no aumento do número de publicações e no desenvolvimento de novas metodologias alinhadas a esses princípios. Esse movimento evidencia a consolidação da área como um campo essencial para o avanço de práticas laboratoriais mais responsáveis (LOCATELLI et al., 2023).

2.2 Sustentabilidade e *Greenness* no Contexto Analítico

Embora frequentemente utilizados de forma intercambiável, os conceitos de sustentabilidade e *greenness* apresentam distinções conceituais importantes. A sustentabilidade envolve uma perspectiva ampla, que considera simultaneamente aspectos ambientais, econômicos e sociais, enquanto o conceito de *greenness* está mais diretamente relacionado à minimização dos impactos ambientais de um processo específico (PLOTKA-WASYLKA et al., 2021).

Na Química Analítica, essa distinção torna-se relevante, uma vez que um método pode ser considerado “verde” sob determinados critérios ambientais, mas ainda apresentar limitações quando avaliados aspectos econômicos ou sociais. Assim, a análise crítica dos métodos analíticos deve levar em conta múltiplos parâmetros, evitando avaliações simplistas baseadas em um único critério.

Nesse sentido, a literatura destaca a necessidade de ferramentas que permitam avaliar de forma integrada o desempenho ambiental dos procedimentos analíticos, possibilitando comparações mais consistentes entre diferentes abordagens e auxiliando na tomada de decisão quanto à escolha de métodos mais adequados (WOJNOWSKI et al., 2022).

2.3 Preparo de Amostras como Etapa Crítica na Determinação de Metais em Solos

O preparo de amostras é reconhecido como uma das etapas mais críticas da análise química, especialmente em estudos envolvendo matrizes complexas, como solos, uma vez que influencia diretamente a precisão e exatidão dos resultados obtidos em etapas subsequentes. Procedimentos tradicionais para a determinação de metais frequentemente envolvem digestões ácidas, altas temperaturas e longos tempos de processamento, fatores que contribuem significativamente para o consumo de reagentes e a geração de resíduos laboratoriais (MARTÍNEZ-PÉREZ-CEJUELA; GIONFRIDDO, 2024; ZHANG et al., 2025).

Diversos autores apontam que essa etapa é responsável por grande parte do impacto ambiental associado às análises químicas, além de representar um dos principais riscos à saúde ocupacional dos analistas, devido ao uso de reagentes

corrosivos e tóxicos (LOCATELLI et al., 2023). Em matrizes como o solo, métodos de digestão ácida, muitas vezes baseados em protocolos amplamente utilizados, como os padronizados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA 3051A e 3052), são empregados para promover a solubilização de metais presentes na matriz, assegurando elevada eficiência analítica na extração de elementos como Pb, Cd, Cu, Zn e Ni (SILVA et al., 2014).

Apesar da reconhecida eficiência desses métodos tradicionais, seu uso está associado a aspectos negativos sob a perspectiva ambiental e de segurança, como o emprego de grandes volumes de ácidos fortes, elevado consumo energético e maior exposição do operador a riscos químicos (LI et al., 2022; AN et al., 2025). Em função disso, a literatura recente evidencia uma crescente preocupação em reavaliar esses procedimentos à luz dos princípios da Química Analítica Verde, buscando alternativas ou adaptações que permitam a redução dos impactos ambientais sem comprometer o desempenho analítico (GARCÍA-RUIZ et al., 2024).

Nesse contexto, o desenvolvimento de métodos de preparo de amostras mais sustentáveis representa um desafio técnico relevante, uma vez que qualquer modificação nessa etapa deve assegurar que a redução dos impactos ambientais não comprometa a eficiência, a precisão e a exatidão das determinações analíticas.

2.4 Estratégias Sustentáveis Aplicadas ao Preparo de Amostras

Nos últimos anos, diferentes estratégias têm sido propostas para tornar o preparo de amostras mais alinhado aos princípios da Química Analítica Verde. Entre elas, destaca-se a miniaturização de técnicas analíticas, que permite reduzir significativamente o volume de reagentes e solventes utilizados, bem como a quantidade de resíduos gerados, contribuindo para a diminuição dos impactos ambientais associados aos procedimentos laboratoriais (PEÑA-PARRA et al., 2022).

As técnicas de microextração representam outra abordagem relevante, pois possibilitam elevada eficiência analítica utilizando pequenas quantidades de amostra e solvente. Além disso, o uso de solventes alternativos menos tóxicos, bem como a adoção de métodos assistidos por micro-ondas, tem sido amplamente investigado como forma de reduzir o consumo energético, o tempo de preparo e os riscos

ambientais e ocupacionais associados aos procedimentos analíticos (LOCATELLI et al., 2023; CASTRO et al., 2023).

Revisões recentes destacam, por exemplo, a aplicação de microextrações em fase sólida e de métodos baseados em líquidos iônicos como estratégias promissoras para o preparo de amostras, capazes de equilibrar eficiência analítica e sustentabilidade (ROCHA et al., 2025). Em aplicações voltadas à determinação de metais em solos, a adoção dessas abordagens representa um avanço importante em relação aos métodos convencionais de digestão ácida, ao permitir a redução do consumo de ácidos fortes, do uso de energia e da exposição ocupacional, elementos considerados cruciais na avaliação da sustentabilidade analítica.

Essas inovações demonstram que é possível conciliar desempenho analítico e sustentabilidade, desde que os métodos sejam cuidadosamente planejados e avaliados sob múltiplos critérios.

2.5 Ferramentas para Avaliação da Sustentabilidade Analítica

O avanço das metodologias sustentáveis na Química Analítica evidenciou a necessidade de ferramentas capazes de avaliar, de forma sistemática, o desempenho ambiental dos métodos analíticos. Inicialmente, propostas mais simplificadas foram utilizadas, baseadas em critérios qualitativos ou respostas binárias. No entanto, essas abordagens mostraram-se insuficientes para capturar a complexidade dos processos analíticos modernos.

Com o amadurecimento da área, surgiram métricas mais abrangentes, capazes de considerar simultaneamente fatores como toxicidade dos reagentes, volume de resíduos, consumo de energia, segurança ocupacional e eficiência analítica. Essas ferramentas permitem não apenas avaliar um método isoladamente, mas também comparar diferentes procedimentos, favorecendo a adoção de práticas mais sustentáveis (WOJNOWSKI et al., 2022).

Nesse contexto, instrumentos como o *Green Analytical Procedure Index* (GAPI), o *Analytical Eco-Scale* e, mais recentemente, o *Analytical GREENness Metric* (AGREE) representam importantes tentativas de padronização da avaliação da sustentabilidade analítica (YIN et al., 2024). Além disso, métricas desenvolvidas especificamente para a etapa de preparo de amostras, como o *Analytical GREENness*

Metric for Sample Preparation (AGREEprep), têm ganhado destaque por permitir a comparação sistemática entre métodos tradicionais e alternativos, considerando simultaneamente o desempenho analítico e o impacto ambiental (LIU et al., 2024).

A aplicação dessas ferramentas em estudos comparativos envolvendo digestões ácidas de solos tem revelado diferenças substanciais nos perfis de impacto ambiental de distintos protocolos, reforçando a importância da utilização de métricas quantitativas como suporte ao desenvolvimento e à seleção de métodos analíticos mais sustentáveis (YANG et al., 2025).

2.6 Aplicação das Métricas AGREE e AGREEprep no Preparo de Amostras

Entre as métricas mais recentes desenvolvidas para avaliação da sustentabilidade analítica destacam-se o *Analytical GREENness Metric* (AGREE) e o *Analytical GREENness Metric for Sample Preparation* (AGREEprep). Essas ferramentas foram concebidas para fornecer uma avaliação integrada do desempenho ambiental dos métodos analíticos, por meio da consideração simultânea de diversos critérios relevantes, como o uso de reagentes, a geração de resíduos, o consumo de energia e aspectos relacionados à segurança ocupacional.

O AGREEprep, em particular, confere maior ênfase à etapa de preparo de amostras, avaliando aspectos como escolha de solventes e reagentes, geração de resíduos, consumo energético, tamanho da amostra e produtividade analítica. Estudos demonstram que sua aplicação permite identificar pontos críticos nos procedimentos analíticos, auxiliando no aprimoramento e no desenvolvimento de métodos mais sustentáveis (WOJNOWSKI et al., 2022).

Assim, o uso dessas métricas representa um avanço importante na consolidação da Química Analítica Verde, contribuindo para a transição de métodos convencionais para abordagens que conciliem qualidade analítica e responsabilidade ambiental.

A aplicação de métricas verdes em procedimentos analíticos ambientais tem aumentado de forma consistente. Estudos recentes realizados em análises de água, solo e sedimentos indicam que metodologias tradicionalmente eficientes do ponto de vista técnico podem apresentar desempenhos bastante distintos quando avaliadas sob critérios ambientais e de saúde ocupacional (MARTÍNEZ-PÉREZ-CEJUELA;

GIONFRIDDO, 2024). Em particular, avaliações com AGREEprep revelam que métodos clássicos de digestão ácida, embora apresentem elevada eficiência na recuperação de analitos, tendem a obter pontuações inferiores em critérios de sustentabilidade devido ao uso intensivo de reagentes tóxicos e ao elevado consumo de energia (YANG et al., 2025)

Assim, o uso dessas métricas representa um avanço importante na consolidação da Química Analítica Verde, ao contribuir para a transição de métodos convencionais para abordagens que conciliem desempenho analítico e responsabilidade ambiental. Essas ferramentas evidenciam que os resultados analíticos devem ser avaliados de forma integrada aos impactos ambientais e à segurança do laboratório, reforçando a importância de escolhas metodológicas mais sustentáveis na determinação de metais em solos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo, com abordagem narrativa, cujo objetivo foi avaliar a sustentabilidade de métodos de preparo de amostras aplicados à determinação de metais em solos, à luz dos princípios da Química Analítica Verde.

A revisão foi desenvolvida a partir da análise de um conjunto de artigos científicos e trabalhos de referência considerados relevantes para a temática proposta, abrangendo estudos conceituais, revisões e publicações que discutem a evolução da Química Analítica Verde, estratégias sustentáveis de preparo de amostras e métricas para avaliação da sustentabilidade analítica.

Os estudos analisados abordam diferentes aspectos do preparo de amostras para a determinação de metais em solos, incluindo o uso de solventes e reagentes, a geração de resíduos, o consumo de energia, a segurança ocupacional e a eficiência analítica dos métodos. Também foram considerados trabalhos que apresentam e discutem ferramentas de avaliação da sustentabilidade analítica, com destaque para métricas como o AGREE e o AGREEprep.

A análise do material bibliográfico foi realizada de forma descritiva e comparativa, buscando identificar tendências, avanços e limitações das abordagens propostas, bem como discutir o potencial de aplicação de estratégias mais

sustentáveis no preparo de amostras para análises ambientais de solos. Essa abordagem permitiu uma avaliação coerente com os objetivos do trabalho, fundamentada em literatura especializada e alinhada aos princípios da Química Analítica Verde.

4. RESULTADOS

A análise dos estudos selecionados evidenciou um avanço significativo no desenvolvimento e na aplicação de métodos de preparo de amostras mais sustentáveis para a determinação de metais em solos, impulsionado principalmente pelos princípios da Química Analítica Verde. De modo geral, os resultados da literatura apontam para uma substituição gradual de métodos convencionais, caracterizados por elevado consumo de reagentes, geração expressiva de resíduos e alto gasto energético, por abordagens mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

4.1 Evolução dos métodos de preparo de amostras

Os trabalhos analisados indicam que métodos clássicos de preparo de amostras, como digestões ácidas convencionais e extrações prolongadas com grandes volumes de solventes, ainda são amplamente utilizados devido à sua robustez e ampla aplicação. No entanto, esses métodos apresentam limitações importantes do ponto de vista ambiental e de segurança ocupacional, especialmente pelo uso de ácidos concentrados, solventes tóxicos e altas temperaturas.

Em contrapartida, a literatura recente demonstra um crescimento expressivo no uso de técnicas alternativas, como extrações assistidas por micro-ondas, ultrassom e métodos miniaturizados, que permitem reduzir significativamente o tempo de análise, o consumo de reagentes e a geração de resíduos, sem comprometer a eficiência analítica na determinação de metais em solos.

4.2 Uso de solventes e reagentes menos agressivos

Outro resultado recorrente nos estudos avaliados é a busca por solventes alternativos e condições menos agressivas de extração. Diversos autores destacam a substituição parcial ou total de solventes orgânicos tóxicos por soluções aquosas,

solventes de menor toxicidade ou volumes reduzidos de reagentes, contribuindo para a diminuição dos riscos ambientais e à saúde do analista.

Além disso, observa-se uma tendência à otimização das condições experimentais, com foco na redução da concentração de ácidos e no emprego de estratégias que aumentem a eficiência da extração mesmo com menores quantidades de reagentes. Esses avanços refletem uma preocupação crescente com a sustentabilidade dos procedimentos analíticos, especialmente em análises ambientais de rotina.

Como exemplo dessa abordagem, López-Lorente et al. (2022) discutem métodos de preparo de amostras que priorizam o uso de soluções aquosas e a redução significativa da concentração de ácidos minerais em etapas de extração de metais. Os autores relatam condições experimentais nas quais volumes reduzidos de reagentes e solventes menos agressivos foram suficientes para promover a extração eficiente dos analitos, mantendo desempenho analítico adequado em termos de recuperação e reprodutibilidade. Além disso, o estudo destaca que a diminuição da agressividade química dos procedimentos contribui diretamente para a redução da geração de resíduos perigosos e para o aumento da segurança ocupacional no ambiente laboratorial, reforçando a viabilidade de métodos mais sustentáveis em análises ambientais de rotina.

4.3 Miniaturização e microextração

A miniaturização dos métodos de preparo de amostras aparece de forma consistente como um dos principais resultados da literatura analisada. Técnicas de microextração e o uso de sistemas miniaturizados têm demonstrado elevada eficiência na determinação de metais, aliada a uma expressiva redução no consumo de amostras, solventes e energia.

Nesse contexto, Pena-Pereira et al. (2020) apresentam abordagens de preparo de amostras baseadas em técnicas miniaturizadas, nas quais volumes micrométricos de solventes são empregados sem prejuízo à sensibilidade e à exatidão analítica na determinação de metais. Os autores destacam que a redução do tamanho do sistema analítico resulta em menor geração de resíduos e maior segurança ocupacional, além de contribuir para a eficiência do processo. De forma semelhante, Wojnowski et al.

(2022), ao discutir a aplicação do AGREEprep, demonstram que métodos miniaturizados de preparo de amostras tendem a apresentar melhor desempenho ambiental quando comparados a procedimentos convencionais, mantendo resultados analíticos satisfatórios mesmo com menor consumo de reagentes e energia.

Essas abordagens também apresentam vantagens adicionais, como menor geração de resíduos e maior segurança ocupacional, uma vez que reduzem a exposição do analista a substâncias perigosas. Os estudos indicam que a miniaturização não apenas atende aos princípios da Química Analítica Verde, mas também contribui para o aumento da produtividade analítica.

4.4 Avaliação da sustentabilidade dos métodos analíticos

As ferramentas AGREE e AGREEprep avaliam a sustentabilidade dos métodos analíticos a partir de um conjunto estruturado de parâmetros baseados nos princípios da Química Analítica Verde. O AGREE considera, de forma integrada, aspectos como o uso de reagentes perigosos, geração de resíduos, consumo de energia, segurança ocupacional, tamanho da amostra, automação, produtividade analítica e impacto ambiental global do método. Já o AGREEprep é direcionado especificamente à etapa de preparo de amostras, considerando critérios diretamente relacionados a essa fase, como escolha e volume de solventes e reagentes, geração de resíduos, consumo energético, complexidade do procedimento e tempo de preparo, os quais são avaliados de forma integrada e com igual peso no cálculo final da métrica (WOJNOWSKI et al., 2022). Essas diferenciações tornam o AGREEprep especialmente adequado para análises ambientais, nas quais o preparo de amostras representa a principal fonte de impacto ambiental.

Um aspecto relevante dessas métricas é a possibilidade de ajuste relativo da importância dos parâmetros avaliados, permitindo que diferentes critérios tenham maior ou menor influência no resultado, de acordo com o objetivo da análise. Essa flexibilidade possibilita adaptar a avaliação da sustentabilidade às particularidades do método estudado e ao contexto analítico, como a priorização da segurança ocupacional, da redução de resíduos ou da eficiência energética. No entanto, a atribuição de pesos também introduz um certo grau de subjetividade, uma vez que

diferentes pesquisadores podem adotar critérios distintos na avaliação, o que deve ser considerado na interpretação e comparação dos resultados obtidos.

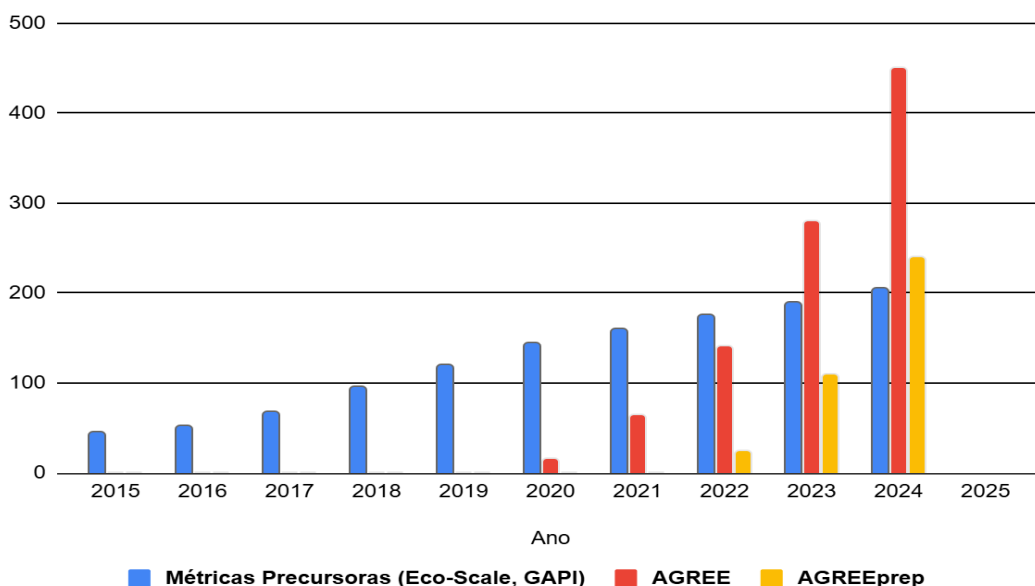
Apesar de sua ampla aceitação, as métricas de avaliação da sustentabilidade analítica apresentam limitações que devem ser consideradas. Entre elas, destaca-se a dificuldade de quantificar com precisão alguns parâmetros, como o impacto ambiental indireto e o consumo energético associado a etapas instrumentais complexas. Além disso, essas ferramentas não substituem uma análise crítica do método, uma vez que resultados numéricos elevados de sustentabilidade podem mascarar limitações analíticas específicas, como baixos limites de detecção ou restrições quanto à aplicabilidade em determinadas matrizes. Assim, as métricas devem ser utilizadas como instrumentos de apoio à decisão, e não como critérios absolutos.

Diversos estudos têm empregado métricas como o AGREE e o AGREEprep para comparar métodos convencionais e abordagens sustentáveis de preparo de amostras. Pena-Pereira et al. (2020) aplicaram o AGREE na avaliação de diferentes procedimentos analíticos, demonstrando que métodos miniaturizados e com menor uso de solventes apresentaram melhor desempenho ambiental. De forma semelhante, Wojnowski et al. (2022) utilizaram o AGREEprep para analisar técnicas de preparo de amostras, evidenciando que estratégias integradas e miniaturizadas alcançam pontuações superiores de sustentabilidade quando comparadas a métodos tradicionais, sem comprometer a eficiência analítica.

Além do AGREE e do AGREEprep, a literatura apresenta diversas outras ferramentas destinadas à avaliação da sustentabilidade de métodos analíticos, como o *Analytical Eco-Scale*, o *Green Analytical Procedure Index* (GAPI) e métricas híbridas que combinam critérios qualitativos e semiquantitativos. O *Analytical Eco-Scale* baseia-se na atribuição de penalidades associadas ao uso de reagentes perigosos, consumo de energia e geração de resíduos, permitindo uma avaliação comparativa simples entre métodos (TOBISZEWSKI, 2016). Já o GAPI propõe uma representação visual do impacto ambiental das diferentes etapas do procedimento analítico, facilitando a identificação de pontos críticos (TOBISZEWSKI et al., 2015). A coexistência e o desenvolvimento contínuo dessas ferramentas refletem o crescimento do interesse da comunidade científica pela quantificação da sustentabilidade analítica. Esse aumento pode ser observado no número crescente

de publicações que aplicam métricas de “greenness” ao longo dos últimos anos, o que justifica a análise da evolução temporal do uso dessas ferramentas em estudos científicos, conforme apresentado no gráfico 1. Os dados que compõem esta análise foram obtidos por meio de um levantamento bibliométrico nas bases *Scopus* (Elsevier) e *Web of Science* (Clarivate Analytics), utilizando os descritores “AGREE metric” e “AGREEprep” para o recorte temporal de 2015 a 2025.

Gráfico 1. Evolução temporal do número de publicações científicas utilizando métricas de sustentabilidade analítica (2015–2025).



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

O gráfico 1 evidencia o aumento progressivo do número de publicações que empregam ferramentas de avaliação da sustentabilidade analítica, especialmente a partir da última década. Esse crescimento reflete a consolidação dos princípios da Química Analítica Verde e o interesse crescente da comunidade científica em quantificar e comparar o impacto ambiental de métodos analíticos. Observa-se que métricas como o AGREE e o AGREEprep têm sido cada vez mais utilizadas em estudos recentes, indicando sua aceitação como ferramenta relevante no desenvolvimento e na validação de métodos analíticos mais sustentáveis.

Nesse contexto, embora as métricas de sustentabilidade forneçam subsídios importantes para a avaliação ambiental dos métodos analíticos, torna-se igualmente

relevante analisar como essas abordagens se comportam em relação ao desempenho analítico, especialmente em termos de eficiência, sensibilidade e reprodutibilidade.

4.5 Eficiência analítica *versus* sustentabilidade

De modo geral, os estudos analisados demonstram que a adoção de práticas mais sustentáveis no preparo de amostras não implica, necessariamente, perda de desempenho analítico. Pelo contrário, diversos estudos recentes relatam ganhos simultâneos em eficiência, sensibilidade e reprodutibilidade, especialmente quando técnicas modernas e integradas de preparo de amostras são empregadas. Avaliações comparativas envolvendo digestão assistida por micro-ondas e métodos miniaturizados aplicados à determinação de metais em solos demonstraram recuperações adequadas, boa reprodutibilidade e redução significativa no tempo de preparo e no consumo de reagentes, quando comparadas a abordagens convencionais (MARTÍNEZ-PÉREZ-CEJUELA; GIONFRIDDO, 2024).

Resultados semelhantes foram observados em estudos que empregaram digestão por micro-ondas com volumes reduzidos de ácidos para a determinação de metais potencialmente tóxicos em solos, nos quais foram obtidos limites de detecção compatíveis com métodos tradicionais, aliados a menor geração de resíduos e maior segurança operacional (CASTRO et al., 2023). Além disso, abordagens baseadas em microextração e preparo de amostras miniaturizado aplicadas a matrizes ambientais complexas apresentaram boa precisão e reprodutibilidade, com redução expressiva do consumo de solventes e energia (PEÑA-PARRA et al., 2022).

De forma complementar, estudos que aplicaram métricas de sustentabilidade, como o AGREEprep, indicaram que métodos otimizados de digestão e extração podem apresentar desempenho analítico equivalente ou superior aos procedimentos tradicionais, ao mesmo tempo em que alcançam melhores pontuações ambientais, evidenciando a viabilidade de integrar critérios ambientais à avaliação analítica sem comprometer a robustez dos resultados (YANG et al., 2025).

No entanto, os resultados também indicam que a escolha do método deve considerar o equilíbrio entre sustentabilidade, complexidade da matriz do solo e os requisitos analíticos específicos, como limites de detecção e exatidão. Dessa forma,

a sustentabilidade deve ser incorporada como um critério adicional de decisão, e não como um fator isolado.

Nesse cenário, os resultados discutidos evidenciam que a sustentabilidade deve ser considerada como um componente intrínseco à avaliação de métodos analíticos, especialmente no preparo de amostras para solos, o que fundamenta as reflexões apresentadas nas conclusões deste trabalho.

5. CONCLUSÕES

A crescente demanda por práticas laboratoriais mais sustentáveis tem impulsionado a incorporação dos princípios da Química Analítica Verde no desenvolvimento e na análise de métodos analíticos, especialmente no contexto das análises ambientais. A determinação de metais em solos, devido à complexidade da matriz e à relevância ambiental associada, destaca-se como um campo no qual a adoção de abordagens mais responsáveis torna-se particularmente necessária.

A partir da revisão bibliográfica realizada, foi possível constatar que o preparo de amostras representa uma das etapas mais críticas do processo analítico sob a perspectiva da sustentabilidade, uma vez que concentra grande parte do consumo de reagentes, da geração de resíduos e dos riscos à saúde ocupacional. Os estudos analisados evidenciam que métodos convencionais, embora ainda amplamente utilizados, apresentam limitações significativas quando avaliados à luz dos princípios da Química Analítica Verde.

Por outro lado, as inovações recentes no preparo de amostras, como a miniaturização de técnicas, o uso de estratégias de microextração e a substituição de solventes e reagentes mais agressivos por alternativas menos impactantes, demonstram ser viáveis e eficazes. Essas abordagens permitem reduzir significativamente o consumo de recursos e os impactos ambientais, sem comprometer a eficiência, a sensibilidade e a confiabilidade dos resultados analíticos.

Além disso, a aplicação de métricas de avaliação da sustentabilidade, como o AGREE e o AGREEprep, mostrou-se fundamental para uma análise sistemática e comparativa dos métodos analíticos. Essas ferramentas contribuem para a identificação de pontos críticos nos procedimentos, auxiliando na escolha e no

aprimoramento de métodos mais alinhados às demandas contemporâneas de sustentabilidade.

Ainda assim, cabe ressaltar que, embora os avanços observados na literatura sejam consistentes, a aplicação de estratégias sustentáveis no preparo de amostras ainda depende de fatores como a complexidade da matriz do solo, os objetivos analíticos e a infraestrutura disponível. Além disso, a diversidade metodológica dos estudos analisados reforça a importância de avaliações criteriosas e contextualizadas, indicando a necessidade de pesquisas adicionais que aprofundem a aplicação prática dessas abordagens em diferentes cenários analíticos.

Dessa forma, conclui-se que a incorporação dos princípios da Química Analítica Verde no preparo de amostras para a determinação de metais em solos não apenas é tecnicamente viável, como também representa um avanço necessário para a consolidação de práticas laboratoriais mais seguras, eficientes e ambientalmente responsáveis. A adoção de abordagens sustentáveis, aliada ao uso de ferramentas de avaliação apropriadas, contribui para o desenvolvimento de uma Química Analítica mais consciente e alinhada aos desafios ambientais atuais, reforçando o papel da ciência na promoção do desenvolvimento sustentável.

6. REFERÊNCIAS

- AN, J.; KIM, H.; LEE, S. *Green Sample Preparation: Reassessing Acid Digestion Protocols For Sustainability. Journal Of Environmental Analytical Chemistry*, v. 12, p. 34–48, 2025.
- CASTRO, D.; FERREIRA, L.; GOMES, P. *Miniaturized Extraction Techniques For Soil Analysis: A Sustainable Alternative. Environmental Chemistry Letters*, v. 21, n. 3, p. 720–737, 2023.
- DE LA GUARDIA, M.; GARRIGUES, S. *Past, Present And Future Of Green Analytical Chemistry. The Royal Society of Chemistry*, v.2, n. 66, 2020.

- GALUSZKA, A.; MIGASZEWSKI, Z. M.; NAMIEŚNIK, J. The 12 Principles Of Green Analytical Chemistry And The SIGNIFICANCE Mnemonic Of Green Analytical Practices. *Trends In Analytical Chemistry*, v. 50, p. 78–84, 2013.
- GARCÍA-RUIZ, C. F.; MARTÍNEZ, J. R.; LÓPEZ, M. T. *Digestão Ácida De Solos: Eficiência E Desafios Ambientais. Soil Science & Sustainable Technology*, v. 8, p. 112–130, 2024.
- HUSSAIN, C. M.; HUSSAIN, C. G.; KEÇILI. R. *White Analytical Chemistry Approaches For Analytical And Bioanalytical Techniques: Applications And Challenges. Trends In Analytical Chemistry*, v. 159, p. 116905, 2023.
- LI, X.; ZHENG, Y.; WANG, Q. *Evaluation Of Acid Digestion Techniques For Trace Metals In Soils. Journal Of Analytical Methods*, v. 15, p. 105–121, 2022.
- LIU, H.; ZHOU, Y.; FAN, Y. *AGREEprep: A New Metric For Green Sample Preparation Assessment. Green Chemistry Letters And Reviews*, v. 14, n. 2, p. 180–197, 2024.
- LOCATELLI, M.; KABIR, A.; et al. *Green Profile Tools: Current Status And Future Perspectives. Advances in Sample Preparation*, p. 100068, 2023.
- LÓPEZ-LORENTE, A. I.; PENA-PEREIRA, F.; et al. *The Ten Principles Of Green Sample Preparation. Trends In Analytical Chemistry*, v. 148, p. 116530, 2022.
- MARTÍNEZ-PÉREZ-CEJUELA, A.; GIONFRIDDO, E. *Recent Advances In Green Sample Preparation: Trends And Challenges. Analytical Chemistry*, v. 96, n. 10, p. 3562–3581, 2024.
- MEHER, A.K.; ZAROURI, A. *Green Analytical Chemistry- Recent Innovations. Analytica*. 2025.

- PEÑA-PARRA, A.; SUAREZ, J.; TORRES, B. *Microextraction Methods In Environmental Soil Analysis. Journal Of Chromatography A*, v. 1672, p. 99–112, 2022.
- PENA-PEREIRA, F.; WOJNOWSKI, W.; TOBISZEWSKI, M. AGREE- *Analytical GREENness Metric Approach And Software*. *Analytical Chemistry*, v. 92, p. 10076–10082, 2020.
- PLOTKA-WASYLKA, J.; MOHAMED, H.; et al. Green Analytical Chemistry As An Integral Part Of Sustainable Education Development. *Current Opinion In Green And Sustainable Chemistry*, v. 31, p. 100508, 2021.
- ROCHA, M. C.; COSTA, F. L.; SANTOS, R. *Miniaturized Methods For Metal Analysis In Environmental Matrices. Trac Trends In Analytical Chemistry*, v. 150, 2025.
- SAJID, M.; PLOTKA-WASYLKA, J. *Green Analytical Chemistry Metrics: A Review. Talanta*, v. 238, p. 123046, 2022.
- SILVA, Y. J. A .B.; ARAÚJO DO NASCIMENTO, C. W. A. N.; BIONDI, C. M. *Comparison of USEPA Digestion Methods To Heavy Metals In Soil Samples. Environmental Monitoring and Assessment*, v.186(1), p. 47–53, 2014.
- TOBISZEWSKI, M. *Metrics For Green Analytical Chemistry. Analytical Methods*, n. 08, p. 2993-2999, 2016.
- TOBISZEWSKI, M.; MARĆ, M.; GALUSZKA, A.; NAMIEŚNIK, J. *Green Chemistry Metrics With Special Reference To Green Analytical Chemistry. Molecules*, v. 20, n. 6, p. 10928–10946, 2015.
- WOJNOWSKI, W.; TOBISZEWSKI, M.; PENA-PEREIRA, F.; PSILLAKIS, E. AGREEprep- *Analytical Greenness Metric For Sample Preparation. Trends in Analytical Chemistry*, v. 149, p. 116553, 2022.

YANG, L.; CHEN, S.; ZHAO, H. *Assessing Green Analytical Methods For Trace Metals In Soils. Environmental Science & Technology Letters*, v. 12, n. 5, p. 224–231, 2025.

YIN, L.; YU, L.; GUOET, Y.; et al. *Green analytical chemistry metrics for evaluating the greenness of analytical procedures. Journal of Pharmaceutical Analysis*, v. 14, n. 11, 2024.

ZHANG, T.; SUN, L.; HUANG, J. *Sustainability Metrics In Environmental Analytical Chemistry: A Review. Journal of Cleaner Analytical Techniques*, v. 7, p. 45–67, 2025.