

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA**

RAFAEL ALVES CHAGAS

**QUÍMICA FORENSE:
A importância da química na investigação criminal**

ITUMBIARA - GO

2026



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Rafael Alves Chagas.

Matrícula: 20191040030341.

Título do Trabalho: Química forense: a importância da Química na investigação criminal.

Autorização - Marque uma das opções

1. (**X**) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 13/07/2026.

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL ALVES CHAGAS**
Data: 17/07/2026 17:07:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

RAFAEL ALVES CHAGAS

QUÍMICA FORENSE:

A importância da química na investigação criminal

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca avaliadora do Curso de Licenciatura em Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Licenciado em Química.

Orientador(a): Prof. Dr. Luciano Alves da Silva

ITUMBIARA - GO

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C433 Chagas, Rafael Alves

Química forense: a importância da química na investigação criminal/ Rafael Alves Chagas. -- Itumbiara, 2026.
22 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Química) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Alves da Silva.

1. Química legal. 2. Investigação criminal. 3. Prova pericial.
I. Título. II. Chagas, Rafael Alves. III. Silva, Luciano Alves da. IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 542

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecária: Marla de Souza Correia CRB-1/3011

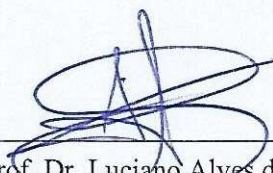
RAFAEL ALVES CHAGAS

QUÍMICA FORENSE:
A importância da Química na investigação criminal

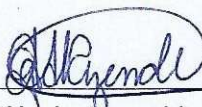
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca examinadora do Curso de Licenciatura em Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a conclusão do Curso de Licenciatura em Química e obtenção do título de Licenciado em Química.

Área de concentração: Ciências Exatas e da Terra; Química.

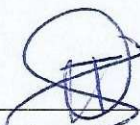
Aprovado em 7 de julho de 2026.



Prof. Dr. Luciano Alves da Silva
Orientador - IFG – Câmpus Itumbiara



Profa. Dra. Gláucia Aparecida Andrade Rezende
Avaliadora - IFG – Câmpus Itumbiara



Profa. Dra. Tatiana Aparecida Rosa da Silva
Avaliadora - IFG – Câmpus Itumbiara

ITUMBIARA-GO
2026

RESUMO

A química forense constitui uma área estratégica da investigação criminal, pois possibilita a identificação, a caracterização e a interpretação de vestígios materiais de interesse jurídico por meio de métodos científicos. Este estudo teve como objetivo analisar a importância da química forense na investigação criminal, com ênfase na contribuição das técnicas químicas para a identificação, a análise e a interpretação de vestígios, bem como na avaliação de sua eficiência, de suas aplicações e de suas limitações no contexto pericial contemporâneo. A pesquisa caracterizou-se como revisão narrativa de literatura, baseada em 19 fontes efetivamente analisadas, entre artigos científicos, trabalhos de apoio conceitual e uma obra metodológica. Os resultados evidenciaram que a cromatografia, a espectrometria de massas, a espectroscopia Raman, o infravermelho próximo portátil e as técnicas MALDI, DESI e DART ampliam a capacidade de triagem, confirmação e interpretação de vestígios em diferentes contextos investigativos. Observou-se, ainda, que a eficiência dessas abordagens depende da sensibilidade, da seletividade, da validação, do controle de qualidade, da adequação à matriz e da interpretação crítica dos resultados. Concluiu-se que a química forense desempenha papel decisivo na elucidação de crimes e na produção de prova técnico-científica confiável, embora ainda enfrente desafios relacionados às novas substâncias psicoativas, à complexidade das matrizes forenses, à padronização interpretativa e à formação especializada dos profissionais.

Palavras-chave: química forense; investigação criminal; vestígios; técnicas analíticas; prova científica.

ABSTRACT

Forensic chemistry is a strategic field of criminal investigation because it enables the identification, characterization, and interpretation of legally relevant material traces through scientific methods. This study aimed to analyze the importance of forensic chemistry in criminal investigation, emphasizing the contribution of chemical techniques to the identification, analysis, and interpretation of traces and assessing their efficiency, applications, and limitations in the contemporary forensic context. The research was designed as a narrative literature review based on 19 sources effectively analyzed, including scientific articles, conceptual support works, and one methodological book. The findings showed that chromatography, mass spectrometry, Raman spectroscopy, portable near-infrared spectroscopy, and MALDI, DESI, and DART techniques expand screening, confirmation, and interpretation capabilities in different investigative contexts. Their effectiveness depends on sensitivity, selectivity, validation, quality control, suitability for the matrix, and critical interpretation of results. It is concluded that forensic chemistry plays a decisive role in crime investigation and in the production of reliable technical-scientific evidence, although it still faces challenges related to new psychoactive substances, complex forensic matrices, interpretive standardization, and specialized professional training.

Keywords: forensic chemistry; criminal investigation; trace evidence; analytical techniques; scientific evidence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectrômetro de massas de alta resolução em ambiente laboratorial	
.....	17
Figura 2 - Sistema de cromatografia líquida acoplada à espectrometria de	
massas.....	18
Figura 3 - Equipamento para análises Raman, modelo i-Raman da BW&Tek	19

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre técnicas químico-forenses.....	21
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACS	- American Chemical Society
CG-EM	- Cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (equivalente internacional: GC-MS)
CL-EM	- Cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas (equivalente internacional: LC-MS)
CL-EMAR	- Cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas de alta resolução (LC-HRMS)
CLUE	- Cromatografia líquida de ultra-alta eficiência (UHPLC)
DART	- Análise direta em tempo real (sigla em inglês)
DESI	- Ionização por dessorção por eletrospray (sigla em inglês)
EM-PAI	- Espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS)
EM-RI	- Espectrometria de massas de razão isotópica (IRMS)
EMAR	- Espectrometria de massas de alta resolução (HRMS)
MALDI	- Dessorção/ionização a laser assistida por matriz
MALDI-MSI	- Imageamento por espectrometria de massas com MALDI
MEV-EDX	- Microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia de raios X (SEM-EDX)
NIR	- Infravermelho próximo (sigla em inglês)
NPS	- Novas substâncias psicoativas (sigla em inglês)
SERS	- Espectroscopia Raman intensificada por superfície (sigla em inglês)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Problematização	9
1.2 Delimitação do tema	10
1.3 Justificativa	10
1.4 Hipótese.....	10
1.5 Objetivo geral.....	10
1.6 Objetivos específicos.....	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 A Química Forense	12
2.2 Princípios e técnicas.....	12
2.3 Base para solução de crimes.....	13
2.4 Métodos forenses.....	13
3. METODOLOGIA.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4.1 Técnicas e equipamentos utilizados na química forense	17
4.2 Aplicações e relevância da química forense	20
4.3 Eficiência das técnicas na resolução de crimes.....	20
4.4 Comparação entre métodos químicos forenses aplicados	21
4.5 Limitações e desafios da química forense atual	22
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
REFERÊNCIAS	25

1. INTRODUÇÃO

1.1 Problematização

A química forense consolidou-se como área estratégica da investigação criminal por permitir que vestígios materiais sejam identificados, caracterizados e interpretados de modo cientificamente fundamentado (Roux *et al.*, 2022).

Sua relevância decorre da capacidade de converter substâncias, resíduos e materiais encontrados em cenas de crime em informações probatórias úteis à reconstrução de eventos e à tomada de decisão judicial, desde que o exame considere composição, transferência, persistência, variabilidade e contexto do vestígio (Trejos; Koch; Mehlretter, 2020).

O avanço tecnológico ampliou o campo de atuação da química forense por meio da cromatografia, da espectrometria de massas, da espectroscopia Raman, da dessorção/ionização a laser assistida por matriz (MALDI), da ionização por dessorção por eletrospray (DESI), da análise direta em tempo real (DART) e da espectroscopia no infravermelho próximo aplicadas a drogas, resíduos de disparo, fluidos biológicos, documentos e outros vestígios (Ahmed; Altamimi; Hachem, 2022). A diversidade das matrizes, a emergência de novas substâncias psicoativas, a necessidade de validação contínua e a interpretação dos resultados, entretanto, impõem desafios técnicos e metodológicos à rotina pericial (Krotulski *et al.*, 2025; Wille *et al.*, 2022).

Nesse cenário, a discussão precisa relacionar as técnicas analíticas ao raciocínio pericial, ao controle da incerteza e à validade da conclusão, pois o resultado instrumental não possui significado autônomo fora do contexto investigado (Huhtala *et al.*, 2023; Roux *et al.*, 2022).

A pergunta que norteia o trabalho é: de que maneira as técnicas da química forense contribuem para a investigação criminal e quais são os principais desafios relacionados à sua aplicação prática, à confiabilidade analítica e à interpretação dos resultados nos contextos pericial e judicial?

A formulação desse problema justifica-se porque a eficácia da prova científica depende não apenas da existência de tecnologias avançadas, mas também da adequação metodológica, do controle de qualidade e da articulação entre o resultado laboratorial e as circunstâncias do caso (Huhtala *et al.*, 2023; Roux *et al.*, 2022).

1.2 Delimitação do tema

O estudo delimita-se à importância da química forense na investigação criminal, com ênfase nas técnicas empregadas na triagem, na identificação, na confirmação e na interpretação de drogas ilícitas, resíduos de disparo, substâncias tóxicas e outros materiais-traço de interesse jurídico (Ahmed; Altamimi; Hachem, 2022; Serol *et al.*, 2023).

1.3 Justificativa

A escolha do tema justifica-se pela relevância da química forense para a produção de prova científica confiável, uma vez que a análise química pode identificar substâncias ilícitas, confirmar intoxicações, associar vestígios a pessoas ou locais e fornecer elementos para a reconstrução dos fatos (Santos *et al.*, 2021; Trejos; Koch; Mehlretter, 2020).

1.4 Hipótese

Sustenta-se a hipótese de que técnicas químico-forenses validadas ampliam a capacidade de identificar, diferenciar e interpretar vestígios relevantes, aumentando a precisão analítica e a fundamentação técnico-científica dos laudos (Bates; Helm; Barkholtz, 2024).

1.5 Objetivo geral

Compreender e analisar criticamente a importância da Química Forense na investigação criminal, com foco na contribuição das técnicas químicas para a identificação, análise e interpretação de vestígios de interesse jurídico.

1.6 Objetivos específicos

- I. Apresentar os principais fundamentos e técnicas da Química Forense aplicados à investigação criminal.
- II. Examinar as aplicações dos métodos químicos na análise de vestígios forenses em diferentes contextos investigativos.
- III. Avaliar a eficiência das técnicas químico-forenses na produção de evidências cientificamente confiáveis.

- IV. Identificar os principais desafios e limitações relacionados à aplicação prática da Química Forense no contexto pericial contemporâneo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A Química Forense

A química forense aplica princípios e técnicas químicas à análise de questões de interesse jurídico, especialmente à identificação e à interpretação de evidências materiais relacionadas a infrações penais (Santos *et al.*, 2021).

O campo examina drogas, resíduos de explosivos, tintas, fibras, vidros e outras matrizes encontradas em cenas de crime, produzindo informações que podem auxiliar na identificação de substâncias, na comparação de amostras e na reconstrução de eventos (Lima *et al.*, 2018). A utilidade jurídica do resultado depende de método adequado, controle de qualidade e interpretação compatível com os limites da técnica utilizada (Roux *et al.*, 2022).

A atuação do químico forense abrange perícias policiais, ambientais, trabalhistas e industriais, além do controle antidopagem, em contextos nos quais a caracterização de substâncias e materiais pode esclarecer fraudes, contaminações e outras infrações (Santos *et al.*, 2021).

2.2 Princípios e técnicas

A química forense parte do entendimento de que o vestígio não possui significado autônomo, pois sua interpretação depende do contexto, do tempo e da atividade investigada e integra coleta, preservação, seleção metodológica, controle de qualidade e avaliação técnico-científica (Roux *et al.*, 2022).

Roux *et al.* (2022) situam o vestígio, a incerteza e a relação entre o sinal material e o evento pretérito no centro da ciência forense, enquanto Trejos, Koch e Mehlretter (2020) demonstram que a validade do exame de materiais-traço depende do conhecimento sobre composição, transferência, persistência e variabilidade, além de seletividade, sensibilidade, repetibilidade e rastreabilidade.

A prática contemporânea combina métodos laboratoriais confirmatórios, ferramentas de triagem rápida e modelos quimiométricos para organizar e interpretar dados complexos (Huhtala *et al.*, 2023). Os espectrômetros miniaturizados de infravermelho próximo ampliam a capacidade de análise em

campo por oferecerem rapidez, objetividade e baixo consumo de amostra (Foli *et al.*, 2024).

A integração de técnicas cromatográficas, espectroscópicas e estatísticas aumenta o poder discriminatório dos exames de pólvora e resíduos de disparo, mas os resultados quimiométricos devem ser submetidos a avaliações operacional, química e forense antes de fundamentarem uma conclusão pericial (Huhtala *et al.*, 2023; Serol *et al.*, 2023).

2.3 Base para solução de crimes

A contribuição da química forense para a solução de crimes reside na conversão de vestígios em informação probatória, processo em que a relevância do sinal material decorre de sua relação lógica com a atividade investigada e com o contexto do caso (Roux *et al.*, 2022).

Materiais-traço, como fibras, tintas e vidros, podem apoiar associações, exclusões e reconstruções de contato quando avaliados quanto à composição, à transferência e à persistência (Trejos; Koch; Mehlretter, 2020). No perfilamento de drogas ilícitas, impurezas, adulterantes e marcadores químicos podem indicar processos de síntese, semelhanças entre apreensões e possíveis rotas de distribuição (Ahmed; Altamimi; Hachem, 2022).

A análise química de resíduos de disparo pode contribuir para diferenciar munições e interpretar eventos balísticos (Serol *et al.*, 2023). Na toxicologia, a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas de alta resolução (CL-EMAR; do inglês LC-HRMS) amplia a triagem de múltiplos analitos em matrizes complexas, desde que o método seja validado e submetido a garantia da qualidade (Bates; Helm; Barkholtz, 2024; Wille *et al.*, 2022).

2.4 Métodos forenses

Os métodos químicos forenses incluem cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM; do inglês GC-MS), cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas (CL-EM; do inglês LC-MS), cromatografia líquida de ultra-alta eficiência (CLUE), espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (EM-PAI), espectrometria de massas de razão isotópica

(EM-RI) e técnicas espectroscópicas, escolhidas conforme a matriz e a pergunta pericial (Ahmed; Altamimi; Hachem, 2022).

No exame de resíduos de disparo, a microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia de raios X, a CL-EM/EM, a CLUE-EM/EM e os métodos espectroscópicos permitem caracterizar componentes orgânicos e inorgânicos, enquanto a CG-EM permanece relevante para identificação confirmatória de compostos voláteis e semivoláteis em matrizes complexas (Ahmed; Altamimi; Hachem, 2022; Serol *et al.*, 2023).

A espectrometria de massas MALDI e seu modo de imageamento fornecem perfis químicos e distribuição espacial de analitos em impressões digitais, cabelos, documentos e outras matrizes (De Almeida *et al.*, 2024). O infravermelho próximo portátil favorece a triagem em campo, enquanto métodos enantiosseletivos distinguem compostos quirais cujos isômeros podem apresentar efeitos farmacológicos, toxicológicos e legais distintos (Busardò *et al.*, 2024; Foli *et al.*, 2024).

3. METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como revisão narrativa de literatura, modalidade que permite integrar e interpretar estudos sobre um tema amplo sem reproduzir o protocolo exaustivo de uma revisão sistemática (Lakatos; Marconi, 2022).

O levantamento bibliográfico foi realizado entre março e abril de 2026 nas bases Google Scholar, PubMed, ScienceDirect, ACS Publications, MDPI, Oxford Academic e SpringerLink, mediante combinações dos descritores “forensic chemistry”, “trace evidence”, “illicit drug profiling”, “gunshot residue”, “high-resolution mass spectrometry”, “Raman spectroscopy”, “MALDI”, “DESI”, “DART”, “novel psychoactive substances” e “enantioselective forensic analysis”.

As buscas recuperaram 19 fontes pertinentes, e as 19 permaneceram no corpus efetivamente analisado após verificação de aderência ao tema e retirada de duplicidades: 18 publicações temáticas e uma obra metodológica. Entre as fontes temáticas, 14 foram publicadas entre 2020 e 2025 e quatro trabalhos de 2016 e 2018 foram mantidos como apoio histórico e conceitual às técnicas já consolidadas. Foram incluídos textos completos em português ou inglês, com relação direta com métodos, aplicações, eficiência ou limitações da química forense e com DOI ou endereço editorial verificável; foram excluídos materiais duplicados, sem acesso ao texto completo, sem rastreabilidade bibliográfica ou sem relação direta com os objetivos do estudo.

A análise ocorreu por leitura integral, extração das contribuições centrais e agrupamento comparativo das fontes em quatro eixos temáticos:

- I. Princípios e técnicas da química forense;
- II. Papel da química forense na elucidação de crimes;
- III. Métodos forenses aplicados e eficiência analítica;
- IV. Comparação metodológica, qualidade analítica e limitações atuais.

Em cada eixo, foram comparados o tipo de técnica, a matriz analisada, a finalidade pericial, as vantagens, as limitações e os requisitos de validação e controle de qualidade. A síntese interpretativa priorizou recorrências, convergências e divergências entre os estudos, com ênfase em espectrometria

de massas, espectroscopia Raman, resíduos de disparo, quimiometria e novas substâncias psicoativas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Técnicas e equipamentos utilizados na química forense

A espectrometria de massas é uma técnica central da química forense porque converte moléculas em íons, separa-os conforme a razão massa/carga e registra um espectro que pode ser comparado a padrões e bibliotecas para identificar ou confirmar compostos (Lima *et al.*, 2018).

Embora possa consumir parte da amostra, a elevada sensibilidade da espectrometria de massas favorece a detecção de analitos em baixas concentrações e sua associação a diferentes sistemas de introdução e separação (Ferreira, 2016; Santos *et al.*, 2021). A Figura 1 apresenta um espectrômetro de massas de alta resolução utilizado em ambiente laboratorial.

Figura 1 - Espectrômetro de massas de alta resolução em ambiente laboratorial



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectrometria_de_massa.

O equipamento reúne fonte de ionização, analisador de massas e detector; na rotina forense, o espectro resultante permite comparar sinais da amostra com padrões e bibliotecas, apoiando a identificação confirmatória de compostos.

Entre as formas de ionização ambiente, a ionização sônica por spray em condição ambiente acoplada à espectrometria de massas (EASI-EM) utiliza um

spray sônico para dessorver e ionizar componentes da amostra sem exigir alta voltagem, favorecendo análises rápidas de drogas e documentos (Ferreira, 2016; Santos *et al.*, 2021).

A cromatografia separa os componentes de uma mistura pela distribuição diferencial entre uma fase estacionária e uma fase móvel, o que produz tempos de retenção distintos e permite analisar matrizes complexas (Araujo, 2016; Lima *et al.*, 2018).

Na cromatografia líquida, a fase móvel é líquida e percorre uma coluna com fase estacionária apropriada, enquanto na cromatografia gasosa um gás de arraste transporta compostos volatilizados, diferenças que condicionam o preparo da amostra e o conjunto de analitos examináveis (Araujo, 2016).

O acoplamento da cromatografia à espectrometria de massas reúne o poder de separação da primeira técnica e a capacidade de identificação da segunda, tornando a CG-EM e a CL-EM importantes para confirmação e quantificação de substâncias forenses (Ahmed; Altamimi; Hachem, 2022). A Figura 2 exemplifica um sistema de cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas de alta resolução.

Figura 2 - Sistema de cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas



Fonte: <https://www.central.dq.ufscar.br/servicos-e-projetos/espectrometria-de-massas-de-alta-resolucao-2013-hrms-q-tof>.

A configuração ilustrada integra a separação cromatográfica à detecção por espectrometria de massas, permitindo distinguir componentes de misturas antes da identificação e aumentando a seletividade em amostras complexas.

A colorimetria utiliza reações que produzem mudanças de cor para indicar preliminarmente a presença de determinadas classes de substâncias, oferecendo baixo custo e resposta rápida (Araujo, 2016). Como compostos diferentes podem produzir respostas semelhantes, o resultado colorimétrico deve ser tratado como triagem e confirmado por método mais seletivo (Ferreira, 2016).

A espectroscopia Raman mede a interação da radiação com as vibrações moleculares e pode analisar drogas, tintas, solos e resíduos de disparo com pouca preparação e baixo consumo de amostra, embora a fluorescência e a sensibilidade possam limitar algumas aplicações (Chauhan; Gupta; Sharma, 2025). A Figura 3 mostra um equipamento Raman portátil acoplado a um microscópio para análise localizada de vestígios.

Figura 3 - Equipamento para análises Raman, modelo i-Raman da BW&Tek



Fonte: <https://www.central.dq.ufscar.br/servicos-e-projetos/espectroscopia-raman>.

O conjunto combina uma fonte laser, sistema óptico e detector espectral, podendo examinar regiões pequenas do vestígio com pouca preparação; a interpretação deve considerar fluorescência, intensidade do sinal e comparação com espectros de referência.

4.2 Aplicações e relevância da química forense

Na perícia ambiental, a química forense identifica e quantifica poluentes em solo, água e ar, fornecendo dados para avaliar extensão do dano, possíveis fontes e responsabilidades associadas (Ferreira, 2016; Santos *et al.*, 2021).

Em contextos industriais e trabalhistas, a análise química pode verificar conformidade de produtos, condições de processo, presença de substâncias perigosas e possíveis causas de acidentes ou contaminações (Santos *et al.*, 2021; Tavares, 2018).

Os resíduos produzidos pela combustão de cartuchos contêm componentes orgânicos e inorgânicos que podem auxiliar na identificação de munições e na interpretação das circunstâncias de um disparo, desde que transferência, persistência e contaminação sejam consideradas (Santos *et al.*, 2021; Serol *et al.*, 2023).

Na investigação de drogas ilícitas, métodos colorimétricos oferecem triagem rápida em campo, enquanto técnicas cromatográficas e espectrométricas fornecem confirmação mais seletiva e informações sobre adulterantes, impurezas e perfil químico das apreensões (Ahmed; Altamimi; Hachem, 2022; Ferreira, 2016).

Na toxicologia forense, a identificação de venenos e metabólitos combina conhecimento sobre efeitos tóxicos, preparo de amostras e métodos instrumentais sensíveis, superando testes históricos, como o de Marsh para arsênio, quando se exigem confirmação e quantificação em matrizes complexas (Araujo, 2016; Tavares, 2018).

A integração entre cromatografia e espectrometria de massas é especialmente relevante em homicídios, intoxicações, drogas, documentos e resíduos de disparo porque permite separar misturas e identificar compostos com maior poder confirmatório (Ferreira, 2016).

4.3 Eficiência das técnicas na resolução de crimes

A eficiência químico-forense resulta da combinação entre sensibilidade, seletividade, robustez, reprodutibilidade e utilidade investigativa, e não apenas da rapidez da análise (Wille *et al.*, 2022). Em sangue total, a triagem por CL-EMAR com aquisição independente de dados apresentou desempenho

satisfatório para 35 analitos de interesse forense e foi aplicada a 166 amostras autênticas, demonstrando potencial para fluxos de triagem ampla (Bates; Helm; Barkholtz, 2024).

Os instrumentos miniaturizados de infravermelho próximo aumentam a eficiência operacional ao permitir análises rápidas em campo, reduzir o intervalo entre apreensão e triagem e orientar a seleção de amostras para exames confirmatórios (Foli *et al.*, 2024).

A eficiência depende do lugar de cada técnica no fluxo de trabalho: Raman, DESI, DART e MALDI favorecem triagem e exploração inicial, enquanto a cromatografia e a espectrometria de alta resolução oferecem maior capacidade confirmatória em misturas complexas (Conceição *et al.*, 2025; De Almeida *et al.*, 2024).

A espectroscopia Raman ganha desempenho quando associada à espectroscopia Raman intensificada por superfície (SERS) e ao micro-Raman, ao passo que DESI e DART ampliam a análise direta de superfícies e vestígios complexos (Chauhan; Gupta; Sharma, 2025; Conceição *et al.*, 2025). Mesmo técnicas rápidas e sensíveis somente sustentam uma decisão pericial quando submetidas a validação, controle de qualidade e interpretação crítica (Huhtala *et al.*, 2023).

4.4 Comparação entre métodos químicos forenses aplicados

Não existe técnica universalmente superior, pois a escolha depende da matriz, do vestígio e da pergunta pericial; a CG-EM, a CL-EM, a CLUE-EM e a CL-EMAR destacam-se em amostras complexas e em investigações que exigem identificação confirmatória, quantificação e perfilamento de impurezas, adulterantes e marcadores químicos (Ahmed; Altamimi; Hachem, 2022)..

Quadro 1 - Comparação entre técnicas químico-forenses

Técnica	Vantagem	Limitação	Aplicação
CG-EM / CL-EM	Alta sensibilidade, seletividade e identificação confirmatória.	Exige laboratório, preparo de amostra e profissional especializado.	Drogas ilícitas, toxicologia, resíduos e substâncias orgânicas.
Raman / NIR portátil	Análise rápida, pouco destrutiva e aplicável em campo.	Pode sofrer interferência por fluorescência, matriz e bibliotecas limitadas.	Triagem preliminar de drogas, tintas, solos e materiais-traço.

Técnica	Vantagem	Limitação	Aplicação
MALDI-EM / MALDI-MSI	Fornecer perfil químico e distribuição espacial dos analitos.	Maior custo instrumental e necessidade de interpretação especializada.	Impressões digitais, cabelos, documentos e resíduos orgânicos.
DESI-EM / DART-EM	Permite análise direta de superfícies com pouca preparação.	Pode exigir confirmação complementar em casos complexos.	Triagem de superfícies, documentos, drogas e vestígios diversos.
Métodos enantiosseletivos	Diferenciam isômeros e enantiômeros com efeitos distintos.	São mais demorados, caros e tecnicamente exigentes.	Toxicologia, drogas quirais e interpretação farmacológica/legal.

Fonte: elaborada pelo autor com base em Ahmed, Altamimi e Hachem (2022), De Almeida *et al.* (2024), Foli *et al.* (2024), Busardò *et al.* (2024), Chauhan, Gupta e Sharma (2025) e Conceição *et al.* (2025).

Raman e infravermelho próximo oferecem rapidez, baixo consumo de amostra e possibilidade de uso em campo, embora a fluorescência, os efeitos de matriz e a dependência de bibliotecas possam exigir confirmação por técnica cromatográfica ou espectrométrica (Chauhan; Gupta; Sharma, 2025; Foli *et al.*, 2024).

MALDI e seu modo de imageamento acrescentam informação espacial, DESI e DART permitem análise direta com pouca preparação, métodos enantiosseletivos distinguem compostos quirais e a alta resolução amplia a triagem de drogas emergentes, vantagens acompanhadas por custos, requisitos de interpretação e necessidade de confirmação variáveis (Bates; Helm; Barkholtz, 2024; Busardò *et al.*, 2024; Conceição *et al.*, 2025; De Almeida *et al.*, 2024).

4.5 Limitações e desafios da química forense atual

Os principais desafios atuais envolvem atualização metodológica, padronização interpretativa, formação especializada, alto custo instrumental e integração dos resultados laboratoriais ao contexto investigativo e jurídico (Trejos; Koch; Mehlretter, 2020).

A rápida emergência de novas substâncias psicoativas, a curta permanência de alguns compostos no mercado e a grande diversidade estrutural dificultam identificação, detecção e quantificação em laboratórios forenses (Krotulski *et al.*, 2025).

A modificação molecular contínua dessas substâncias exige atualização de bibliotecas espectrais, desenvolvimento de marcadores, revisão de protocolos e integração entre pesquisa acadêmica e rotina pericial para reduzir falhas de identificação (Krotulski *et al.*, 2025).

A diferenciação de isômeros e enantiômeros requer métodos específicos e maior capacitação, enquanto instrumentos portáteis dependem de bibliotecas confiáveis e o Raman pode sofrer fluorescência e sensibilidade limitada, fatores que restringem a autonomia desses recursos em exames confirmatórios (Busardò *et al.*, 2024; Chauhan; Gupta; Sharma, 2025; Foli *et al.*, 2024).

A quimiometria organiza grandes volumes de dados, mas permanece parcialmente “quimicamente cega”, razão pela qual seus resultados exigem avaliação operacional, química e forense antes de serem reportados (Huhtala *et al.*, 2023).

A interpretação de materiais-traço deve explicitar variabilidade, transferência, persistência, incerteza e contexto, enquanto o desenvolvimento e a validação de métodos precisam documentar desempenho e garantia da qualidade (Roux *et al.*, 2022; Trejos; Koch; Mehlretter, 2020; Wille *et al.*, 2022).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada permite concluir que a química forense ocupa posição estratégica na investigação criminal ao transformar vestígios materiais em informação científica verificável. O objetivo geral foi alcançado porque o estudo demonstrou que técnicas químicas contribuem para identificar, analisar e interpretar evidências de interesse jurídico, fortalecendo a precisão dos laudos e a tomada de decisão nos contextos pericial e judicial.

O primeiro objetivo específico foi atendido pela apresentação dos fundamentos da química forense e das principais técnicas analíticas aplicadas à investigação criminal, entre elas cromatografia, espectrometria de massas, espectroscopia Raman, infravermelho próximo, MALDI, DESI, DART e recursos quimiométricos. O segundo objetivo foi contemplado pelo exame de aplicações em drogas ilícitas, resíduos de disparo, toxicologia, documentos e materiais-traço, demonstrando que a escolha do método depende da matriz e da pergunta pericial.

O terceiro objetivo foi alcançado pela discussão da eficiência em termos de sensibilidade, seletividade, robustez, reprodutibilidade, rapidez, preservação da amostra e capacidade confirmatória. Verificou-se que métodos portáteis e pouco destrutivos favorecem a triagem, enquanto técnicas cromatográficas e espectrométricas de alta resolução permanecem indispensáveis para confirmação, quantificação e interpretação de misturas complexas.

O quarto objetivo foi respondido pela identificação de desafios relacionados ao custo instrumental, à formação especializada, à padronização interpretativa, à atualização de bibliotecas espectrais e à rápida renovação das novas substâncias psicoativas. Esses limites confirmam que a confiabilidade da prova científica depende do equipamento, da validação metodológica, do controle de qualidade e da interpretação crítica do resultado.

Conclui-se, portanto, que o desenvolvimento da química forense dependerá da integração entre métodos analíticos avançados, quimiometria, pesquisa contínua e formação profissional. A atualização de bibliotecas, protocolos e critérios de interpretação será essencial para que a perícia acompanhe as transformações químicas e criminais sem ultrapassar os limites científicos de cada evidência.

REFERÊNCIAS

- AHMED, Reem; ALTAMIMI, Mohamad J.; HACHEM, Mayssa. State-of-the-art analytical approaches for illicit drug profiling in forensic investigations. *Molecules*, v. 27, n. 19, 6602, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules27196602>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- ARAUJO, William Oliveira de. Utilização de métodos analíticos a serviço da investigação criminal. *Acta de Ciências e Saúde*, [S.l.], v. 2, n. 5, 2016. Disponível em: <https://www2.ls.edu.br/actacs/index.php/ACTA/article/download/164/146>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- BATES, Maia N.; HELM, Abby E.; BARKHOLTZ, Heather M. Screening for forensically relevant drugs using data-independent high-resolution mass spectrometry. *Chemical Research in Toxicology*, v. 37, n. 4, p. 571-579, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.3c00379>. Acesso em: 18 abr. 2026.
- BUSARDÒ, Francesco Paolo *et al.* Enantioselective separation techniques in forensic analysis and clinical toxicology. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 175, 117733, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117733>. Acesso em: 20 abr. 2026.
- CHAUHAN, Samiksha; GUPTA, Lovlish; SHARMA, Sweetie. A systematic review on the analysis of trace materials via Raman spectroscopy: advancements and forensic implications. *Forensic Science International*, v. 377, 112609, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2025.112609>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- CONCEIÇÃO, Nathália dos S. *et al.* Applications of DESI and DART mass spectrometry in forensic science. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, v. 36, n. 11, p. 2331-2350, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jasms.5c00175>. Acesso em: 20 abr. 2026.
- DE ALMEIDA, Camila M. *et al.* Applications of MALDI mass spectrometry in forensic science. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v. 416, n. 24, p. 5255-5280, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00216-024-05470-y>. Acesso em: 20 abr. 2026.
- FERREIRA, Adriane Guedes. Química forense e técnicas utilizadas em resoluções de crimes. *Acta de Ciências e Saúde*, [S.l.], v. 2, n. 5, 2016. Disponível em: <https://www2.ls.edu.br/actacs/index.php/ACTA/article/view/131>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- FOLI, Letícia P.; HESPANHOL, Maria C.; CRUZ, Kaíque A. M. L.; PASQUINI, Celio. Miniaturized near-infrared spectrophotometers in forensic analytical

science - a critical review. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 315, 124297, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124297>. Acesso em: 20 abr. 2026.

HUHTALA, S. *et al.* Chemometrics in forensic chemistry - Part III: quality assessment and interpretation of chemometric output. *Forensic Science International*, v. 348, 111612, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2023.111612>. Acesso em: 20 abr. 2026.

KROTULSKI, Alex J. *et al.* Advances in analytical methodologies for detecting novel psychoactive substances: a review. *Journal of Analytical Toxicology*, v. 49, n. 3, p. 152-169, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jat/bkae098>. Acesso em: 20 abr. 2026.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. *Metodologia científica*. São Paulo: Atlas, 2022. Disponível em: <https://minhabiblioteca.com.br/catalogo/livro/84643/metodologia-cientifica>. Acesso em: 30 jun. 2025.

LIMA, A. S.; SANTOS, L. G. P.; LIMA, A. A.; ARCARI, D. P.; ZANIN, C. I. C. B. *Química forense*. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: https://portal.unisepe.com.br/unifia/wp-content/uploads/sites/10001/2018/06/11qui_forense.pdf. Acesso em: 20 abr. 2026.

ROUX, Claude *et al.* The Sydney declaration - revisiting the essence of forensic science through its fundamental principles. *Forensic Science International*, v. 332, 111182, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2022.111182>. Acesso em: 20 abr. 2026.

SANTOS, Caio Delano Couto *et al.* *Química forense: a ciência e sua importância para a sociedade*. *Ciências Exatas e Tecnologia*, v. 16, n. 16, p. 16-23, 2021. Disponível em: <https://exatastecnologias.pgsscogna.com.br/rcext/article/view/9285>. Acesso em: 10 abr. 2026.

SEROL, Miguel; AHMAD, Samir Marcos; QUINTAS, Alexandre; FAMÍLIA, Carlos. Chemical analysis of gunpowder and gunshot residues. *Molecules*, v. 28, n. 14, 5550, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules28145550>. Acesso em: 10 abr. 2026.

TAVARES, Mariana C. G. *Espectrometria de massas e cromatografia como ferramentas analíticas para a química forense*. Ouro Fino: Faculdades Asmec, 2018. Disponível em: <https://portal.unisepe.com.br/asmec/wp-content/uploads/sites/10006/2018/10/Qu%C3%ADmica-VII.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2026.

TREJOS, Tatiana; KOCH, Sandra; MEHLTRETTER, Andria. Scientific foundations and current state of trace evidence - a review. *Forensic Chemistry*, v. 18, 100223, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.forc.2020.100223>. Acesso em: 20 abr. 2026.

WILLE, Sarah M. R. *et al.* Liquid chromatography high-resolution mass spectrometry in forensic toxicology: what are the specifics of method development, validation and quality assurance for comprehensive screening approaches? *Current Pharmaceutical Design*, v. 28, n. 15, p. 1230-1244, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2174/1381612828666220526152259>. Acesso em: 20 abr. 2026.