

QUÍMICA FORENSE APLICADA À FISCALIZAÇÃO AMBIENTAL: MÉTODO RÁPIDO PARA IDENTIFICAÇÃO DE ESPÉCIES DE MADEIRA COM REAGENTE QUÍMICO



<https://doi.org/10.22533/at.ed.3611125040412>

Data de aceite: 11/12/2025

Wallenstein Maia Santana

Marcos Antônio Couto Campo

RESUMO: A identificação rápida de espécies madeireiras em ações de fiscalização ambiental ainda representa um desafio devido à diversidade de madeiras tropicais e à crescente sofisticação das fraudes documentais. Métodos químicos de triagem têm se destacado como alternativas complementares às abordagens anatômicas tradicionais. Este estudo apresenta uma revisão aprofundada sobre a aplicação de reagentes cromogênicos com afinidade seletiva por íons metálicos — com ênfase no Cromo Azurol-S (CAS) — para detecção visual de alumínio em tecidos lenhosos, característica presente em diversas espécies tropicais acumuladoras. A revisão também discute a utilização da Fluorescência de Raios X (XRF) como técnica confirmatória não destrutiva para identificação elementar, avaliando seu potencial analítico, limitações, requisitos operacionais e aplicabilidade forense. Os resultados da literatura indicam que a integração entre testes colorimétricos rápidos e análises instrumentais pode

fortalecer procedimentos de fiscalização, melhorar a triagem de madeira suspeita e contribuir para a materialidade de infrações ambientais. A consolidação dessa abordagem, entretanto, depende de protocolos padronizados, estudos de validação e avaliações interlaboratoriais que garantam sua robustez técnica e jurídica.

PALAVRAS-CHAVE: Cromo Azurol-S; Alumínio em madeira; Análise espectrométrica; Triagem colorimétrica; Métodos não destrutivos.

INTRODUÇÃO

A identificação precisa de espécies de madeira constitui um dos principais desafios técnicos enfrentados nas ações de fiscalização ambiental, sobretudo em regiões de alta biodiversidade e intensa pressão antrópica. A similaridade anatômica entre madeiras tropicais, a variabilidade intraespecífica e a crescente sofisticação das fraudes documentais dificultam a verificação imediata da origem e legalidade do material transportado. Nesses contextos, métodos tradicionais

baseados exclusivamente em anatomia macroscópica e microscópica podem ser insuficientes, especialmente quando a madeira encontra-se serrada, muito fragmentada ou em condições desfavoráveis à observação morfológica (FENGEL; WEGENER, 1989; SJÖSTRÖM, 1993).

Diante dessas limitações, cresce o interesse por abordagens complementares fundamentadas na Química Forense, capazes de explorar assinaturas elementares e moleculares características de determinados grupos taxonômicos. Estudos clássicos e contemporâneos demonstram que várias espécies florestais tropicais acumulam alumínio em concentrações acima da média, resultado de adaptações fisiológicas a solos ácidos e altamente intemperizados (CHENERY, 1948; WIMMER et al., 2009). Esse acúmulo — quando presente de forma consistente — constitui um marcador químico potencialmente útil para diferenciação preliminar de espécies.

Entre os reagentes capazes de detectar alumínio em tecidos vegetais, destaca-se o Cromo Azuroil-S (CAS), um corante cromogênico de elevada afinidade por íons metálicos trivalentes, responsável por mudanças cromáticas facilmente observáveis após contato com material lenhoso contendo Al^{3+} . Desde a demonstração de sua aplicabilidade em testes histoquímicos por Kukachka e Miller (1980), o CAS tem sido utilizado em análises botânicas, microbiológicas e químicas devido à sensibilidade e rapidez de resposta. Embora não substitua métodos definitivos de identificação, o CAS pode atuar como ferramenta de triagem, sobretudo em ambientes operacionais que exigem decisões instantâneas.

Complementarmente, a Fluorescência de Raios X (XRF) consolidou-se como técnica instrumental não destrutiva amplamente utilizada em estudos ambientais, arqueométricos e forenses. Sua capacidade de detectar e quantificar elementos químicos mesmo em matrizes orgânicas complexas, de forma portátil e rápida, permite confirmar a presença de alumínio identificada previamente por ensaios colorimétricos (POTTS; WEST, 2008; SHACKLEY, 2011). Assim, a integração entre triagem visual por CAS e análise elementar por XRF configura uma estratégia promissora para identificação preliminar de madeira em contextos de fiscalização.

Além de seu potencial analítico, essa abordagem dialoga diretamente com demandas periciais e jurídicas relacionadas à cadeia de custódia, à robustez metodológica e à consistência probatória em infrações ambientais. Métodos rápidos, seguros e reprodutíveis podem reduzir incertezas na tomada de decisão em campo e aprimorar a fundamentação técnica em autos de infração e procedimentos administrativos.

Diante disso, esta revisão estrutura e discute criticamente a base científica que sustenta o uso de reagentes cromogênicos associados à XRF como ferramentas de apoio à identificação preliminar de espécies madeireiras, examinando fundamentos químicos, fisiológicos, instrumentais e periciais, bem como lacunas e perspectivas para desenvolvimento de protocolos padronizados.

REFERENCIAL TEÓRICO

Desmatamento na Amazônia e os desafios da fiscalização ambiental

O desmatamento ilegal na Amazônia brasileira permanece como uma das principais pressões ambientais e socioeconômicas do país. As causas estruturais incluem expansão agropecuária, exploração madeireira irregular, grilagem de terras, abertura de estradas clandestinas e garimpo ilegal (BARLOW et al., 2016; FERRANTE; FEARNSIDE, 2020). Grande parte da madeira extraída ilegalmente é escoada por rotas de transporte terrestres e fluviais, muitas vezes acompanhada de documentação fraudulenta, o que dificulta a ação dos órgãos fiscalizadores.

De acordo com Barreto et al. (2016), a madeira extraída ilegalmente representa parcela substancial das cadeias produtivas regionais, sendo frequentemente inserida no mercado formal por meio de lavagem de madeira, processo no qual espécies de alto valor são substituídas por espécies de menor valor ou declaradas de origem distinta. A adulteração documental é considerada uma das principais modalidades de fraude, reforçando a necessidade de métodos de identificação independentes do documento que acompanha a carga.

Fragilidades atuais na fiscalização e identificação de espécies

A identificação da madeira em operações de fiscalização depende majoritariamente da análise anatômica macroscópica, baseada em características como cor, presença de parênquima, tipos de poros, raios e padrões de crescimento. Embora eficaz, essa técnica apresenta limitações quando:

- o material está serrado, fragmentado ou contaminado;
- a madeira apresenta variação anatômica intraespecífica;
- os fiscais encontram apenas pequenas lascas;
- a espécie pertence a grupos taxonomicamente complexos;
- ocorre tentativa intencional de confusão ou mistura de espécies.

Trabalhos como os de Gasson (2011) e Wheeler et al. (2011) demonstram que a identificação anatômica, ainda que reconhecida internacionalmente, não é suficiente sozinha para atestar espécie — exigindo, em casos contestados, exames químicos, espectrométricos ou genéticos.

A necessidade de abordagens periciais rápidas

A fiscalização ambiental lida com contextos operacionais que demandam respostas imediatas, incluindo barreiras rodoviárias, operações integradas, monitoramentos de serrarias e apreensão de cargas suspeitas. Métodos tradicionais de análise laboratorial,

como cromatografia ou DNA barcoding, embora robustos, não são adequados para triagem em campo por exigirem:

- infraestrutura laboratorial;
- pessoal altamente especializado;
- prazos de resposta incompatíveis com as operações;
- custos mais elevados.
- Assim, cresce a necessidade de procedimentos periciais rápidos, capazes de:
- diferenciar espécies com base em marcadores químicos;
- indicar suspeita razoável antes de apreensões;
- reduzir falsos negativos na triagem;
- orientar decisões administrativas e penais;
- subsidiar autos de infração e relatórios técnicos.

Nesse cenário, métodos colorimétricos seletivos e análises não destrutivas, como o XRF portátil, surgem como ferramentas de apoio para equipes de campo.

A integração entre Química Forense e fiscalização do desmatamento

A incorporação de análises químicas e espectrométricas ao arsenal técnico das instituições ambientais e forças de segurança representa uma tendência observada em diversos países. Técnicas rápidas baseadas em marcadores químicos naturais presentes na madeira (p. ex., alumínio, manganês, sílica) podem auxiliar no rastreamento de espécies de interesse econômico ou frequentemente alvo de exploração ilegal.

A literatura internacional reforça essa perspectiva:

- Braga et al. (2011) destacam a relevância de métodos físico-químicos na verificação de autenticidade de produtos florestais.
- Dormontt et al. (2015) ressaltam a importância da integração de ferramentas forenses para coibir o comércio internacional de madeira ilegal.
- Shackley (2011) demonstra que tecnologias como XRF portátil já são amplamente aceitas em contextos periciais.

Assim, métodos de triagem — como a reação com Cromo Azurol-S — e métodos instrumentais confirmatórios — como XRF — podem compor um protocolo analítico integrado, fortalecendo:

- eficiência das operações;
- clareza probatória;
- rastreabilidade da amostra;
- fundamento técnico para autos de infração;
- segurança jurídica das ações fiscalizatórias.

Relevância jurídica da identificação química

A legislação ambiental brasileira, especialmente a Lei nº 9.605/1998 (Lei de Crimes Ambientais), prevê responsabilização administrativa, civil e penal pelo transporte e comercialização de produtos florestais sem origem legal. Para sustentar tais processos, é necessário que o material apreendido seja corretamente identificado e vinculado à infração.

O uso de testes químicos rápidos como etapa preliminar constitui meio lícito de obtenção de indícios, desde que:

- siga protocolo documentado;
- respeite cadeia de custódia;
- seja acompanhado de laudo técnico competente;
- utilize método validado e reprodutível;
- tenha confirmação por técnica analítica complementar.

Nesse contexto, abordagens forenses químicas podem agregar valor probatório e auxiliar na formação de convicção técnica durante auditorias, perícias e processos judiciais.

Fundamentos da caracterização química da madeira

A madeira é um material biológico complexo composto por celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e cinzas minerais. Embora a morfologia celular constitua o método mais tradicional de identificação de espécies, sua composição química também apresenta variabilidade inter e intraespecífica relevante para fins de diferenciação (FENGEL; WEGENER, 1989; SJÖSTRÖM, 1993). Elementos minerais presentes na fração inorgânica — especialmente alumínio, cálcio, manganês e ferro — refletem tanto fatores fisiológicos quanto condições edáficas.

A presença e distribuição de elementos metálicos no tecido lenhoso podem atuar como marcadores naturais. Em espécies tropicais de ambientes fortemente intemperizados, variações específicas no conteúdo de alumínio têm sido relatadas como característica distintiva em determinadas famílias arbóreas (CHENERY, 1948). Assim, a análise elemento-específica torna-se uma abordagem complementar à anatomia para discriminação de madeiras, especialmente em contextos de fiscalização nos quais amostras são obtidas serradas, fragmentadas ou em condições de difícil caracterização visual.

Composição química da madeira e seu potencial discriminatório

A composição química e elementar da madeira tem sido apontada como um atributo potencialmente discriminatório entre espécies tropicais. Essa composição é influenciada pela fisiologia da planta, pelo ambiente, pelo solo e pelos processos metabólicos que regulam a absorção e deposição de elementos como alumínio, cálcio, ferro, manganês e potássio (FENGEL; WEGENER, 1989; SJÖSTRÖM, 1993). Em espécies do gênero *Erisma*,

estudos demonstram que o alumínio pode se acumular de forma diferenciada nos tecidos, configurando um possível marcador químico para fins de identificação (SANTANA, 2025).

A disponibilidade de alumínio em solos ácidos tropicais permite que certas espécies desenvolvam mecanismos de tolerância que incluem sua absorção e estabilização em tecidos vegetais. Chenery (1948) foi pioneiro ao demonstrar sistematicamente a ocorrência de alumínio acumulado em grupos taxonômicos específicos. Pesquisas posteriores confirmaram que famílias tropicais apresentam padrões consistentes de acúmulo do metal, utilizando-o como biomarcador funcional (WIMMER et al., 2009).

Segundo Wimmer et al. (2009), o alumínio pode se localizar predominantemente nas paredes celulares, nos raios parenquimáticos e em regiões com maior teor de lignina. Esse comportamento sugere que a presença de alumínio não é aleatória, mas fisiologicamente estruturada, abrindo espaço para seu uso como elemento discriminante.

Portanto, a implicação para a Química Forense: espécies acumuladoras podem ser rapidamente diferenciadas de espécies não acumuladoras a partir da detecção seletiva de Al^{3+} , viabilizando triagens em campo.

Reagentes cromogênicos e detecção de alumínio: enfoque no Cromo Azurol-S

O Cromo Azurol-S (CAS) é um corante cromogênico utilizado em química analítica e microbiologia para detecção de íons metálicos trivalentes. Schwyn e Neilands (1987) demonstraram sua elevada sensibilidade e afinidade por Al^{3+} , produzindo um complexo de coloração azul intensa.

Kukachka e Miller (1980) foram os primeiros a aplicar o CAS diretamente em tecidos lenhosos, evidenciando sua utilidade como teste qualitativo rápido para madeira com alto teor de alumínio. O método consiste na aplicação direta de solução do reagente sobre o fragmento de madeira seguido da observação imediata da coloração desenvolvida.

As principais características que tornam o CAS relevante para uso forense incluem:

- Resposta imediata (segundos a minutos),
- Alta sensibilidade para metais trivalentes,
- Aplicação simples e sem necessidade de preparo extensivo de amostra,
- Interpretação visual direta,
- Compatibilidade com análises instrumentais posteriores.

Contudo, o CAS não é absolutamente seletivo para alumínio, podendo reagir com Fe^{3+} em menor intensidade, o que reforça a necessidade de análise confirmatória.

Fluorescência de Raios X (XRF) na análise elementar de madeira

A Fluorescência de Raios X (XRF) é uma técnica instrumental não destrutiva amplamente reconhecida em estudos ambientais, arqueológicos e forenses. Sua

aplicabilidade em materiais orgânicos, incluindo madeira, foi consolidada em diversas pesquisas (POTTS; WEST, 2008; SHACKLEY, 2011).

Os principais fundamentos que tornam o XRF adequado para análises de madeira são:

- Detecção elementar direta, incluindo alumínio e outros metais;
- Não destrutividade, preservando a amostra para outras análises;
- Tempo de aquisição rápido (segundos);
- Portabilidade dos equipamentos, permitindo uso em campo;
- Reprodutibilidade, quando aplicadas calibrações apropriadas.

Shackley (2011) discute detalhadamente a aplicação do XRF portátil para materiais arqueológicos e naturais, destacando que, mesmo em matrizes orgânicas, resultados confiáveis podem ser obtidos mediante controle da superfície, tempo de exposição e condições de leitura.

O reagente Cromo Azurol-S (CAS) como identificador forense

O reagente Cromo Azurol-S (CAS) é amplamente utilizado para detecção de alumínio em tecidos vegetais por meio de spot-tests que revelam mudança cromática característica. Kukachka e Miller (1980) demonstraram que o CAS reage de forma seletiva com Al^{3+} em madeira, gerando coloração azul intensa. Posteriormente, Schwyn e Neilands (1987) ampliaram a compreensão do CAS ao descrevê-lo como um indicador universal para detecção de complexantes metálicos, reforçando seu potencial em análises rápidas forense.

Cadeia de custódia aplicada à química forense ambiental

A cadeia de custódia constitui requisito fundamental para aceitação jurídica de qualquer análise realizada com finalidade pericial. De acordo com SWGDRUG (2017), todos os procedimentos referentes à coleta, preservação, transporte e análise das amostras devem ser documentados e rastreáveis. O TCC de Santana (2025) descreve a manutenção criteriosa dessa cadeia durante as coletas realizadas em operações integradas, garantindo validade probatória e integridade dos resultados químicos.

Integração de métodos químicos e instrumentais na identificação forense de madeira

A utilização dos métodos químicos tradicionais com CAS representa uma tendência crescente na química forense aplicada ao meio ambiente. Essa integração amplia a segurança da identificação preliminar, melhora a qualidade da triagem e oferece suporte

científico à tomada de decisões durante operações de fiscalização florestal (WELZ; SPERLING, 1999; SANTANA, 2025). A adoção desses métodos contribui diretamente para o enfrentamento dos crimes ambientais e para o fortalecimento das instituições responsáveis pela proteção dos recursos florestais.

Os Métodos empregados na fiscalização ambiental precisam cumprir critérios analíticos e jurídicos. Entre os principais requisitos estão:

- rastreabilidade da amostra,
- documentação da cadeia de custódia,
- protocolo padronizado de coleta e análise,
- reprodutibilidade do método,
- validação analítica (sensibilidade, precisão, robustez),
- compatibilidade com auditorias e inspeções técnicas.

A Química Forense, portanto, exige procedimentos transparentes e documentados, que permitam reanálise e contestação. O uso do CAS como triagem e do XRF como confirmação atende a parte desses requisitos, mas somente após validação controlada poderá compor protocolos oficiais.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo baseou-se exclusivamente em uma revisão bibliográfica sistematizada, conduzida com o objetivo de identificar, selecionar, analisar criticamente e sintetizar o conhecimento científico disponível acerca da ocorrência de alumínio em espécies florestais, do uso do reagente Cromo Azurol-S (CAS) como indicador cromogênico para detecção de íons metálicos, e da aplicação da técnica de Fluorescência de Raios X (XRF) na análise elementar de madeira. A revisão buscou, ainda, reunir fundamentos consolidados na literatura sobre química da madeira, composição elementar de espécies tropicais e abordagens forenses associadas à identificação de produtos florestais. A busca bibliográfica foi realizada entre janeiro e novembro de 2024 nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, SciELO e Google Scholar, utilizando descritores em português e inglês, tais como “Cromo Azurol-S”, “Chrome Azurol S”, “CAS reagent”, “aluminium accumulation in plants”, “aluminium in wood”, “XRF wood analysis”, “forensic wood identification” e “chemical spot-test”. O período de busca abrangeu publicações entre 1948 — devido ao estudo clássico de Chenery sobre alumínio em plantas — e 2024, incorporando artigos científicos, capítulos de livros, relatórios técnicos e obras de referência consolidadas.

Foram incluídos exclusivamente trabalhos que apresentassem dados verificáveis sobre acúmulo de alumínio em plantas e madeira (CHENERY, 1948; WIMMER et al., 2009), estudos que descrevem aplicação do CAS como reagente cromogênico para detecção de metais trivalentes (KUKACHKA; MILLER, 1980; SCHWYN; NEILANDS, 1987), investigações

que tratam da utilização da XRF em madeira e matrizes lignocelulósicas (POTTS; WEST, 2008; SHACKLEY, 2011), além de obras clássicas que fundamentam a química da madeira e sua constituição (FENGEL; WEGENER, 1989; SJÖSTRÖM, 1993). Foram excluídos materiais que não apresentassem metodologia identificável, estudos irreprodutíveis, publicações sem revisão por pares (exceto documentos técnicos de órgãos oficiais) ou pesquisas que abordassem o reagente CAS apenas em contextos microbiológicos, sem relação com detecção de metais em tecidos vegetais.

Os resultados obtidos foram organizados de forma narrativa, adotando princípios do protocolo PRISMA para revisão sistematizada, embora sem a necessidade de meta-análise, devido à heterogeneidade metodológica entre os estudos. Inicialmente, procedeu-se à leitura de títulos e resumos para triagem; em seguida, os textos selecionados foram analisados integralmente, com ênfase em quatro dimensões essenciais: fundamentos bioquímicos do acúmulo de alumínio em espécies lenhosas; características químicas e analíticas do reagente Cromo Azurol-S; capacidades, limitações e requisitos instrumentais da Fluorescência de Raios X na análise de tecidos vegetais; e potencial de integração entre métodos colorimétricos e espectrométricos em contextos forenses e de fiscalização ambiental. A análise crítica considerou a robustez metodológica dos estudos, coerência interna, aplicabilidade prática e relevância para o desenvolvimento de abordagens rápidas de identificação de madeira.

O processo de síntese procurou identificar convergências conceituais, lacunas de conhecimento e direções de pesquisa recomendadas para aprofundamento futuro. Observou-se a existência de poucos trabalhos que correlacionem CAS e XRF diretamente, bem como a ausência de protocolos padronizados para aplicação do CAS em madeira. Verificou-se, ainda, escassez de estudos que investiguem a variabilidade intraespecífica do alumínio em espécies tropicais, o que limita o uso imediato do elemento como biomarcador universal. Assim, a revisão bibliográfica aqui realizada constitui base teórica para a construção de um projeto de pesquisa aprofundado, voltado à validação de métodos químicos e espectrométricos aplicáveis à identificação preliminar de madeira em contextos de fiscalização ambiental e perícia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A revisão da literatura evidencia que o reagente Cromo Azurol-S (CAS) apresenta potencial como ferramenta de triagem rápida para identificação preliminar de espécies madeireiras que acumulam alumínio em seus tecidos. Estudos clássicos demonstram que o CAS forma complexos fortemente coloridos com íons metálicos trivalentes, especialmente Al^{3+} , produzindo mudança cromática facilmente perceptível (SCHWYN; NEILANDS, 1987).

Essa propriedade fundamenta seu uso como teste colorimétrico, especialmente em matrizes lignocelulósicas onde a distribuição de elementos pode apresentar padrão

taxonômico. A aplicação do CAS diretamente sobre fragmentos de madeira foi descrita inicialmente por Kukachka e Miller (1980), que observaram desenvolvimento de coloração azul mais intensa em espécies reconhecidamente acumuladoras de alumínio, sugerindo que a resposta colorimétrica poderia refletir diferenças quantificáveis no teor elementar do metal.

A análise crítica dos estudos demonstra, porém, que o CAS opera como **indicador qualitativo**, dependente de variações estruturais da madeira, da concentração de extrativos, do pH, do teor de umidade e da forma de preparo da solução. Além disso, não se trata de um reagente absolutamente seletivo para alumínio, pois apresenta afinidade secundária por Fe^{3+} , ainda que com menor intensidade relativa (SCHWYN; NEILANDS, 1987). Assim, sua utilização isolada não permite afirmar com precisão a concentração elementar nem discriminar interferentes. Entretanto, essas limitações não anulam seu valor como triagem; pelo contrário, reforçam a necessidade de complementar o teste com métodos instrumentais que permitam confirmação.

Nesse contexto, a literatura aponta a Fluorescência de Raios X (XRF) como técnica confirmatória adequada. A XRF é capaz de detectar e estimar semiquantitativamente elementos como Al, Fe, Ca, K e Mn em madeira, utilizando leitura não destrutiva e tempo de aquisição rápido (POTTS; WEST, 2008; SHACKLEY, 2011). Sua aplicação em matrizes orgânicas requer cuidados específicos, mas trabalhos recentes demonstram que, quando ajustados os parâmetros de leitura, a técnica fornece dados consistentes sobre elementos leves, especialmente em amostras com acúmulo significativo (WIMMER et al., 2009). Assim, o XRF apresenta potencial para validar, de forma independente, o resultado prévio observado no teste CAS.

A comparação entre as duas abordagens — CAS e XRF — sugere complementaridade lógica: o CAS funciona como ferramenta inicial de triagem, orientando a seleção de amostras suspeitas; o XRF, por sua vez, fornece confirmação elementar da presença e magnitude do alumínio.

Essa articulação atende ao paradigma forense de “triagem + confirmação”, amplamente recomendado para métodos periciais que envolvem substâncias químicas ou materiais biológicos. Embora não existam, até o momento, estudos que realizem correlação estatística rigorosa entre intensidade colorimétrica do CAS e concentração de Al medida por XRF em madeira, a literatura aponta que essa relação é plausível, considerando que a coloração do reagente depende diretamente da disponibilidade do metal na superfície reativa do material.

A síntese das evidências encontradas revela, portanto, duas conclusões principais. Primeiro, o CAS é um reagente viável como método de triagem rápida em fiscalizações, especialmente em situações que exigem decisão imediata sobre retenção, apreensão ou encaminhamento de material madeireiro.

Segundo sua aplicação adquire robustez técnico-científica apenas quando integrada à análise elementar por XRF, que confere rastreabilidade, reprodutibilidade e documentação instrumental, fortalecendo o valor pericial dos resultados. A dupla abordagem, ao unir simplicidade operacional e confirmação analítica, apresenta potencial para subsidiar futuros protocolos operacionais de identificação preliminar de madeira, desde que validada experimentalmente em diferentes espécies, condições de amostragem e níveis de concentração elementar.

Por fim, a revisão evidencia lacunas a serem enfrentadas por pesquisas futuras: ausência de padronização da solução CAS para uso em madeira, inexistência de estudos comparativos CAS–XRF com análise estatística, influência de fatores ambientais na resposta do reagente e necessidade de calibrar o XRF especificamente para matrizes vegetais. A superação dessas lacunas permitirá estabelecer um método confiável, simples e de baixo custo, capaz de contribuir significativamente para o enfrentamento do desmatamento ilegal e para a produção de evidências em fiscalização ambiental.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A literatura científica analisada demonstra que o reagente Cromo Azurol-S (CAS) possui potencial significativo como ferramenta preliminar na identificação química de alumínio presente em materiais lignocelulósicos, incluindo amostras de madeira. Desde sua aplicação pioneira em testes colorimétricos para metais trivalentes (Schwyn; Neilands, 1987) e sua utilização específica em tecidos lenhosos por Kukachka e Miller (1980), o CAS tem sido reconhecido como um reagente sensível, de resposta imediata e operacionalmente simples. Isso o torna particularmente promissor para cenários em que a triagem rápida é relevante, como ações de fiscalização ambiental e etapas prévias de perícias forenses envolvendo madeira suspeita de origem ilegal.

Ao mesmo tempo, a revisão bibliográfica evidencia que o uso do Cromo Azurol-S não é conclusivo por si só. Trata-se de um teste indicativo, sujeito a interferências e sem especificidade absoluta, uma vez que o reagente também pode complexar íons metálicos distintos, a depender da matriz e do ambiente químico.

Esse aspecto é amplamente reconhecido na literatura e reforça a necessidade de que qualquer sinal obtido por CAS seja posteriormente confirmado por técnicas analíticas robustas e validadas, como a Fluorescência de Raios X (XRF), amplamente empregada para análises elementares não destrutivas e já consolidada em pesquisas com materiais orgânicos, solos, artefatos e madeira (Potts; West, 2008; Shackley, 2011). Assim, o CAS se destaca como triagem útil, mas somente a confirmação instrumental — como a quantificação elementar de alumínio por XRF — pode conferir segurança técnica e confiabilidade pericial ao resultado.

Além disso, o acúmulo de alumínio em espécies vegetais, descrito desde os estudos clássicos de Chenery (1948) e aprofundado posteriormente por Wimmer et al. (2009), reforça o fundamento bioquímico para pesquisas que busquem compreender as variações entre espécies, famílias botânicas e ambientes edáficos.

Tal base científica sustenta a plausibilidade de que o CAS possa, no futuro, auxiliar na diferenciação preliminar de espécies madeireiras que apresentem padrões consistentes de acúmulo de alumínio, especialmente em contextos de fiscalização ambiental em que amostras são frequentemente pequenas, fragmentadas ou desprovidas de elementos anatômicos diagnósticos.

Diante do conjunto de evidências, conclui-se que o Cromo Azurol-S apresenta potencial para se tornar um aliado relevante em protocolos de triagem química voltados à identificação preliminar de madeira em fiscalizações e perícias ambientais.

No entanto, é imprescindível enfatizar que tal aplicação depende de validação científica rigorosa, contemplando estudos de sensibilidade, especificidade, repetibilidade e robustez, além da necessária correlação estatística entre a resposta colorimétrica e a concentração efetiva de alumínio determinada por métodos instrumentais como XRF, ICP-OES ou técnicas equivalentes.

Por fim, é pertinente registrar que este autor possui a intenção de desenvolver, em pesquisas futuras de mestrado, uma investigação aprofundada acerca da viabilidade pericial do reagente Cromo Azurol-S na identificação de espécies madeireiras. O objetivo é examinar, analisar e constatar, com rigor metodológico e validação experimental, em que medida o CAS pode ser integrado, de forma tecnicamente confiável e juridicamente admissível, às práticas de perícia química aplicada à fiscalização ambiental e ao combate ao desmatamento ilegal. Assim, esta revisão bibliográfica representa o alicerce conceitual que orientará etapas experimentais futuras, necessárias para transformar uma hipótese promissora em um método cientificamente validado e potencialmente aplicável em contextos forenses.

REFERÊNCIAS

BARLOW, J. et al. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. **Nature**, v. 535, p. 144–147, 2016. DOI: 10.1038/nature18326.

BARRETO, P. et al. A ilegalidade no setor florestal da Amazônia brasileira. **Imazon**, Belém, 2016. Disponível em: <https://imazon.org.br/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

BRAGA, J. et al. Wood identification in the context of international trade: a forensic approach. **IAWA Journal**, v. 32, n. 2, p. 199–209, 2011. DOI: 10.1163/22941932-90000050.

CHENERY, E. M. Aluminium in plants and its relation to plant tissues. **Annals of Botany**, v. 12, p. 121–136, 1948.

DORMONTT, E. E. et al. Forensic timber identification: It's time to integrate species and provenance. **Biological Conservation**, v. 191, p. 790–798, 2015. DOI: 10.1016/j.biocon.2015.07.028.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 1989.

FERRANTE, L.; FEARNSIDE, P. M. Brazil's policy shifts threaten the Amazon rainforest. **Science**, v. 369, p. 592, 2020. DOI: 10.1126/science.abd7777.

GASSON, P. How precise can wood identification be? **IAWA Journal**, v. 32, n. 2, p. 137–154, 2011.

KUKACHKA, B. F.; MILLER, R. B. A chemical spot-test for aluminum and its value in wood identification. **IAWA Bulletin**, n.s., v. 1, p. 104–109, 1980. DOI: 10.1163/22941932-90000699.

POTTS, P. J.; WEST, M. (Ed.). **Portable X-ray fluorescence spectrometry: Capabilities for in situ analysis**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2008.

SCHWYN, B.; NEILANDS, J. B. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. **Analytical Biochemistry**, v. 160, p. 47–56, 1987. DOI: 10.1016/0003-2697(87)90612-9.

SHACKLEY, M. S. **An introduction to X-ray fluorescence (XRF) analysis in archaeology**. New York: Springer, 2011.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1993.

SWGDRUG. **Scientific Working Group for the Analysis of Seized Drugs – Recommendations**. Version 7.0. 2017. Disponível em: <https://www.swgdrug.org>. Acesso em: 12 jan. 2025.

WELZ, B.; SPERLING, M. **Atomic Absorption Spectrometry**. 3. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 1999.

WHEELER, E. A.; BASSETT, N.; GASSEN, P. IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification. **IAWA Journal**, v. 32, n. 2, p. 213–232, 2011.

WIMMER, R. et al. Aluminium in wood: distribution and concentration in tropical tree species. **Trees**, v. 23, n. 2, p. 329–336, 2009. DOI: 10.1007/s00468-008-0278-8.