



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE MEDICINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MÉDICAS

RAISSA RACHEL DE MORAES BARBOSA

**USO DE POLÍMEROS NATURAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS NANOESTRUTURADOS COM APLICAÇÕES EM PAPILOSCOPIA
FORENSE E IDENTIFICAÇÃO HUMANA**

Brasília
2025



RAISSA RACHEL DE MORAES BARBOSA

**USO DE POLÍMEROS NATURAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS NANOESTRUTURADOS COM APLICAÇÕES EM PAPILOSCOPIA
FORENSE E IDENTIFICAÇÃO HUMANA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Medicina/UnB como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Médicas.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto de Souza de Almeida Leite

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE MEDICINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MÉDICAS

Brasília
2025

**Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

du de Moraes Barbosa, Raissa Rachel
USO DE POLÍMEROS NATURAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS NANOESTRUTURADOS COM APLICAÇÕES EM PAPILOSCOPIA
FORENSE E IDENTIFICAÇÃO HUMANA / Raissa Rachel de Moraes
Barbosa; orientador José Roberto de Souza de Almeida Leite.
Brasília, 2025.
74 p.

Dissertação(Mestrado em Ciências Médicas) Universidade de
Brasília, 2025.

1. Papiloscopy forense. 2. Nanobiotechnology. 3. Síntese
verde. I. de Souza de Almeida Leite, José Roberto , orient.
II. Título.



RAISSA RACHEL DE MORAES BARBOSA

**USO DE POLÍMEROS NATURAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS NANOESTRUTURADOS COM APLICAÇÕES EM PAPILOSCOPIA
FORENSE E IDENTIFICAÇÃO HUMANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Médicas da Faculdade de Medicina/UnB como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Médicas.

BANCA EXAMINADORA

Dr. José Roberto de Souza de Almeida Leite
Universidade de Brasília - UnB
(Presidente)

Dr. Daniel Moreira Carneiro
Universidade do Porto - FCUP
(Membro externo)

Dr. Miguel Peixoto de Almeida
Universidade do Porto - FCUP
(Membro externo)

*Dedico este trabalho à minha querida avó,
Mironila (in memorian), que fez do mundo um
lugar melhor e de mim uma pessoa mais
corajosa.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por sempre me guiar no caminho da fé e da superação, e à Nossa Senhora por interceder em meus pedidos de amparo nos momentos de aflição.

Aos meus pais, minha eterna gratidão por serem responsáveis por todas as minhas conquistas e pelo exemplo de seres humanos justos, a quem busco seguir.

Ao meu noivo e futuro marido, que esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis e a quem agradeço profundamente pelos conselhos sensatos e pela sabedoria em clarear meus pensamentos.

Às minhas irmãs, minhas madrinhas e meu padrinho, meus sogros e avós, a todos que estiveram ao meu lado e me acolheram ao longo desta jornada.

Ao Professor Dr. José Roberto de Souza de Almeida Leite, agradeço imensamente pela paciência, por acreditar em mim nos momentos em que nem eu mesma acreditava, pela orientação ímpar de um pesquisador renomado e pelo suporte e dedicação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Médicas da Universidade de Brasília, aos docentes, pelos ensinamentos generosos que tornam tudo possível, e aos servidores, pelo apoio diário e contribuição para a realização deste trabalho.

Ao Núcleo de Pesquisa em Morfologia e Imunologia Aplicada pelos recursos, pelo laboratório completo e pela estrutura diferenciada que tornaram possível a realização deste projeto.

Aos colegas discentes, que me deram forças para não desistir e trouxeram esperança a cada etapa realizada, especialmente ao doutorando Miguel Cardoso, que, com sua generosidade, dedicou horas preciosas para ensinar. À Wanessa, por ouvir, aconselhar e apoiar. À Maria da Glória pela experiência e exemplo de amor pela ciência. Às colegas do programa, Flávia e Ariane, pelas horas de desabafo, acolhida e momentos felizes. Ao Bruno Sá, por se dispor a participar deste projeto com todo seu conhecimento, expertise e empatia.

Ao colega de profissão Daniel Carvalho, papiloscopista da Polícia Federal, pelo apoio e parceria.

À Polícia Civil do Distrito Federal, ao Departamento de Polícia Técnica e ao Instituto de Identificação, pelo incentivo à pesquisa e à busca pela melhoria na capacitação de seus servidores, especialmente à Dra. Ana Caroline Ribeiro Tupinambá, presidente da Associação Brasiliense de Peritos Papiloscopistas, que contribuiu com carinho e expertise

para revisão deste trabalho e com o apoio digno de uma verdadeira líder.

Ao colega de profissão, Dr. Rodrigo Meneses de Barros, que abriu as portas para o início deste projeto e a quem me inspirou em seguir atuando na pesquisa acadêmica na área forense pelo bem do serviço público.

Ao diretor da Divisão de Exames Laboratoriais, Marco Antonio Paulino, por abrir as portas do Laboratório e fomentar a pesquisa.

Ao diretor da Divisão de Perícias e Exames Técnicos Papiloscópicos, Victor Vanderlei, pela amizade e compreensão durante a finalização do projeto.

Aos diretores do Instituto de Identificação, Ruben Sérgio Veloso Gumprich e Vanessa Gozzer Spagnolo, por acreditarem no meu potencial profissional e por toda a confiança neste projeto.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada, meu mais sincero agradecimento.

“O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e dai afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem.”

Guimarães Rosa

RESUMO

Na esfera das ciências forenses, a identificação humana por meio das impressões digitais é um vasto campo de pesquisas de novas tecnologias. Com o avanço da nanotecnologia, tornou-se possível o uso de produtos nanoestruturados para desenvolver formulações sustentáveis e de baixo custo para a revelação de impressões digitais em diversos materiais. A versatilidade da modificação superficial das nanopartículas permite a especificidade do direcionamento da ligação nos compostos das impressões digitais e as características físico-químicas possibilitam a síntese e a estabilização com um amplo rol de materiais e polímeros naturais. Ressaltando a possibilidade do uso de polímeros naturais advindos da flora nacional na sintetização de nanopartículas com ênfase na papiloscopia forense e na revelação de impressões digitais em superfícies porosas, a Goma do Cajueiro (*Anacardium occidentale L.*, Anacardiaceae), um polímero modificado com polissacarídeos hidrofílicos, possui grande potencial de estabilização da prata dadas as suas propriedades de formação de coloides, apesar de uma baixa capacidade como agente redutor. Associado com a curcumina ($C_{21}H_{20}O_6$), um composto encontrado na Curcuma (*Curcuma Longa*) que possui propriedades fluorescentes quando excitada por luz ultravioleta ou luz azul visível, pode compor um promissor marcador de impressões digitais. O objetivo deste trabalho foi sintetizar um revelador de impressões digitais nanoestruturado de nanopartículas de prata utilizando a goma do cajueiro natural (GC) como agente estabilizador pela síntese verde reduzindo a prata por aquecimento em microondas (GC-AgNP) e adicionando curcumina para avaliar a fluorescência ao composto, observando o potencial de revelação de impressões digitais latentes das superfícies porosas (GC-Cur-AgNP). A obtenção dos nanocompostos foi monitorada por espectrofotometria UV-vis, por varredura nos comprimentos de onda de 300 a 600 nm. As nanopartículas foram caracterizadas por DLS e análise do potencial zeta. A fluorescência foi avaliada por espectroscopia de fluorescência. A espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FT-IR) e a espectroscopia de fluorescência apresentaram bandas características da goma do cajueiro e da curcumina, indicando que as nanopartículas mantiveram as propriedades químicas e físicas dos compostos bioativos. Um doador produziu impressões digitais latentes em superfície porosa de papel alcalino branco para os testes das nanoestruturas. A revelação das impressões digitais latentes foi realizada com a submersão das amostras por 30 minutos e secagem a temperatura ambiente em diferentes tempos após a coleta (0h, 1h, 6h, 12h e 24h) e posterior fotografia com luz visível e luz ultravioleta. Impressões digitais foram reveladas em superfícies porosas com os dois compostos em todas as fases, sendo a melhor revelação 24 horas após a coleta. O FT-IR demonstrou que as características físico-químicas da GC foram preservadas. O potencial zeta apontou baixa estabilidade das nanopartículas. O pico de absorbância em 420 nm indicou a redução dos íons de prata. As GC-Cur-AgNP apresentaram fluorescência sob excitação a 467 nm. Foi demonstrada a capacidade de revelação das nanopartículas em impressões digitais latentes em superfícies porosas, apesar da baixa instabilidade presente nos compostos.

Palavras-chave: Impressão digital latente; Nanopartícula de prata; Superfície porosa; Goma do cajueiro; Curcumina.

ABSTRACT

In the field of forensic sciences, human identification through fingermarks represents a vast area for researching new technologies. With advancements in nanotechnology, it has become feasible to employ nanostructured products to develop sustainable and low-cost formulations for fingermark development across various materials. Conventional products used in this process generally exhibit high toxicity levels, underscoring the need to research biocompatible compounds. The versatility of nanoparticle surface modification enables targeted binding specificity with fingermark compounds, and their physicochemical characteristics facilitate synthesis and stabilization with a wide range of materials and natural polymers. Emphasizing the potential use of natural polymers derived from native flora in nanoparticle synthesis, particularly for forensic papillloscopy and fingermark development on porous surfaces, Cashew Gum (*Anacardium occidentale L.*, Anacardiaceae), a polymer modified with hydrophilic polysaccharides, has significant potential for silver stabilization due to its colloid-forming properties, despite a limited capacity as a reducing agent. Combined with curcumin ($C_{21}H_{20}O_6$), a compound found in turmeric (*Curcuma Longa*) that exhibits fluorescent properties when excited by ultraviolet or visible blue light, it can serve as a promising fingermark marker. The objective of this study was to synthesize a nanostructured fingermark developer using silver nanoparticles, employing natural cashew gum (CG) as a stabilizing agent through green synthesis, reducing silver by microwave heating (CG-AgNP), and incorporating curcumin to evaluate fluorescence in the compound while assessing its potential for revealing latent fingermarks on porous surfaces (CG-Cur-AgNP). The synthesis of nanocomposites was monitored using UV-Vis spectrophotometry, scanning wavelengths from 300 to 600 nm. The nanoparticles were characterized by DLS and zeta potential analysis. Fluorescence was evaluated by fluorescence spectroscopy. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) and fluorescence spectroscopy revealed characteristic bands of cashew gum and curcumin, indicating that the nanoparticles retained the chemical and physical properties of the bioactive compounds. A donor provided latent fingermarks on a porous surface of white alkaline paper for testing the nanostructures. Latent fingermark development was carried out by submerging the samples for 30 minutes, followed by air drying at room temperature at different time intervals after collection (0h, 1h, 6h, 12h, and 24h) and subsequent photography under visible and ultraviolet light. Fingermarks were successfully developed on porous surfaces with both compounds at all stages, with the best results observed 24 hours after collection. FT-IR demonstrated that the physicochemical characteristics of CG were preserved. The zeta potential indicated low nanoparticle stability. The absorbance peak at 420 nm confirmed the reduction of silver ions. The CG-Cur-AgNP exhibited fluorescence under excitation at 467 nm. The study demonstrated the capability of the nanoparticles to develop latent fingermarks on porous surfaces, despite the low stability observed in the compounds.

Keywords: Latent fingerprints; Silver nanoparticles; Porous surface; Cashew gum; Curcumin

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	22
LISTA DE TABELAS	25
LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	26
1. INTRODUÇÃO	28
1.1. <i>Investigação Criminal e a Produção de Provas Materiais</i>	28
1.2. <i>Papiloscopia Forense</i>	30
1.3. <i>Nanotecnologia na Revelação de Vestígios Papiloscópicos</i>	36
1.4. <i>O Uso de Produtos Naturais na Síntese de Nanopartículas de Prata.....</i>	38
2. OBJETIVOS	43
2.1. <i>Objetivo Geral</i>	43
2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1. <i>Materiais</i>	44
3.2. <i>Síntese das Nanopartículas de Prata com Goma do Cajueiro (GC-AgNP)</i>	44
3.3. <i>Síntese das Nanopartículas de Prata com Goma do Cajueiro e Curcumina (GC-Cur-AgNP)</i>	45
3.4. <i>Espectroscopia no Infravermelho (FT-IR)</i>	46
3.5. <i>Espectroscopia no Ultravioleta/visível (UV-vis)</i>	46
3.6. <i>Espectroscopia de Fluorescência</i>	47
3.7. <i>Análise do Potencial Zeta</i>	47
3.8. <i>Análise do Espalhamento Dinâmico da Luz (DLS)</i>	47
3.9. <i>Produção das Impressões Digitais Latentes</i>	47
3.10. <i>Revelação das Impressões Digitais Latentes</i>	48
3.11. <i>Análise Estatística</i>	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1. <i>Obtenção das nanopartículas</i>	50
4.2. <i>Espectroscopia no Infravermelho (FT-IR)</i>	52
4.3. <i>Espectroscopia no Ultravioleta/visível (UV-vis)</i>	56
4.4. <i>Espectroscopia de Fluorescência</i>	58
4.5. <i>Análise do Potencial Zeta</i>	59
4.6. <i>Análise do Espalhamento Dinâmico por Luz (DLS)</i>	61
4.7. <i>Revelação das Impressões Digitais Latentes</i>	64

5. CONCLUSÃO.....	71
6. LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICE A - ANÁLISE COMPUTACIONAL.....	79
APÊNDICE B - ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	80
APÊNDICE C – PRODUÇÃO CIENTÍFICA	82

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.** Lâmina histológica da pele (**MOL – HISTOLOGIA INTERATIVA ONLINE**, 2017). _____ 31
- Figura 2.** Tipos de minúcias (a) extremidade de linha (ou terminação), (b) bifurcação, (c) lago, (d) ilha, (e) fragmento, (f) espora (ou gancho), (g) ponte (**ASSUMPÇÃO**, 2014). _____ 33
- Figura 3.** Estrutura não modificada da goma do cajueiro. R representa d-manoose, l-ramnose, l-arabinose ou cadeias de 1,2-arabinose (**RIBEIRO; SOUZA; BEZERRA; OLIVEIRA et al.**, 2016). _____ 40
- Figura 4.** Estrutura química dos curcuminoïdes (**TOLEDO**, 2013). _____ 42
- Figura 5.** Representação gráfica esquemática da sintetização das nanopartículas. _____ 45
- Figura 6.** Fotografia digital da (a) suspensão de nanopartícula de prata reduzida com a goma do cajueiro (GC-AgNP), (b) a curcumina em suspensão aquosa e a (c) suspensão de nanopartícula de prata reduzida com a goma do cajueiro e estabilizada com curcumina (GC-Cur-AgNP). _____ 46
- Figura 7.** Representação esquemática e simplificada teórica da produção e da interação das nanopartículas de prata com a GC e curcumina (**STATI; ROSSI; TRAKOOLWILAIWAN; TUNG et al.**, 2022) (**ARARUNA; OLIVEIRA; QUELEMES; NOBRE et al.**, 2020) com modificações. _____ 50
- Figura 8.** A) Modelo 3D da molécula de GC e B) Mapa do Potencial Eletrostático Molecular (MEP) da GC. _____ 53
- Figura 9.** a) Espectro no infravermelho da curcumina isolada (—) e b) espectro no infravermelho da goma de cajueiro isolada (—). _____ 53
- Figura 10.** a) Espectro no infravermelho da nanopartícula de prata com goma do cajueiro e curcumina (—) e b) espectro no infravermelho da nanopartícula de prata com goma do cajueiro (—). _____ 53

Figura 11. Espectros infravermelhos teóricos da curcumina isolada (—) e da goma de cajueiro isolada (—). Os números em destaque indicam os números de onda dos picos, enquanto as regiões hachuradas destacam as atribuições vibracionais mais comuns. _____ 55

Figura 12. Espectros na região do ultravioleta-vis das amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro (—) e para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina (—). _____ 58

Figura 13. Espectro de fluorescência da curcumina isolada (—), da nanopartícula de prata com goma do cajueiro (—), da nanopartícula de prata com goma do cajueiro e curcumina (—) e da solução aquosa de nitrato de prata (—). _____ 59

Figura 14. Potencial Zeta para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro (—) e para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina (—). _____ 60

Figura 15. Distribuição de tamanho por DLS para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro (—) e para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina (—). _____ 61

Figura 16. Distribuição de tamanho por DLS para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro (—) e para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina (—) 8 meses após a síntese. _____ 62

Figura 17. Fotografias da revelação de impressões digitais em papel branco nos tempos 0h, 1h, 6h, 12h e 24h com revelações das nanopartículas de prata com goma do cajueiro, das nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina e do controle positivo de ninidrina e DFO. _____ 65

Figura 18. Marcação de pontos característicos nas fotografias digitais das revelações das nanopartículas de prata com goma do cajueiro e das nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina nos tempos 0h, 1h, 6h, 12h e 24h. _____ 67

Figura 19. Gráfico representativo da marcação de pontos característicos das revelações de IDLs com GC-AgNP e GC-Cur-AgNP. _____ 68

Figura 20. Comparação da fotografia digital das revelações das nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina 0h após a produção da IDL (a) e 24h após a produção da IDL (c) com luz branca e luz ultravioleta (b e d). _____ 69

Figura 21. Comparação da fotografia digital das revelações das nanopartículas de prata com goma do cajueiro 0h após a produção da IDL (a) e 24h após a produção da IDL (c) com luz branca e luz ultravioleta (b e d). _____ 70

Figura 22. Gráfico do número de publicações por ano na área de identificação humana. _ 80

Figura 23. Mapa dos dados bibliográficos. Fonte: VOSViewer. _____ 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atribuições teóricas dos modos vibracionais para os compostos GC, Cur e AgNP. ν e ϖ denotam alongamento (geral e assimétrico). δ (dobra no plano), γ (dobra fora do plano) e τ (torção) indicam modos de deformação.....	56
Tabela 2. Tamanho médio (nm) e PDI das amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina, por DLS.....	63
Tabela 3. Resultados das revelações de IDLs utilizando as nanopartículas GC-AgNP e GC-Cur-AgNP e o resultado do controle positivo com a Viabilidade de Confronto Papiloscópico.....	66

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A - Absorbância

AFIS - Automated Fingerprint Identification System (Sistema Automatizado de Identificação de Impressões Digitais).

Ag⁺ – Prata iônica

Ag^o – Prata metálica ou reduzida

AgNO₃ – Nitrato de prata

AgNP – Nanopartícula de prata

CEP – Comitê de Ética em Pesquisa

C₂₁H₂₀O₆ – Curcumina

DFO – 1,8-diafluoren-9-oná

DLS – *Dynamic Light Scattering* (espalhamento de luz dinâmico).

FM – Faculdade de Medicina

FT-IR – Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

GC – Goma do cajueiro

GCA – Goma do Cajueiro Acetilada

GC-AgNP – Nanopartículas de prata com goma de caju natural

GC-Cur-AgNP – Nanopartículas de prata com goma de caju natural e curcumina

DPT/PCDF – Departamento de Polícia Técnica da Polícia Civil do Distrito Federal

IDL – Impressão Digital Latente

IFSP – Instituto Federal de São Paulo

II/PCDF – Instituto de Identificação da Polícia Civil do Distrito Federal

KBr – Brometo de potássio

NaBH₄ – Borohidreto de sódio

Ninidrina - 2,2-Dihidroxiindano-1,3-diona

NP – Nanopartícula

PEI - polietilenimina

pH – log [H⁺]

QM/MM - *Quantum Mechanics/Molecular Mechanics* (Mecânica Quântica/Mecânica Molecular)

SD – Desvio padrão

SMD – Deposição de metal único

PCDF – Polícia Civil do Distrito Federal

PDI – Índice de Polidispersidade

UnB – Universidade de Brasília

UV-VIS – Espectroscopia no Ultravioleta Visível

VC - Viabilidade de Contronto Papiloscópico

1. INTRODUÇÃO

1.1. Investigação Criminal e a Produção de Provas Materiais

No âmbito do Direito Penal, não há um conceito taxativo sobre a definição precisa da Investigação Criminal, mas pode-se assumir que é o ponto de partida do processo da persecução penal (MADRIGAL, 2017). O Brasil é um Estado Democrático de Direito, de forma que é dever do Estado garantir que o processo da persecução penal transcorra de acordo com as garantias, deveres e direitos dispostos na Constituição Federal e nas Legislações vigentes (SAMPAIO, 2014).

Na ocorrência de um fato delituoso, cabe ao Estado iniciar o processo investigativo na garantia dos direitos ao contraditório e à ampla defesa. Com um rol de mecanismos e multifuncionalidades, a Investigação Criminal inicia-se com a instauração do Inquérito Policial, podendo se estender durante todo o curso do processo. De acordo com LIMA (2017), o Inquérito Policial é definido como:

“(...) um conjunto de diligências realizadas pela polícia investigativa objetivando a identificação das fontes de prova e a colheita de elementos de informação quanto à autoria e materialidade da infração penal, a fim de possibilitar que o titular da ação penal possa ingressar em juízo.” (LIMA, 2017)

Desta forma, é interessante compreender que a prova, do latim *probatio*, significa formar juízo, reconhecer. Constitui prova, portanto, a descoberta da verdade (CAGLIARI, 2001). A prova é um meio de convencimento constitutivo para auxiliar o julgamento e consolidar o processo investigativo, direcionando todo o processo penal. O caput do artigo 158 do Código de Processo Penal estabelece que “quando a infração deixar vestígios, será indispensável o exame de corpo de delito, direto ou indireto, não podendo supri-lo a confissão do acusado” (BRASIL, 1941). Por conseguinte, estabelece-se a Ciência Forense como uma das principais ferramentas utilizadas como meio de obtenção de provas materiais com auxílio de métodos científicos, produzindo provas técnicas e imparciais. Com base no Princípio da Troca de Locard, escrito por Edmond

Locard em 1931 no trabalho intitulado *Traité de Criminalistique*, que determina que “todo contato deixa uma marca” e que “os objetos ou materiais, ao interagirem, permутam características, ainda que microscópicas” (ARAGÃO, 2006), é possível a identificação e a produção de provas científicas. A Ciência Forense é uma área multidisciplinar capaz de produzir evidências de variados tipos e necessidades onde incluem vários campos da ciência como odontologia, psiquiatria, entomologia, antropologia, entre outros (PRABAKARAN; PILLAY, 2021). Ao analisar a cena do crime, cabe ao Perito, profissional especializado na análise das cenas de local de crime, estabelecer quais exames serão necessários a fim de constatar a materialidade do fato, indicar a autoria, elaborar a prova técnica e a dinâmica do fato.

Entretanto, para viabilizar um exame pericial é imprescindível a correta preservação do local de crime e a manutenção da cadeia de custódia dos vestígios. Conforme a redação do caput do Artigo 158 do Código de Processo Penal, cadeia de custódia é definida como sendo:

“(...) o conjunto de todos os procedimentos utilizados para manter e documentar a história cronológica do vestígio coletado em locais ou em vítimas de crimes, para rastrear sua posse e manuseio a partir de seu reconhecimento até o descarte”. (BRASIL, 1941)

O início da cadeia de custódia parte da preservação do local de crime e do reconhecimento da existência vestígio. É procedimento de suma importância tanto para o rastreamento do vestígio quanto para a sua preservação, principalmente em casos de vestígios sensíveis, como as impressões digitais. A detecção de impressões digitais em locais de crime é realizada preferencialmente por um Papiloscopista, profissional que possui conhecimento específico na coleta e análise de vestígios papiloscópicos.

Ressalta-se que a redação do Código de Processo Penal é extremamente detalhista nos processos que envolvem a cadeia de custódia. É necessário lacres específicos, embalagens especiais para cada tipo de vestígio, ambiente próprio e controlado para armazenamento, entre outros. De forma que muitos Estados não conseguiram se adequar às suas diretrizes, o que ocasionou indagações sobre o prejuízo no processo penal nos casos em que a houvesse a violação cadeia de custódia. No artigo 563 do Código de Processo Penal, diz que “nenhum ato será declarado nulo, se da nulidade não resultar prejuízo para a acusação ou para a defesa” (BRASIL, 1941) é

cristalizado o postulado *pas de nullité sans grief*, onde determina que apenas se houver prejuízo concreto é possível proclamar a nulidade da prova colhida. Desta forma, apesar da complexidade dos processos envolvidos e da realidade estrutural da falta de recursos na maior parte dos órgãos de Segurança Pública, não é a ausência de algum critério relacionado à cadeia de custódia que será causa de toda a nulidade processual nos casos em que o ônus não causar agravo comprobatório aos autos (BRASIL, 2022).

Sumariamente, tendo sido respeitada a cadeia de custódia e a preservação do local do crime, após detecção, coleta e análise dos vestígios forenses, cabe ao Perito elaborar o Laudo Pericial, documento no qual consta todo o percurso da cadeia pericial e a conclusão técnica. É com base nos laudos e demais conjunto de provas colhidas por variados procedimentos policiais que o Juiz irá avaliar qual será o veredito. Mesmo após a instrução penal, é salientar o armazenamento dos vestígios, pois a sentença é cabível de recursos e poderá ser solicitado novos exames para corroborar novas teorias de contraditório e ampla defesa a qualquer tempo.

Neste contexto, é primordial prezar pela boa coleta e uso de provas materiais, principalmente no que se refere à papiloscopia forense para enriquecer o processo penal e embasar decisões judiciais justas e técnicas.

1.2. Papiloscopia Forense

A papiloscopia é um dos pilares do ramo das ciências forenses, de forma que permite a identificação de autores de crimes diversos sem a apresentação de suspeitos com base na análise do formato das impressões digitais. Sendo assim, é um dos principais recursos que evita tanto a impunidade quanto a condenação de inocentes no processo investigativo.

Impressões digitais são o formato único da disposição das cristas de fricção presentes na falange distal dos dedos das mãos. Entretanto, atualmente a papiloscopia abrange também as impressões plantares e palmares e a prosopografia, que é a identificação de indivíduos com base nas feições faciais e fisionômicas de forma geral (CAPLAN, 1990).

As cristas de fricção dispostas da falange distal dos dedos das mãos são a principal fonte de estudo da papiloscopia. Estudos afirmam que elas são formadas entre a 6^a e a 13^a semana de gestação (MCROBERTS, 2011). A formação das impressões

digitais tem conexão com as estruturas anatômicas chamadas almofadas volares (CUMMINS, 1929). As almofadas volares são eminências temporárias da pele volar que se formam nas mãos e pés por volta da 7^a semana e tornam-se menos proeminentes por volta da 10^a semana e depois desaparecem em embriões humanos (KUCKENA; NEWELLA, 2005).

A pele humana possui três camadas: epiderme, derme e hipoderme (Figura 1). As impressões digitais se formam na epiderme, em uma área chamada "camada basal", que fica entre a epiderme e a derme. Durante o desenvolvimento fetal, essa camada basal cresce mais do que as outras camadas, resultando em dobras e rugas que formam os padrões de impressão digital (CUMMINS, 1929). Observa-se em embriões de 10^a a 13^a semana que a camada basal começa a ondular. Essas ondulações rapidamente se tornam mais proeminentes e formam dobras da epiderme na derme (KUCKENA; NEWELLA, 2005). A pressão, os movimentos do feto e até o fluxo do líquido amniótico ao redor das mãos do feto também desempenham um papel no desenvolvimento dos padrões únicos. Formam-se então as rugas primárias que se tornam visíveis e permanentes na 16^a semana de gestação (KUCKENA; NEWELLA, 2005; MCROBERTS, 2011).

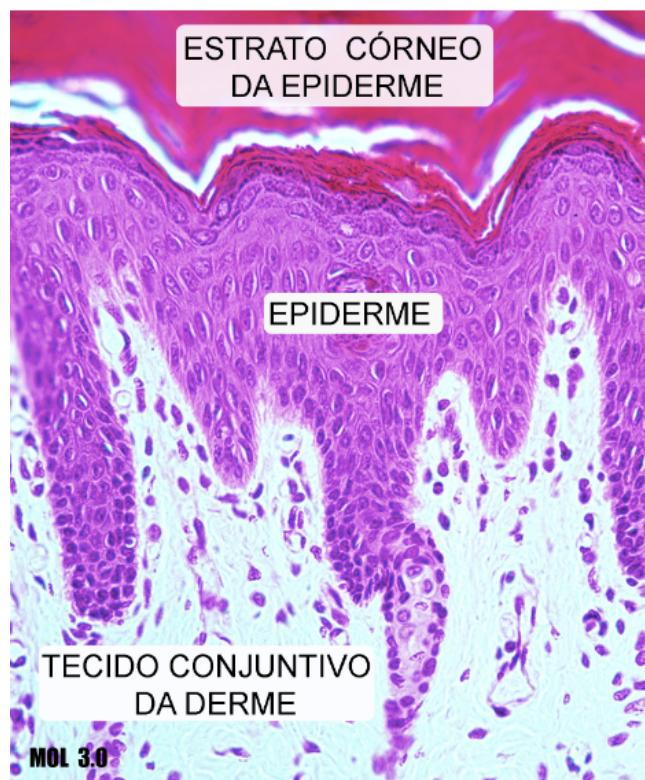


Figura 1. Lâmina histológica da pele (MOL – HISTOLOGIA INTERATIVA ONLINE, 2017).

Apesar de ser muito recente o uso da papiloscopia no ambiente criminal, sua origem remete a uma prática milenar. Registros antigos relatam o uso de impressões digitais em contratos de terras, testamentos e escalações do exército na Dinastia Chinesa Tang (617–907 a.C.) (MCROBERTS, 2011). Também existem relatos do uso de impressões digitais para assinaturas de documentos no Japão (702 a.C.) e na Índia (1637 a.C.) (ASHBAUGH, 1999). Entretanto, não havia um entendimento consolidado sobre a unicidade das cristas de fricção.

O grande avanço da papiloscopia ocorreu no século XIX, quando começaram a investigar sistematicamente as características das impressões digitais. Em 1823, o anatomista Dr. Johannes E. Purkinje, professor da Universidade de Breslau na Alemanha, publicou sua tese intitulada “Comentário sobre o exame fisiológico dos órgãos da visão e do sistema cutâneo”, na qual classificou os padrões de impressões digitais em nove categorias (ASHBAUGH, 1999). Apesar de apenas ter nomeado os padrões, seu trabalho serviu de inspiração para o sistema de classificação de Henry (MCROBERTS, 2011).

A evolução decisiva veio na década de 1880, quando Sir Francis Galton, um antropólogo britânico, começou a estudar impressões digitais com o objetivo de provar que elas eram únicas e podiam ser usadas para identificar indivíduos. Em 1892, Galton publicou o livro "Finger Prints", que descrevia as características das impressões digitais e estabelecia os princípios fundamentais da individualidade e permanência das cristas papilares (GALTON, 1892). Galton foi o primeiro a demonstrar estatisticamente que a probabilidade de duas pessoas terem impressões digitais idênticas era extremamente baixa.

Em 1918, Edmon Locard estabeleceu que, para identificar um indivíduo por intermédio das impressões digitais, é necessário marcar pelo menos 12 pontos característicos ou minúcias (GALANTE FILHO, 1999). São tipos de minúcias (Figura X): final de linha, bifurcação, lago, ilha, fragmento, espora (ou gancho) e ponte (ASSUMPÇÃO, 2014). A marcação dos 12 pontos característicos é suficiente para atestar a identidade de um indivíduo, de acordo com a jurisprudência do Supremo Tribunal de Justiça (HC: 731837, 2022).

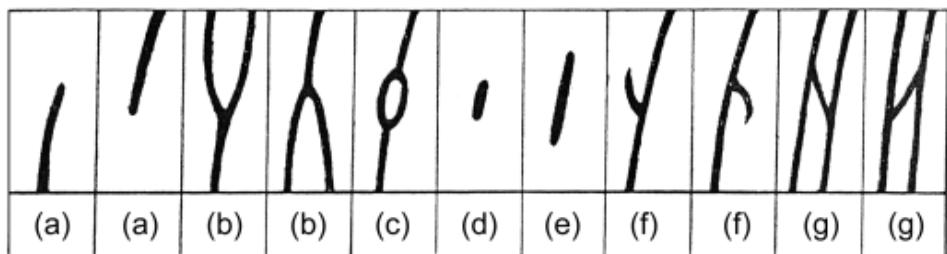


Figura 2. Tipos de minúcias (a) extremidade de linha (ou terminação), (b) bifurcação, (c) lago, (d) ilha, (e) fragmento, (f) espora (ou gancho), (g) ponte (ASSUMPÇÃO, 2014).

No mesmo período, na Índia, o oficial britânico William James Herschel começou a utilizar impressões digitais como uma forma de assinatura para contratos, reconhecendo sua utilidade prática na autenticação de documentos. Embora não tenha desenvolvido um sistema de classificação, Herschel foi um dos primeiros a implementar o uso sistêmico de impressões digitais para fins administrativos (MCROBERTS, 2011).

Entretanto, o maior avanço do uso das impressões digitais no âmbito criminal veio com o trabalho de Juan Vucetich. Enquanto trabalhava na Polícia de Buenos Aires, na Argentina, Vucetich começou a desenvolver um sistema de classificação baseado nas impressões digitais. Em 1892, após um caso de assassinato de duas crianças, Vucetich comparou o padrão de um vestígio papiloscópico ensanguentado encontrado na parede da casa onde vivia a família com o padrão da impressão digital da mãe das crianças, Francisca Rojas, que confessou após ser confrontada, provando a sua autoria (LEE; RAMOTOWSKI; GAENSSLER, 2001). Este é considerado o primeiro caso documentado sobre o uso de impressões digitais na solução de um crime.

Em 1894, Sir Edward Richard Henry, policial e estatístico, colaborou com Galton em um método de classificação de impressões digitais de maneira eficiente e sistemática, facilitando a busca e comparação. Em 1897, o governo da Índia sancionou o uso de impressões digitais como meio exclusivo de identificação de prisioneiros. O Sistema de Classificação de Henry foi adotado oficialmente pela Scotland Yard em 1901 e se tornou o padrão em muitos países de língua inglesa (MCROBERTS, 2011).

No século XX, a papiloscopia se consolidou como uma ciência fundamental para a identificação humana, tanto em contextos criminais quanto civis, sendo utilizadas para emissão de documentos como passaportes e carteiras de identidade, identificação de vítimas de desastres em massa, além do uso significativo na autenticação de dispositivos eletrônicos, como smartphones. Com o avanço da tecnologia, especialmente a digitalização e o desenvolvimento de sistemas automatizados de identificação de

impressões digitais (AFIS), a capacidade de coletar, armazenar e comparar impressões digitais melhorou significativamente. Os AFIS permitiram que milhões de impressões digitais fossem armazenadas e comparadas em tempo reduzido, aumentando enormemente a eficiência dos processos de identificação após a análise do perito (ASHBAUGH, 1999).

Impressões digitais encontradas em locais de crime podem ser classificadas como:

- Patentes: impressões visíveis a olho nu, que dispensam uso de agente revelador. Podem ser encontradas em superfícies empoeiradas ou com manchas de sangue;
- Latentes (IDL): impressões invisíveis, que necessitam de processo de revelação a depender da sua característica e composição;
- Moldadas: impressões moldadas em alguma superfície maleável, como massa de vidro.

Sendo assim, o processo de identificação humana por meio das impressões digitais é determinado de acordo com o tipo de superfície e pelos componentes da impressão digital apostila (BARROS, RODRIGO M; FARIA, BRUNA E F; KUCKELHAUS, SELMA A S, 2013).

Grupos de pesquisa têm se dedicado a desenvolver métodos de revelação em diversas situações. Métodos ópticos, físicos ou químicos podem ser utilizados individualmente ou em conformidade com as características da superfície. A quantidade e a qualidade dos detalhes das cristas de fricção reveladas são determinantes para a identificação de possíveis suspeitos (BARROS; OLIVEIRA NETO; BARBOSA; TONIETTO *et al.*, 2023).

Estudos recentes demonstram que a impressão digital pode determinar o sexo do indivíduo, além da individualização, de acordo com a densidade das cristas de fricção (SILVA, 2015). Ademais, diversos reagentes são utilizados em ordem de prioridade na tentativa de revelar um vestígio de impressão digital nos mais diferentes tipos de superfície. Essas superfícies são classificadas primariamente como porosas e não porosas e cabe ao perito avaliar o melhor agente revelador em cada caso (FARIA, 2016). Os agentes reveladores utilizados são, em geral, tóxicos e potencialmente perigosos para o perito, que em muitos casos, utiliza os compostos em locais fechados e com pouca ventilação. Nesse sentido, faz-se necessário a busca de novos reveladores de baixa toxicidade e alta eficiência, com capacidade de substituir os produtos comerciais

convencionais.

Os reveladores utilizados para revelar fragmentos de impressões digitais em superfícies porosas são compostos que possuem afinidade com componentes proteicos e aminoácidos presentes na trama de celulose (MCROBERTS, 2011). Este tipo de superfície apresenta dificuldades para revelação de vestígios papiloscópicos devido sua capacidade de absorver os resíduos da impressão digital.

A ninidrina é um reagente químico que reage com aminoácidos presentes nos resíduos da impressão digital, formando um composto púrpura conhecido como Púrpura de Ruhemann. É um método amplamente utilizado em superfícies porosas, como papel, e é eficaz na revelação de impressões digitais longevas. Pode ser aplicada por imersão, pulverização ou vaporização, porém a revelação pode demorar semanas. Entretanto este processo pode ser acelerado com calor e umidade. Existem análogos da ninidrina, como a 1,2-indanediona, que oferecem maior sensibilidade e fluorescência, facilitando a visualização da impressão digital (ARCHER; CHARLES; ELLIOTT; JICKELLS, 2005; BARROS, RODRIGO M; FARIA, BRUNA E F; KUCKELHAUS, SELMA A S, 2013; CROXTON; BARON; BUTLER; KENT *et al.*, 2010; FARIA, 2016; MONG; PETERSEN; CLAUSS, 1999).

Além da ninidrina, outro potencial agente revelador de impressões digitais em superfícies porosas é o DFO (1,8-diazafluoren-9-on), um reagente fluorescente que também reage com aminoácidos, produzindo uma impressão digital visível sob luz ultravioleta (UV). Devido a capacidade de fluorescer, é um método eficiente para revelar vestígios em superfícies que contenham interferência de fundo ou que sejam escuras, porém requer um tempo de desenvolvimento mais longo em comparação à ninidrina. Os dois métodos podem ser utilizados em conjunto para aumentar a chance de revelação (PRABAKARAN; PILLAY, 2021).

Outro método tradicional para revelação em superfícies porosas são os cristais de iodo, onde o vapor de iodo é atraído e se fixa nos componentes gordurosos da impressão formando uma imagem de coloração marrom-amarelada. No entanto, essa imagem é temporária e desaparece rapidamente, exigindo que seja fotografada imediatamente para registro permanente. Embora eficaz, esse método é menos sensível em comparação com a ninidrina ou o DFO (FIGINI, 2003).

Outros métodos podem ser utilizados em conjunto tanto à ninidrina quanto ao DFO. O nitrato de prata e os reveladores físicos - soluções que contêm sais de prata e outros compostos - podem ser aplicados em superfícies porosas após o tratamento com

ninidrina ou DFO, aproveitando os resíduos que não reagiram (PRABAKARAN; PILLAY, 2021). Os métodos tradicionais, embora eficazes em muitos casos, apresentam limitações em termos de sensibilidade, especificidade, toxicidade e tempo de processamento. A escolha do método ideal depende da natureza da superfície porosa, do tempo de deposição da impressão digital e das condições ambientais. A pesquisa e o desenvolvimento de novos métodos de revelação de impressões digitais, como a aplicação da nanotecnologia, visam superar as limitações dos métodos tradicionais e fornecer ferramentas mais eficazes, seguras e sustentáveis para a ciência forense.

1.3. Nanotecnologia na Revelação de Vestígios Papiloscópicos

Uma área promissora na pesquisa de novos reveladores de impressões digitais é a nanotecnologia. As nanopartículas (NPs) são partículas de tamanho muito reduzido em escala nanométrica e possuem a possibilidade de ajuste de suas propriedades de superfície (SOUTO; ET AL., 2020b), sendo assim, compostos muito versáteis e que permitem uma grande variedade de associação com diversos componentes (SOUTO; ET AL., 2020a). Essa versatilidade de modificação da superfície das NPs também aumenta a seletividade e um direcionamento preciso desses materiais (BÉCUE; MORET; CHAMPOD; MARGOT, 2011) (YEUNG; ET AL., 2020).

Um nanômetro equivale a 10^{-9} m e tem como unidade nm, de forma que o nanodimensionamento pode ser definido como redução do tamanho da partícula para tamanho que varie entre 10 a 1000nm (MASSIMINO, 2016).

A teoria mais amplamente aceita sobre a ligação das nanopartículas (NPs) aos componentes das impressões digitais sugere uma interação eletrostática. No entanto, o estudo de Moret e colaboradores (2014) revelou que essa interação também possui uma motivação química. Ao adicionarem grupos carboxila às superfícies das NPs, estes reagiram com grupos amina encontrados nos resíduos das impressões digitais (MORET; BECUE; CHAMPOD, 2014). As nanopartículas (NPs) podem ser aplicadas tanto na forma de pós secos quanto em suspensão (em solvente aquoso ou orgânico). A aplicação em pó apresenta baixa seletividade e levanta preocupações significativas de saúde e segurança. Entretanto, o uso de uma suspensão favorece interações físico-químicas e químicas com os resíduos (CHOI, 2006). Além das nanopartículas metálicas, o uso de nanopartículas de óxidos metálicos, como dióxido de titânio, óxido de zinco e óxido de

ferro, também é relevante na detecção de IDL (BARROS, R. M.; FARIA, B. E. F.; KUCKELHAUS, S. A. S., 2013). O dióxido de titânio, por exemplo, é aplicado com frequência para revelar impressões em superfícies não porosas, como fita adesiva preta, proporcionando boas imagens quando combinado com pós fluorescentes. O óxido de zinco, utilizado como reagente de pequenas partículas, melhora a luminescência ao ser incrementado com íons de lítio, resultando em imagens de alta qualidade. Já o óxido de ferro, quando modificado com polietilenimina (PEI), permite a obtenção de impressões com características de cristas bem definidas em superfícies lisas (PRABAKARAN; PILLAY, 2021).

Um estudo utilizando NPs de prata (AgNPs) estabilizadas com goma de cajueiro proporcionou a revelação de impressões digitais latentes em papel alcalino branco, demonstrando seu potencial biotecnológico como agente revelador sobre superfície porosa e com aplicação ocupacional segura aos peritos (FARIA, 2016). O polímero da goma do cajueiro (GC) possui grupos para formação de pontes de hidrogênio (-OH, -COOH), de onde se obtêm fortes cargas aniónicas (MOHAMMADI-SAMANI; BAHRI-NAJAFI; YOUSEFI, 2005). Ademais, possui cadeias longas que se posicionam na superfície das NPs, ocupando o espaço em seu entorno e, assim, contribuindo para a estabilidade do sistema através do impedimento estérico (CARUSO, 2004; GOODWIN, 2009). A aplicação das AgNPs estabilizadas com GC na revelação de impressões digitais latentes baseia-se em dois mecanismos: interação física da prata com os compostos orgânicos presentes no resíduo da impressão digital; e na interação eletrostática entre os componentes hidrofílicos do polissacarídeo do cajueiro e os da impressão latente secretados pelas glândulas sudoríparas (FARIA, 2016). As características cinéticas do polímero do cajueiro também são favoráveis, dentre elas destaca-se a capacidade de intumescimento, que afeta tanto as propriedades de adesão como de aprisionamento de metais em sua matriz. Quanto maior o índice de intumescimento, mais difícil é para o metal desligar-se da rede polimérica, devido à espessa camada gelatinosa que recobre a superfície nanometálica, o que leva ao aumento do tempo de residência do metal na estrutura da nanopartícula (SAUNDERS, 1989). Além de estabilizar o sistema, o mesmo princípio é responsável por evitar a liberação da prata da matriz polimérica após o processo de revelação, mantendo-a aderida às cristas de fricção pela ação da goma do cajueiro. Em adição às propriedades favoráveis, o polímero do cajueiro é biocompatível e biodegradável, o que favorece o desenvolvimento de nanopartículas sintetizadas com a goma, tornando o processo rápido, de baixo custo e promissor para uso biológico

(QUELEMES, 2013). Contudo, a goma tem aparentemente baixo rendimento na conversão de Ag^+ em Ag^0 , portanto a via que utiliza NaBH_4 é alternativa para uma maior eficiência no que diz respeito a redução do íon em soluções de AgNPs (BRANDÃO; JESUS; ARAÚJO; CARVALHO *et al.*, 2020; QUELEMES, 2013). Particularmente no caso da revelação de impressões latentes, busca-se o desenvolvimento de biopolímeros com características anfifílicas almejando interação destes com os componentes hidrofóbicos existentes no exsudato que compõe a impressão digital devido à presença de secreções sebáceas a partir do contato das mãos com rosto, cabelo e couro cabeludo. Espera-se que estes biopolímeros possam ser utilizados de maneira vantajosa para produção de nanopartículas metálicas como proposta para solucionar aspectos relativos à revelação de impressões digitais latentes em substratos porosos com adição de compostos fluorescentes derivados da curcumina. A integração de nanomateriais com outras técnicas, como espectrometria de massas, pode ampliar ainda mais as possibilidades forenses, permitindo uma análise mais detalhada das impressões digitais e dos compostos químicos presentes. Com o avanço contínuo da nanotecnologia, espera-se que esses materiais inovadores contribuam significativamente para a precisão, confiabilidade e eficácia das investigações criminais. Dentre as vantagens que polímeros naturais possam proporcionar estão a diminuição dos custos envolvidos no processo e os benefícios à saúde ocupacional e ambiental, devido tratar-se de uma tecnologia limpa e sustentável.

1.4. O Uso de Produtos Naturais na Síntese de Nanopartículas de Prata

Com o objetivo de reduzir a toxicidade e ampliar o uso das NPs na área médica e biológica, utiliza-se o que chamamos de síntese verde, que basicamente é a preparação das nanopartículas metálicas usando biomoléculas como extratos de plantas, gomas naturais, fungos e bactérias como agentes redutores e/ou estabilizadores das NPs.

As gomas naturais são polímeros compostos de polissacarídeos, carboidratos, proteínas e minerais e possuem alto peso molecular e característica hidrofílica com grande potencial de aplicações biológicas. O principal objetivo de produzir NPs estabilizadas com gomas naturais para a revelação de impressões digitais é utilizar o potencial de revelação dos metais juntamente com a característica hidrofílica dos polímeros naturais (TALODTHAISONG; BOONTA; THAMMAWITHAN; PATRAMANON *et al.*, 2020). De maneira que existem várias opções de produtos naturais com as propriedades

elencadas no Brasil, é interessante promover a síntese de um produto nacional de baixo custo, baixa toxicidade e alta eficácia para o uso generalizado pelas instituições forenses do país.

A aplicação da síntese verde na produção de nanopartículas metálicas, particularmente de prata (AgNPs), utilizando produtos naturais como a goma de caju (GC), representa um avanço significativo na nanotecnologia e na ciência forense. Esta técnica sustentável e de baixo custo permite uma preparação eficiente de AgNPs para a revelação de impressões digitais latentes, além de outras aplicações biomédicas. O uso de biomoléculas como agentes redutores e estabilizadores, incluindo extratos de plantas, gomas naturais, fungos e bactérias, ajuda a reduzir a toxicidade e amplia o potencial das nanopartículas em aplicações biológicas e médicas (BRANDÃO; JESUS; ARAÚJO; CARVALHO *et al.*, 2020). A GC, um polissacarídeo natural, apresenta diversas vantagens na síntese de AgNPs. Como agente estabilizador, a goma atua na prevenção da agregação das nanopartículas, o que é fundamental para a estabilidade coloidal da solução. Essa estabilização ocorre graças às longas cadeias poliméricas da GC que revestem a superfície das nanopartículas, criando uma barreira física contra a aglomeração. A GC é constituída de unidades de b-D-galactose (72%), a-D-glicose (14%), arabinose (4.6%), ramnose (3.2%) e ácido glicurônico (4.7%) (Figura 3) (RIBEIRO; SOUZA; BEZERRA; OLIVEIRA *et al.*, 2016). Além disso, as interações eletrostáticas e hidrofóbicas entre as AgNPs estabilizadas com GC e os resíduos de impressões digitais – compostos de aminoácidos e lipídios – favorecem uma aderência eficiente e uma resolução superior das cristas das impressões. Outro ponto importante é que a concentração de GC usada na síntese influencia diretamente o tamanho das AgNPs, com concentrações mais baixas resultando em nanopartículas menores e mais uniformes, ideais para a precisão da revelação de impressões digitais. Ensaios mostram que as AgNPs sintetizadas com a goma do cajueiro acetilada possuem alta sensibilidade e podem revelar impressões em superfícies porosas rapidamente, em cerca de cinco segundos (BRANDÃO; JESUS; ARAÚJO; CARVALHO *et al.*, 2020). Além disso, o uso de produtos naturais na síntese das AgNPs torna o processo mais seguro e sustentável em comparação com métodos tradicionais que empregam reagentes químicos agressivos (ARARUNA, 2013). A síntese verde de AgNPs estabilizadas com produtos naturais também se estende para outras aplicações, incluindo atividade antibacteriana, onde as AgNPs demonstram eficácia potencializada e menor toxicidade. Na área biomédica, essas nanopartículas podem ser empregadas na entrega de fármacos, onde a biocompatibilidade

das biomoléculas utilizadas na síntese verde pode tornar o sistema de entrega mais seguro e eficiente. As propriedades ópticas e eletrônicas das AgNPs fazem delas promissoras para a construção de sensores diversos.

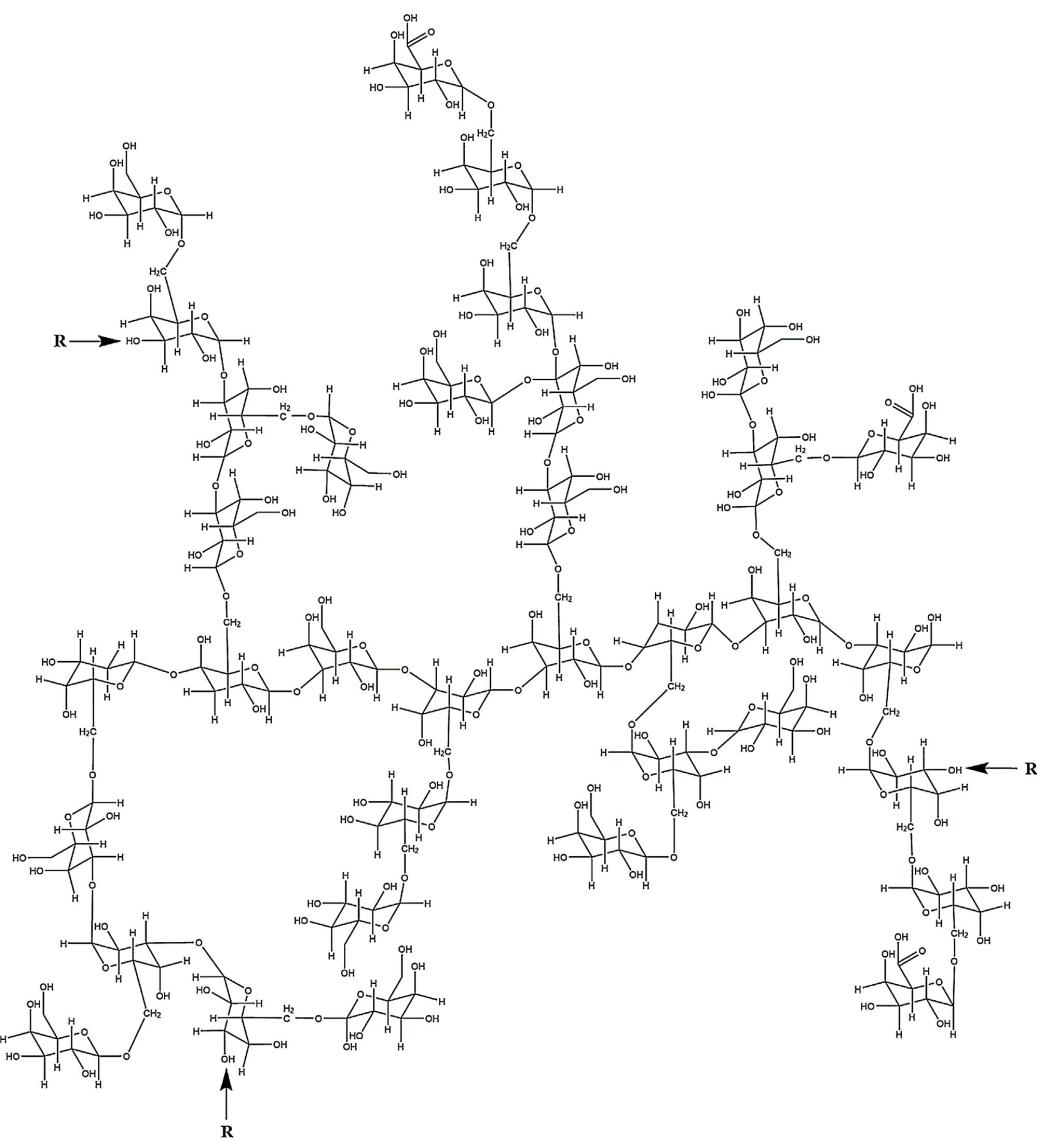


Figura 3. Estrutura não modificada da goma do cajueiro. R representa d-manoze, l-ramnoze, l-arabinose ou cadeias de 1,2-arabinose (RIBEIRO; SOUZA; BEZERRA; OLIVEIRA *et al.*, 2016).

A curcumina, um composto bioativo encontrado no açafrão-da-terra (*Curcuma longa*), também tem se destacado como um agente eficaz na síntese de AgNPs (SOTO-QUINTERO; ET AL., 2019; ZIELINSKA; ET AL., 2020). A curcumina é um polifenol cuja fórmula química é C₂₁H₂₀O₆, com uma massa molar de 368,38 g/mol e ponto de fusão de 183°C (KARAN; ERENLER; BOZER; KARAN *et al.*, 2022). Sabe-se que a curcumina é capaz de modular fatores de crescimento, enzimas, fatores de transcrição,

quinases, citocinas inflamatórias e proteínas pró-apoptóticas e antiapoptóticas, tornando-se uma molécula versátil e promissora para o tratamento de diversas doenças (ZIELINSKA; ET AL., 2020). Diversos estudos demonstram o potencial medicinal da curcumina, que apresenta propriedades antibacterianas, antiinflamatória (JURENKA, 2009), antioxidante (DURAZZO; LUCARINI, 2018), cicatrizante, analgésica (HEWLINGS; KALMAN, 2017), neuroprotetora (YAN; SUN; XIE; SHEN *et al.*, 2018), anticancerígena (GIORDANO; TOMMONARO, 2019), entre outros.

Este composto é praticamente insolúvel em água. A extração da curcumina geralmente é feita a partir do extrato alcoólico da *Curcuma longa*, que contém três curcuminóides principais: curcumina, desmetoxicurcumina e bisdesmetoxicurcumina (Figura 4) (STATI; ROSSI; TRAKOOLWILAIWAN; TUNG *et al.*, 2022; TOLEDO, 2013). Esses curcuminoides são responsáveis pela coloração amarela do pó.

A função principal da curcumina na síntese de AgNP é atuar como um agente redutor, convertendo íons prata (Ag^+) em prata metálica (Ag^0), um processo que leva à formação das nanopartículas. Esse fenômeno é indicado pela mudança de cor da solução, que passa de amarelo para marrom escuro, sinalizando a criação das AgNPs. Além de sua função redutora, a curcumina também desempenha o papel de estabilizador e revestimento, prevenindo a agregação das AgNPs e controlando seu tamanho e morfologia. Os grupos hidroxila e carbonila presentes na curcumina interagem com a superfície das nanopartículas, formando uma camada protetora que assegura a estabilidade coloidal das AgNPs (LOO; ROHANIZADEH; YOUNG; TRAINI *et al.*, 2015). As AgNPs sintetizadas com curcumina também apresentam propriedades biológicas promissoras. Estudos de citotoxicidade mostraram que essas nanopartículas demonstram excelente atividade em linhagens celulares de câncer. Além disso, as AgNPs induzem apoptose nas células cancerosas, conforme evidenciado pelo aumento do índice apoptótico, um processo crucial para eliminar células danificadas ou cancerosas. Importante destacar que as AgNPs apresentam baixa toxicidade em células normais, indicando sua seletividade para células cancerosas (NAKSURIYA; OKONOGI; SCHIFFELERS; HENNINK, 2014). As evidências disponíveis destacam o potencial da curcumina como um agente eficaz na síntese verde de nanopartículas de prata. Sua biocompatibilidade, aliada às propriedades biológicas intrínsecas, conferem às AgNPs sintetizadas um grande potencial para aplicações biomédicas e forenses.

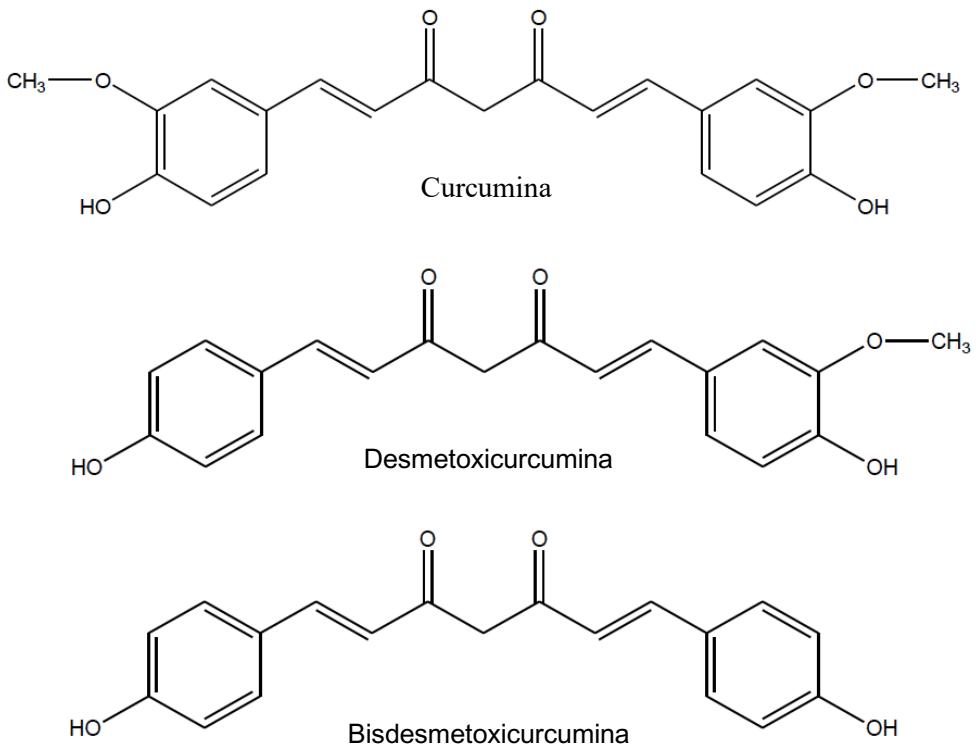


Figura 4. Estrutura química dos curcumoides (TOLEDO, 2013).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Caracterizar e avaliar o efeito de nanopartículas de prata produzidas com polissacarídeos da goma do cajueiro e com ou sem curcumina para determinar seu potencial como agente revelador de impressões digitais latentes em superfícies porosas.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Produzir as nanopartículas de prata com a goma do cajueiro pela síntese verde;
- b) Produzir as nanopartículas de prata com a goma do cajueiro e com curcumina para avaliar o potencial de redução da prata e a provável propriedade fluorescente;
- c) Avaliar a capacidade das nanopartículas de prata quanto à revelação de impressões digitais latentes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

A Goma do Cajueiro (GC) foi gentilmente cedida pelo Núcleo de Pesquisa em Biodiversidade e Biotecnologia (Biotec) da Universidade Federal do Piauí (UFPI) e a Curcumina P.A. (98%) [(1E,6E)-1,7-bis (4-hydroxy- 3-methoxyphenyl) -1,6- heptadiene-3,5-dione] foi adquirida da Êxodo Científica. O Etanol (99,3%) (C_2H_6O), Brometo de Potássio (KBr) e Nitrato de Prata ($AgNO_3$) foram todos adquiridos da Sigma-Aldrich. Todos os reagentes foram de grau analítico. A ninidrina e o DFO (1,8-diafluoren-9-ona) foram cedidos pelo Laboratório de Exames Papiloscópicos do Instituto de Identificação da Polícia Civil do Distrito Federal (PCDF).

3.2. Síntese das Nanopartículas de Prata com Goma do Cajueiro (GC-AgNP)

A síntese das nanopartículas (Figura 5) foi realizada de acordo com o método proposto por Araruna *et al.* (2020) com modificações. A GC foi solubilizada em água ultrapura em uma concentração de 0,5% w/v mantida sob agitação constante por 12h em temperatura ambiente. Posteriormente, a solução foi filtrada em papel qualitativo para remoção de impurezas e partículas maiores. A solução aquosa de Nitrato de Prata foi preparada a 1mM durante a solubilização da solução aquosa da goma do cajueiro e foi mantida sob agitação constante em temperatura ambiente por 30 minutos. A solução de GC foi misturada com a solução de $AgNO_3$ na proporção de 1:1 (v/v) e agitada por 10 minutos em temperatura ambiente. Em seguida, a solução foi aquecida em um forno de micro-ondas doméstico com exposição a micro-ondas em 2.450 MHz por 3 minutos, em um bêquer. Devido ao aquecimento acelerado e na presença da GC, houve a redução dos íons Ag^+ , formando as nanopartículas GC-AgNP, ocasionando na mudança de coloração da solução de transparente para levemente amarelada (Figura 6a). Após a síntese das nanopartículas, a suspensão foi centrifugada a 5000 rpm por 15 minutos e o precipitado foi descartado (ARARUNA; OLIVEIRA; QUELEMES; NOBRE *et al.*, 2020).

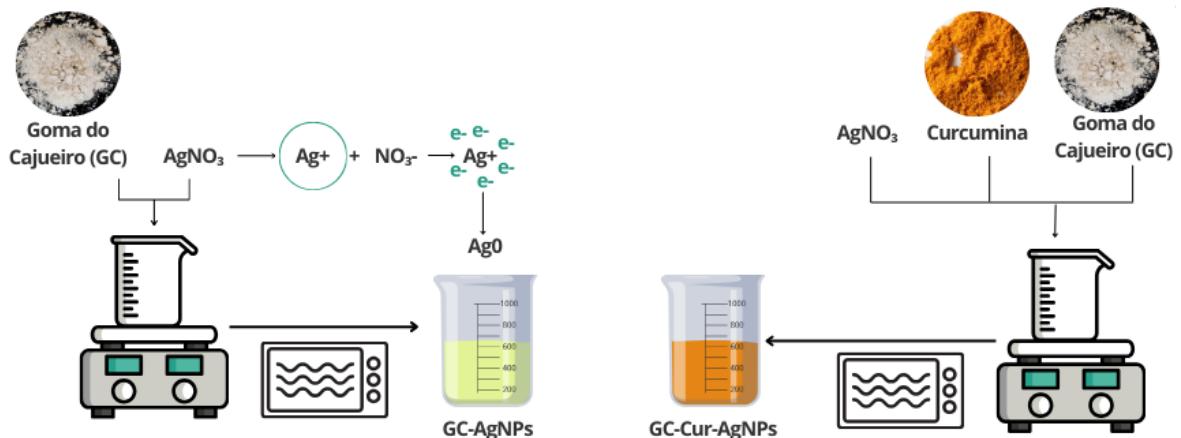


Figura 5. Representação gráfica esquemática da sintetização das nanopartículas.

3.3. Síntese das Nanopartículas de Prata com Goma do Cajueiro e Curcumina (GC-Cur-AgNP)

A curcumina foi solubilizada de acordo com método proposto por Stati *et al.* (2022) com modificações. Uma alíquota de curcumina P.A. foi dissolvida etanol (11 mM, 1 mL) e em seguida foi dispersa em 1 L de água ultrapura para obter uma concentração final de 11 µM. Soluções aquosas de GC e AgNO₃ foram preparadas conforme descrito anteriormente. Após a mistura das soluções de GC e AgNO₃, a suspensão de curcumina foi adicionada sob agitação moderada na proporção de 1:1 (Figura 6b). A redução foi realizada em um forno de micro-ondas doméstico com exposição a micro-ondas em 2.450 MHz e aquecimento por 1 minuto e 30 segundos, em um bêquer. Houve a redução dos íons Ag⁺, formando as nanopartículas GC-Cur-AgNP, ocasionando na mudança de coloração da solução de alaranjada para levemente amarela-esverdeada (Figura 6c). Após a síntese das nanopartículas, a suspensão foi centrifugada a 5000 rpm por 15 minutos e o precipitado foi descartado.

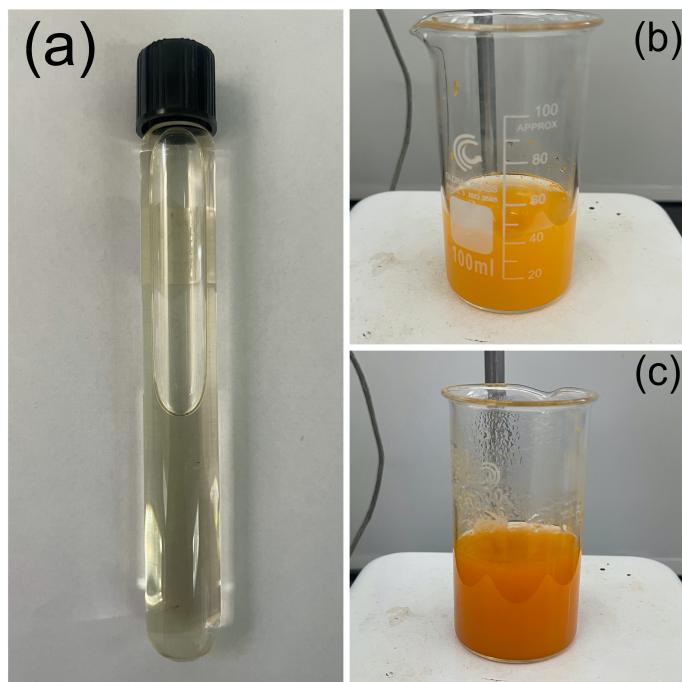


Figura 6. Fotografia digital da (a) suspensão de nanopartícula de prata reduzida com a goma do cajueiro (GC-AgNP), (b) a curcumina em suspensão aquosa e a (c) suspensão de nanopartícula de prata reduzida com a goma do cajueiro e estabilizada com curcumina (GC-Cur-AgNP).

3.4. Espectroscopia no Infravermelho (FT-IR)

A espectroscopia no infravermelho foi realizada no Laboratório de Espectroscopia Óptica — LEO (Instituto de Física/UnB), com auxílio do Dr. Alexandre Silva.

Foram preparadas pastilhas de KBr para leitura das amostras. As medições ocorreram em um intervalo de 550 a 4000 cm⁻¹ e 64 scans, utilizando um Espectrômetro FTIR, Bruker, Vertex 70, trabalhando nas regiões FAR, MIR e NIR. Apenas a região que contém a maior parte das informações (impressão digital do espectro) é apresentada neste trabalho.

3.5. Espectroscopia no Ultravioleta/visível (UV-vis)

A medida de espectroscopia no ultravioleta foi feita em um leitor de microplacas Varioskan™ Lux microplate reader (Thermo Fisher Scientific) no Laboratório de Compostos Bioativos e Nanobiotecnologia — LCBNano (IB/UnB), com auxílio do Prof. Dr. João Paulo Longo. As amostras foram diluídas em água destilada (1:20). Os espectros

de emissão foram obtidos de 300 a 700 nm em uma placa de 96 poços.

3.6. Espectroscopia de Fluorescência

A espectroscopia de fluorescência foi feita em um leitor de microplacas VarioskanTM Lux microplate reader (Thermo Fisher Scientific) no Laboratório de Compostos Bioativos e Nanobiotecnologia — LCBNano (IB/UnB), com auxílio do Prof. Dr. João Paulo Longo. As amostras foram diluídas em água destilada (1:20). Os espectros foram registrados de 400 a 700 nm com uma onda de excitação em 467 nm em uma placa escura de 96 poços.

3.7. Análise do Potencial Zeta

A análise do potencial zeta foi feita no Laboratório de Compostos Bioativos e Nanobiotecnologia — LCBNano (IB/UnB), com auxílio do Prof. Dr. João Paulo Longo.

Para análise do potencial Zeta, as amostras foram diluídas na proporção de 1:20. A análise foi realizada em um equipamento Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments), cubeta de poliestireno DTS0012, a 25°C em um ângulo de 90°. Foram feitas três corridas independentes. As análises foram feitas imediatamente após a síntese.

3.8. Análise do Espalhamento Dinâmico da Luz (DLS)

A análise de tamanho de partícula foi feita no Laboratório de Compostos Bioativos e Nanobiotecnologia — LCBNano (IB/UnB), com auxílio do Prof. Dr. João Paulo Longo.

A análise foi determinada por espelhamento dinâmico da luz (DLS), onde as amostras foram diluídas na proporção de 1:20. Foi realizada em um equipamento Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments), cubeta de poliestireno DTS0012, a 25°C. Foram feitas três corridas independentes. As análises foram feitas imediatamente após a síntese e 8 meses após a síntese.

3.9. Produção das Impressões Digitais Latentes

As impressões digitais foram obtidas a partir de um doador voluntário adulto do sexo masculino a partir de consentimento firmado pelo Termo de Consentimento Livre e

Esclarecido - TCLE. Foram coletadas informações sobre sua rotina diária, uso de medicações, doenças prévias com a finalidade de orientar a discussão quanto a qualidade da produção das impressões digitais. O doador também foi orientado a não alterar sua rotina, com intuito de simular uma condição natural de deposição de impressões digitais (BARROS, RODRIGO M; FARIA, BRUNA E F; KUCKELHAUS, SELMA A S, 2013).

O procedimento foi realizado a partir do método proposto por Barros *et al.* (2013) com modificações. Durante todo o procedimento, apenas o doador não fez uso de luvas de látex. O doador produziu impressões digitais latentes em superfície porosa de papel alcalino branco para os testes das nanoestruturas em ambiente controlado. Com o polegar direito, o doador fez a aposição da impressão digital no papel da seguinte forma:

- (a) com a mão direita tocou levemente em sua testa e nariz e esfregou as pontas dos dedos por 10 segundos;
- (b) Em seguida, depositou uma impressão digital durante o tempo de 1,5 segundos em contato com um quadrante de papel alcalino como suporte poroso primário.

O mesmo procedimento foi repetido para cada um dos 20 quadrantes para garantir a reproduutibilidade das impressões digitais. Cada quadrante media 2,8 cm de largura e 3,9 cm de comprimento. Nomeou-se os quadrantes como suportes porosos primários por serem a superfície original onde está apostada impressão digital. O método utilizado foi estabelecido com a finalidade de produzir impressões digitais eminentemente sebáceas.

3.10. Revelação das Impressões Digitais Latentes

Após a produção das impressões digitais, cada suporte poroso primário foi identificado com uma numeração diferente referente ao revelador utilizado e ao tempo de revelação após a aposição das impressões digitais realizada pelo doador. Para os testes de revelação, o suporte foi imerso por 30 minutos nas suspensões de nanopartículas (GC-AgNP e GC-Cur-AgNP), após esse tempo, foi realizada a secagem em temperatura ambiente e em seguida, o suporte foi fotografado utilizando uma câmera fotográfica digital (Canon® EOS Rebel SL3) no modo Macro (FARIA, 2016).

As imersões ocorreram em cinco tempos diferentes: imediatamente após a produção das impressões digitais (tempo 0h), uma hora (1h), seis horas (6h), doze horas (12h) e vinte e quatro horas (24h) após a produção, totalizando 10 testes. O controle positivo foi feito utilizando ninidrina e DFO (1,8-diafluoren-9-on). A escolha do controle positivo foi

baseada nos protocolos utilizados pelo Instituto de Identificação da PCDF para revelação de vestígios papiloscópicos em superfícies porosas. Posteriormente, as imagens foram analisadas por um perito papiloscopista que realizou o confronto pericial para verificação de coincidência ou não de pontos característicos individualizadores, determinando de forma inequívoca se as impressões papilares e/ou fragmentos de impressões constantes no material analisado apresentaram ou não compatibilidade com os padrões já cadastrados no banco de dados do arquivo de prontuários de identificação civil. Também foram analisadas as características morfológicas das impressões papilares e identificados os pontos característicos individualizadores. Nesta etapa foi utilizado o software Photoshop CS5® para a marcação dos pontos característicos. Foi estabelecido a marcação de até 12 pontos característicos para determinar a qualidade da revelação e individualização. Os exames foram efetuados de acordo com as normas técnicas que estão em conformidade com os protocolos forenses recomendados pela *International Association for Identification*.

3.11. Análise Estatística

As análises e representações gráficas foram realizadas utilizando os programas Prism® Software Package 5.0 (GraphPad, USA) e OriginLab® (OriginLab Corporation, USA). Os cálculos foram realizados no software Microsoft Excel®.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Obtenção das nanopartículas

As nanopartículas de prata com goma de cajueiro (GC-AgNP) e as nanopartículas de prata com goma de cajueiro e curcumina (GC-Cur-AgNP) foram preparadas pelo método proposto por Araruna *et al.* (2020) e Stati *et al.* (2022) com modificações pelo processo de redução dos íons de prata por aquecimento em microondas. A Figura 7 mostra uma representação esquemática do modelo de interação das nanopartículas de prata com a GC e a curcumina.

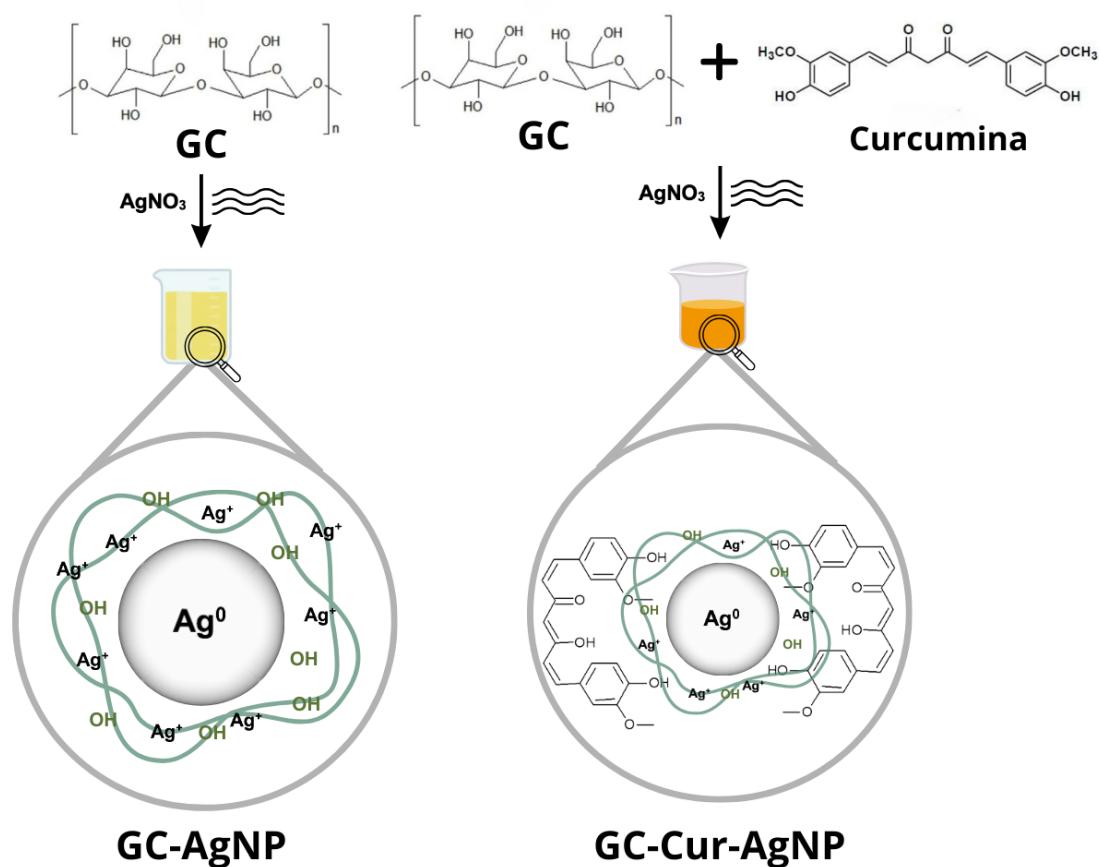


Figura 7. Representação esquemática e simplificada teórica da produção e da interação das nanopartículas de prata com a GC e curcumina (STATI; ROSSI; TRAKOOLWILAIWAN; TUNG *et al.*, 2022) (ARARUNA; OLIVEIRA; QUELEMES; NOBRE *et al.*, 2020) com modificações.

A síntese e caracterização de nanopartículas de prata (AgNPs) utilizando goma de caju e curcumina como agentes estabilizantes têm sido objeto de estudos recentes. Com base nas informações disponíveis, é possível propor um modelo de interação para cada um desses compostos com as AgNPs, elucidando os mecanismos envolvidos na estabilização e funcionalização dessas nanopartículas. A GC, um polissacarídeo aniónico, exerce um papel fundamental na estabilização das AgNPs por meio de um mecanismo conhecido como estabilização eletrostérica. Esse processo combina dois efeitos principais: a repulsão eletrostática e o impedimento estérico. A repulsão eletrostática ocorre devido à presença de grupos carboxila (-COOH) na goma de caju, que, ao se ionizarem em solução aquosa, conferem uma carga negativa à superfície das AgNPs. Essa carga negativa promove uma repulsão entre as nanopartículas, prevenindo sua agregação. Paralelamente, o impedimento estérico resulta na formação de uma barreira física ao redor das nanopartículas, proporcionada pelas longas cadeias poliméricas da goma de caju. Esse bloqueio físico impede o contato direto entre as nanopartículas, favorecendo a estabilidade coloidal (ARARUNA; QUELEMES; FARIA; KUCKELHAUS *et al.*, 2013; RIBEIRO; SOUZA; BEZERRA; OLIVEIRA *et al.*, 2016; SILVA, 2009; SILVA; FEITOSA; PAULA; PAULA, 2009). Outro aspecto relevante é a interação entre os grupos hidroxila (-OH) da goma de caju e a superfície das AgNPs. Estudos de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) indicam que essa interação ocorre por meio de ligações de hidrogênio ou coordenação com os átomos de prata, contribuindo para a estabilização das nanopartículas (LIMA; PAULA; ABREU; SILVA *et al.*, 2018). Adicionalmente, a goma de caju apresenta uma característica vantajosa em aplicações forenses. Sendo um polímero hidrofílico e aniónico, ela não interage fortemente com as fibras de celulose do papel, o que reduz a coloração de fundo em revelações de impressões digitais e possibilita a reutilização do material após a perícia (FARIA, 2016).

Por outro lado, a curcumina, um polifenol com grupos carbonila e hidroxila, age como agente quelante e estabilizante das AgNPs. Ela se coordena com os átomos de prata na superfície das nanopartículas por meio de seus grupos funcionais, formando um complexo estável, o que é evidenciado pela alteração no espectro de absorção UV-Vis das AgNPs na presença de curcumina (Figura 10). Além disso, em um pH 7, a curcumina apresenta carga negativa, resultante da ionização de seus grupos carbonila, o que contribui para a estabilidade coloidal das AgNPs pela repulsão eletrostática (QUELEMES, 2013). É importante destacar que as interações entre as AgNPs, a goma de caju e a curcumina podem ser influenciadas por fatores como pH, temperatura e concentração dos reagentes. A

literatura atual, no entanto, ainda não explora a interação simultânea desses estabilizantes com as AgNPs, o que levanta questões interessantes sobre possíveis sinergias ou competições por sítios de interação na superfície das nanopartículas. Investigar esses aspectos pode auxiliar no entendimento sobre o mecanismo de ação da GC e da curcumina na estabilização das AgNPs.

4.2. Espectroscopia no Infravermelho (FT-IR)

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica analítica valiosa para caracterizar a composição química e as interações moleculares em materiais, incluindo nanopartículas. O método consiste na absorção de radiação infravermelha por ligações químicas em moléculas, onde cada tipo de ligação química vibra em uma frequência específica, e a absorção de luz infravermelha em uma determinada frequência indica a presença dessa ligação na amostra (DIAS; NOGUEIRA; DOURADO; GUIMARÃES *et al.*, 2016). A análise do espectro de FTIR permite a identificação de grupos funcionais presentes nas nanopartículas, fornecendo informações sobre sua composição e estrutura.

O mapa do Potencial Molecular Eletrostático (MEP), apresentado na Figura 8, mostra a distribuição do potencial eletrostático ao longo da estrutura molecular da GC, ilustrando as regiões de acumulação e depleção de carga que contribuem para as interações intermoleculares. A análise de MEP revelou que a densidade eletrônica está distribuída de maneira desigual na molécula, com regiões em vermelho indicando áreas de potencial eletrostático negativo (zonas ricas em elétrons), geralmente associadas a átomos de oxigênio capazes de participar de ligações de hidrogênio. Por outro lado, as regiões em azul representam áreas de potencial eletrostático positivo, normalmente centradas em átomos de hidrogênio, indicando possíveis sítios doadores para interações intermoleculares. Essas variações de carga sugerem que a goma de cajueiro pode participar de interações dipolo-dipolo e pode apresentar propriedades de ligação seletiva com base na complementaridade eletrostática.

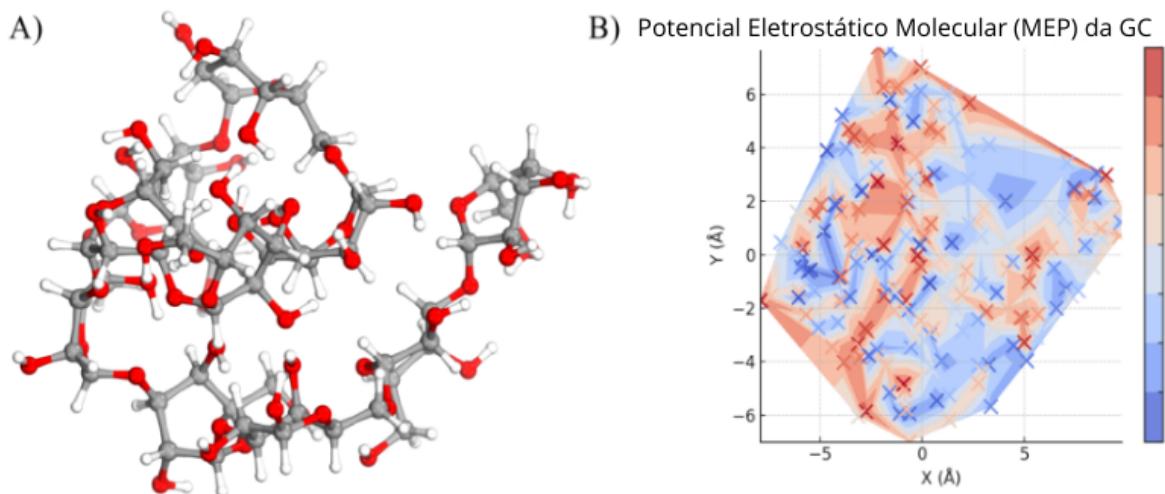


Figura 8. A) Modelo 3D da molécula de GC e B) Mapa do Potencial Eletrostático Molecular (MEP) da GC.

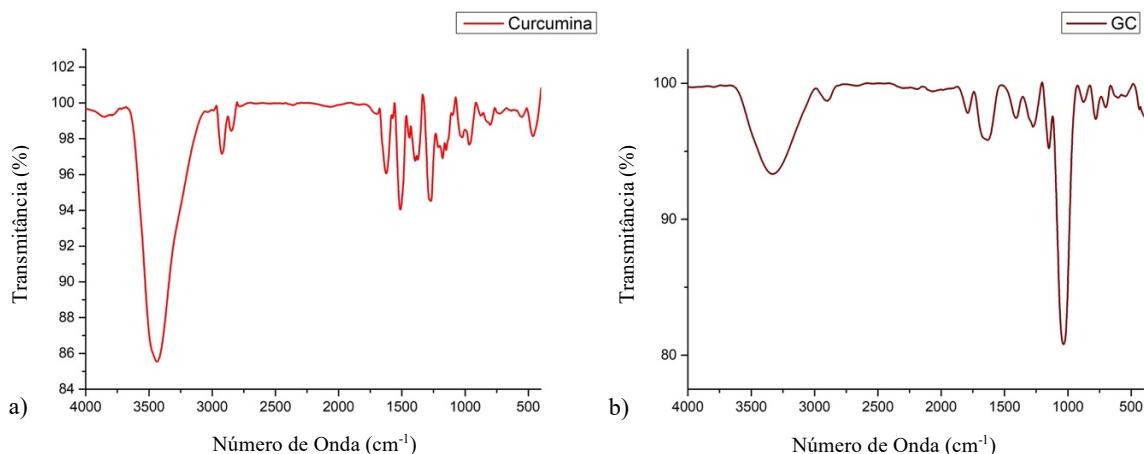


Figura 9. a) Espectro no infravermelho da curcumina isolada (—) e b) espectro no infravermelho da goma de cajueiro isolada (—).

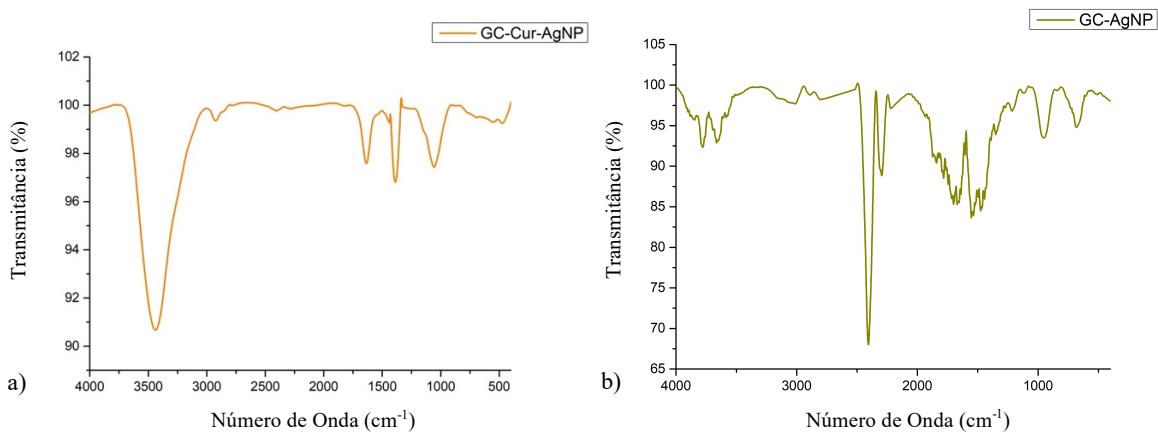


Figura 10. a) Espectro no infravermelho da nanopartícula de prata com goma do cajueiro e curcumina (—) e b) espectro no infravermelho da nanopartícula de prata com goma do cajueiro (—).

As Figuras 9 e 10 apresentam os espectros experimentais de FTIR da curcumina (Cur), goma de cajueiro (GC), GC-Cur-AgNP e GC-AgNP, respectivamente. Em conjunto com os espectros teóricos para moléculas isoladas, apresentados na Figura 11, esses dados exibem características vibracionais essenciais que revelam como polissacarídeos, moléculas bioativas e nanopartículas metálicas interagem em nível molecular. A compilação das atribuições vibracionais para os resultados experimentais e teóricos está apresentada na Tabela 1.

Na região abaixo de 1000 cm^{-1} , os cálculos teóricos para a GC preveem bandas em aproximadamente 602 e 713 cm^{-1} , que refletem deformações angulares O–H na goma de cajueiro, rica em hidroxilas. Outro modo vibracional em 859 cm^{-1} envolve flexões acopladas C–H e O–H, frequentemente associadas a vibrações fora do plano nos anéis polissacarídicos. Em comparação, a curcumina exibe uma deformação relacionada em 984 cm^{-1} , associada ao seu ambiente de ligação por hidrogênio fenólico e enólico.

Na faixa de aproximadamente 1052 – 1159 cm^{-1} , a GC apresenta deformações fora do plano C–H e modos de torção CH₂, com correspondências teóricas em torno de 1104 – 1078 cm^{-1} , indicando flexões nas unidades glicosídicas. Em GC-AgNP e GC-Cur-AgNP, pequenos deslocamentos nessas bandas sugerem interações da prata com grupos hidroxila ou glicosídicos da goma de cajueiro.

Por volta de 1290 cm^{-1} , tanto a GC quanto a curcumina exibem vibrações associadas a deformações angulares C–H e C–O–C; os modos teóricos entre 1272 – 1281 cm^{-1} confirmam que as ligações glicosídicas da goma de cajueiro contribuem para essa região espectral.

Na faixa de 1500 a 1800 cm^{-1} , tornam-se evidentes os estiramentos C=C e C=O característicos da curcumina. Experimentalmente, sinais próximos a 1519 e 1631 – 1647 cm^{-1} refletem o sistema enona conjugado da curcumina e os estiramentos C=C do anel aromático. Com a formação das nanopartículas, essas bandas se deslocam ou alargam, indicando a coordenação do metal por meio do grupamento dicetona (ANAND; ET AL., 2007). Os cálculos teóricos preveem o estiramento do carbonila na faixa de 1638 a 1754 cm^{-1} , e picos experimentais próximos de 1642 ou 1647 cm^{-1} em nanocompósitos baseados em curcumina sugerem delocalização parcial de elétrons e quelação com prata.

Na região de alta frequência (2800 – 3800 cm^{-1}), tanto a GC quanto a curcumina apresentam bandas intensas de estiramento O–H em torno de 3376 a 3735 cm^{-1} , com previsões teóricas próximas a 3312 – 3695 cm^{-1} . Uma banda larga por volta de 3381 cm^{-1} é atribuída a moléculas de água e grupos OH. Na goma de cajueiro, a banda larga próxima de

3379 cm^{-1} também é atribuída ao estiramento O–H, enquanto a banda em 2933 cm^{-1} reflete o estiramento C–H.

Com a formação das nanopartículas de prata, o alargamento e os deslocamentos dos estiramientos O–H confirmam o aumento das ligações de hidrogênio ou a coordenação direta dos grupos hidroxila com a prata. Os deslocamentos consistentes das bandas, mudanças na intensidade e o alargamento espectral indicam que tanto a matriz rica em hidroxila da goma de cajueiro quanto os sítios dicetona e fenólico da curcumina se complexam efetivamente com a prata. Isso está de acordo com estudos sobre nanocompósitos metálicos baseados em polissacarídeos e sistemas curcumina-metal.

As principais propriedades químicas da goma de cajueiro permanecem intactas após a síntese das nanopartículas, embora as bandas da curcumina possam ser mascaradas quando sua concentração é baixa e as condições de pH variem. A preservação das características espectrais da GC em GC-AgNP e GC-Cur-AgNP ressalta a estabilidade estrutural do polissacarídeo, enquanto os dados experimentais e teóricos confirmam a capacidade de coordenação dos grupos funcionais da curcumina.

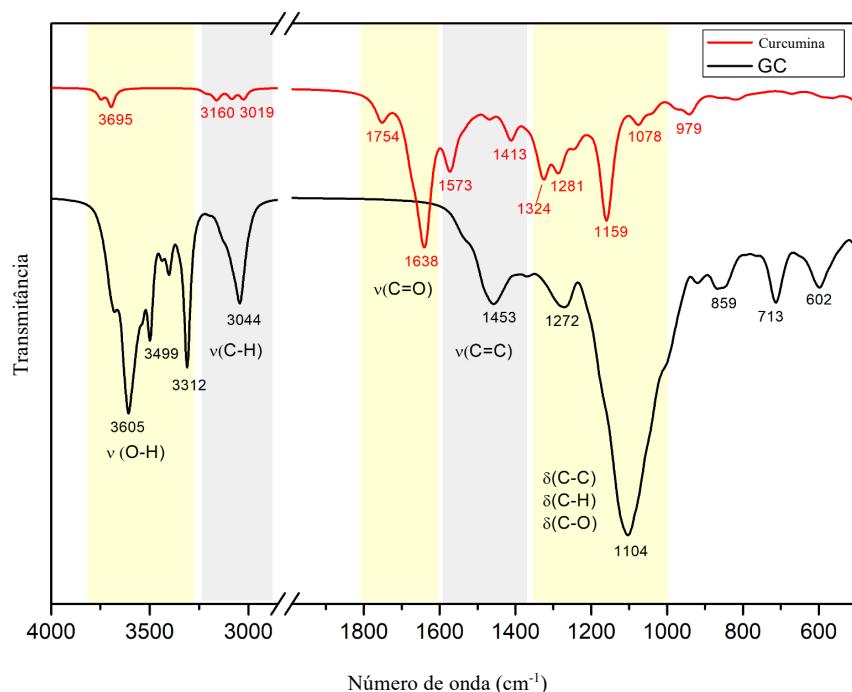


Figura 11. Espectros infravermelhos teóricos da curcumina isolada (—) e da goma de cajueiro isolada (—). Os números em destaque indicam os números de onda dos picos, enquanto as regiões hachuradas destacam as atribuições vibracionais mais comuns.

Tabela 1. Atribuições teóricas dos modos vibracionais para os compostos GC, Cur e AgNP. ν e ν_a denotam alongamento (geral e assimétrico). δ (dobra no plano), γ (dobra fora do plano) e τ (torção) indicam modos de deformação.

GC	Cur	GC-Cur-AgNP	GC-AgNP	GC	Cur	Atribuições Vibracionais
		Experimental (cm^{-1})			Teórico (cm^{-1})	
				602		$\delta(\text{C-H})$ e $\delta(\text{O-H})$
				713		$\delta(\text{O-H})$
				859		$\delta(\text{C-H})$ e $\delta(\text{O-H})$
	984				979	$\gamma(\text{C-H})$ (benzeno)
					1078	$\tau(\text{CH}_2)$ e $\gamma(\text{C-H})$
1052		1057		1104		$\gamma(\text{C-H})$
				1127		$\delta(\text{C-C})$ (anel) e $\delta(\text{C-H})$
1293			1292	1272		$\delta(\text{C-H})$ e $\delta(\text{C-O-C})$
	1294				1281	$\delta(\text{C-C})$, $\delta(\text{C-H})$, e $\delta(\text{C-O})$
	1378				1324	$\delta(\text{C-C})$, $\delta(\text{C-H})$, e $\delta(\text{C-O})$
		1385				-
					1413	$\nu(\text{C=C})$ e $\delta(\text{C-H})$
				1453		$\gamma(\text{C-H})$ e $\gamma(\text{O-H})$
	1519				1573	$\nu_a(\text{C=C})$ (benzeno)
	1631	1642			1638	$\nu_a(\text{C=C})$ (benzeno) e fraco $\nu(\text{C=O})$ (conjugado)
1647						-
					1754	$\nu(\text{C=O})$
1831						-
				1985		-
				2134		-
					3019	$\nu(\text{CH}_3)$
2908	2952	2928		3044	3160	$\nu(\text{C-H})$
3376	3458	3457	3587, 3735	3312, 3499, 3605	3695	$\nu(\text{O-H})$

4.3. Espectroscopia no Ultravioleta/visível (UV-vis)

A espectroscopia de UV-Vis é uma técnica auxiliar para a caracterização de nanopartículas, que oferece informações importantes sobre suas propriedades ópticas e estruturais e que se baseia na interação da radiação eletromagnética na região do ultravioleta e visível com as nanopartículas. Quando a luz incide sobre as nanopartículas, ocorre a excitação dos elétrons de valência para níveis de energia mais altos, o que permite, por exemplo, a identificação da formação de nanopartículas metálicas, como as AgNPs. Estas

apresentam uma banda de absorção característica na região visível, conhecida como ressonância plasmônica de superfície (RPS), cuja posição e intensidade são sensíveis ao tamanho, forma e composição das nanopartículas (KARAN; ERENLER; BOZER; KARAN *et al.*, 2022). Além disso, o monitoramento da cinética de reação também é possível em tempo real, acompanhando a evolução da banda de RPS durante a formação das nanopartículas, o que auxilia na otimização das condições de síntese para obter nanopartículas com propriedades específicas. A intensidade da banda de absorção também é proporcional à concentração das nanopartículas em solução, e a lei de Beer-Lambert permite a determinação dessa concentração com base na absorbância em um comprimento de onda específico. Através da espectroscopia UV-Vis, é possível confirmar a formação das AgNPs, observando-se um pico de absorbância máxima em torno de 400 nm (ARARUNA, 2013; BRANDÃO; JESUS; ARAÚJO; CARVALHO *et al.*, 2020; KARAN; ERENLER; BOZER; KARAN *et al.*, 2022; STATI; ROSSI; TRAKOOLWILAIWAN; TUNG *et al.*, 2022). O monitoramento por UV-Vis evidencia o aumento da intensidade da cor amarela da solução com a concentração de goma de cajueiro, indicando a formação de nanoestruturas esféricas de prata. Brandão *et al.* (2020) demonstra que as nanopartículas com maiores concentrações de goma de cajueiro acetilada (ACG) resultaram em nanopartículas maiores, evidenciadas pelo deslocamento do pico de absorbância para comprimentos de onda mais altos.

A Figura 12 ilustra os espectros UV-visível das nanopartículas. Espectros UV-visível de AgNPs de tamanho comparável (45 nm) relatados na literatura mostram uma absorção nítida em 415 nm (STATI; ROSSI; TRAKOOLWILAIWAN; TUNG *et al.*, 2022). As GC-AgNP mostram bandas com λ_{max} em 420 nm. As GC-Cur-AgNPs, por outro lado, mostram bandas com λ_{max} em 280 nm e 480 nm, provavelmente devido à curcumina não reagida na mistura de reação. Entretanto os picos indicam que ocorreu a redução dos íons prata nas duas formulações.

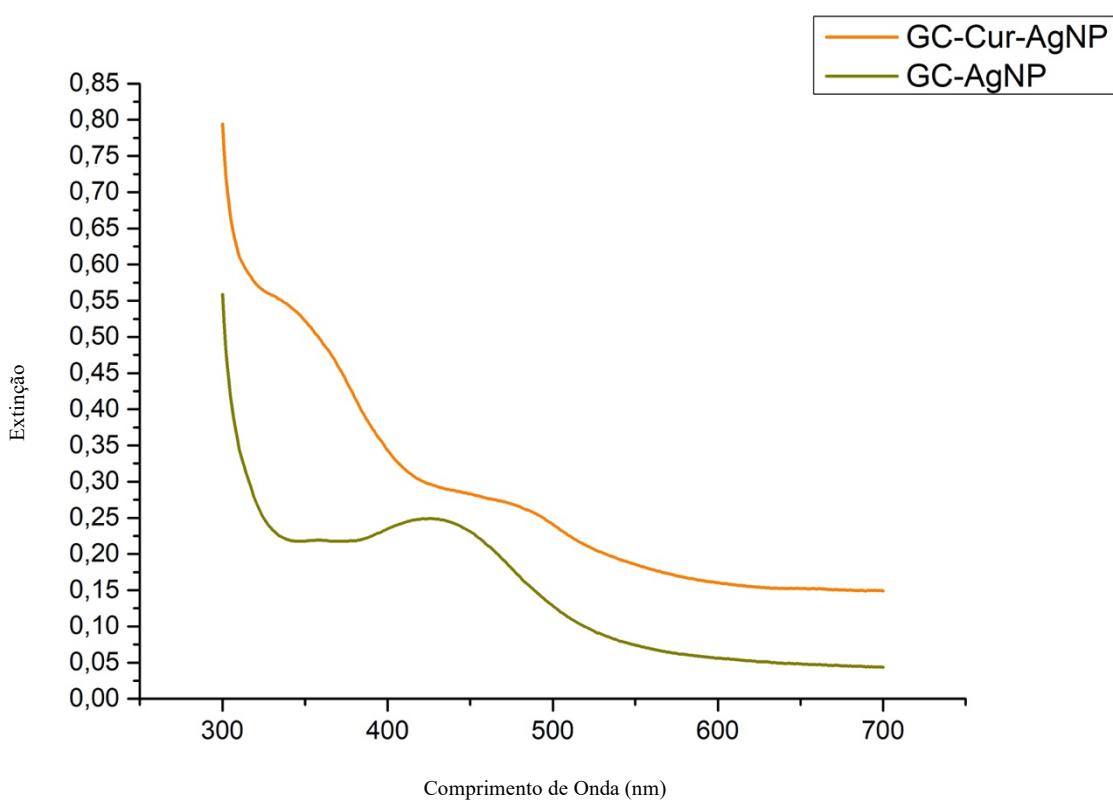


Figura 12. Espectros na região do ultravioleta-vis das amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro (—) e para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina (—).

4.4. Espectroscopia de Fluorescência

A espectroscopia de fluorescência foi aplicada para avaliar se a curcumina permaneceria com as propriedades de fluorescência após o processo de síntese das nanopartículas. A fluorescência é um fenômeno físico que ocorre quando uma substância absorve luz e uma molécula ou um átomo é excitado para um estado quântico mais energético e ao retornar rapidamente ao seu estado fundamental emite um fóton de luz (LAKOWICZ, 2006).

Os espectros foram registrados de 400 a 700 nm com uma onda de excitação em 450 nm nas amostras de GC-AgNP, GC-Cur-AgNP, curcumina isolada e nitrato de prata. Nas amostras de nitrato de prata e GC-AgNP, não há emissão presente, o que era esperado. A amostra de curcumina isolada apresenta uma emissão de fluorescência condizente com a literatura de 520 a 620 nm (EBAID; HABILA; HASSAN; AL-TAMIMI *et al.*, 2021; NAKSURIYA; OKONOGI; SCHIFFELERS; HENNINK, 2014; STATTI; ROSSI; TRAKOOLWILAIWAN; TUNG *et al.*, 2022; VIANA; VIANA; FIGUEIRÊDO; BRITO *et*

al., 2021). A formação das GC-Cur-AgNPs resultou no desaparecimento dessa emissão mais ampla, mantendo apenas uma pequena, porém nítida, emissão em 540 nm (Figura 13). Como era esperado, após a síntese, esse pico foi preservado, mas foi reduzido para aproximadamente 70% da intensidade.

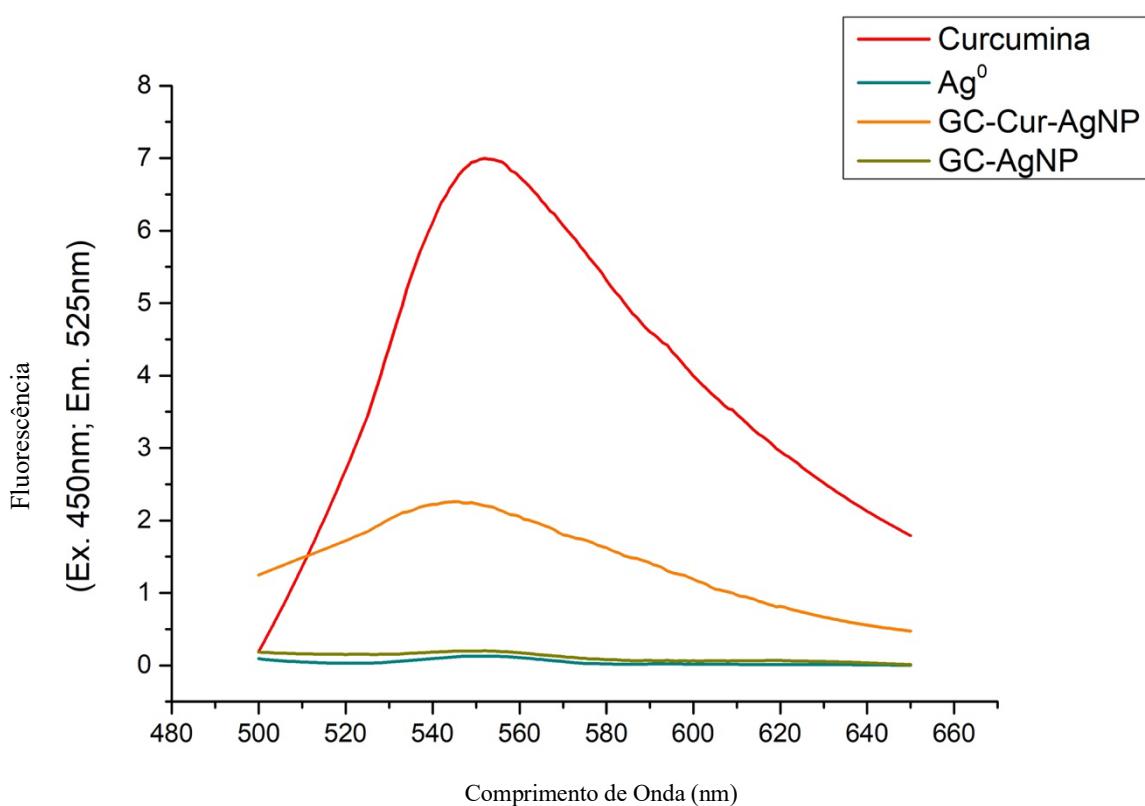


Figura 13. Espectro de fluorescência da curcumina isolada (—), da nanopartícula de prata com goma do cajueiro (—), da nanopartícula de prata com goma do cajueiro e curcumina (—) e da solução aquosa de nitrato de prata (—).

4.5. Análise do Potencial Zeta

O valor médio do potencial zeta das nanopartículas (Figura 14) de prata com goma do cajueiro (GC-AgNP) é de aproximadamente **-1,89 mV**, sendo que os valores de potencial zeta estão todos na faixa negativa, variando de aproximadamente -149,1 mV a -136,1 mV e o valor médio do potencial zeta para as nanopartículas de prata com goma de cajueiro e curcumina (GC-Cur-AgNP) é de aproximadamente **-2,54 mV**, o que indica que as partículas têm uma carga negativa, o que pode contribuir para a estabilidade da suspensão, pois as partículas com cargas similares se repelem, dificultando a agregação. A goma de caju pode atuar como um agente estabilizante, contribuindo para a carga negativa das nanopartículas.

Isso pode facilitar a formação de uma camada ao redor das nanopartículas, protegendo-as de aglomerações. Entretanto, por se tratar de um composto orgânico, os valores obtidos sugerem uma agregação de partículas no meio. Um potencial zeta absoluto acima de ± 30 mV geralmente é considerado indicativo de estabilidade (STATI; ROSSI; TRAKOOLWILAIWAN; TUNG *et al.*, 2022), e embora os valores observados estejam abaixo desse limiar, a carga negativa sugere que há potencial para estabilização, especialmente com a presença de goma de caju e curcumina, que podem melhorar a estabilização das nanopartículas, possivelmente devido a interações eletrostáticas, o que evidencia que esta combinação se mostra promissora em termos de estabilidade e funcionalidade. Stati *et al.* (2022) demonstra que o potencial dos grupos carboxílicos da curcumina em pH 7 é suficientemente forte para proporcionar uma estabilização eletrostática, onde a medição confere um potencial eletrostático negativo de $|32,5|$ mV, estabilizando eletrostaticamente as partículas.

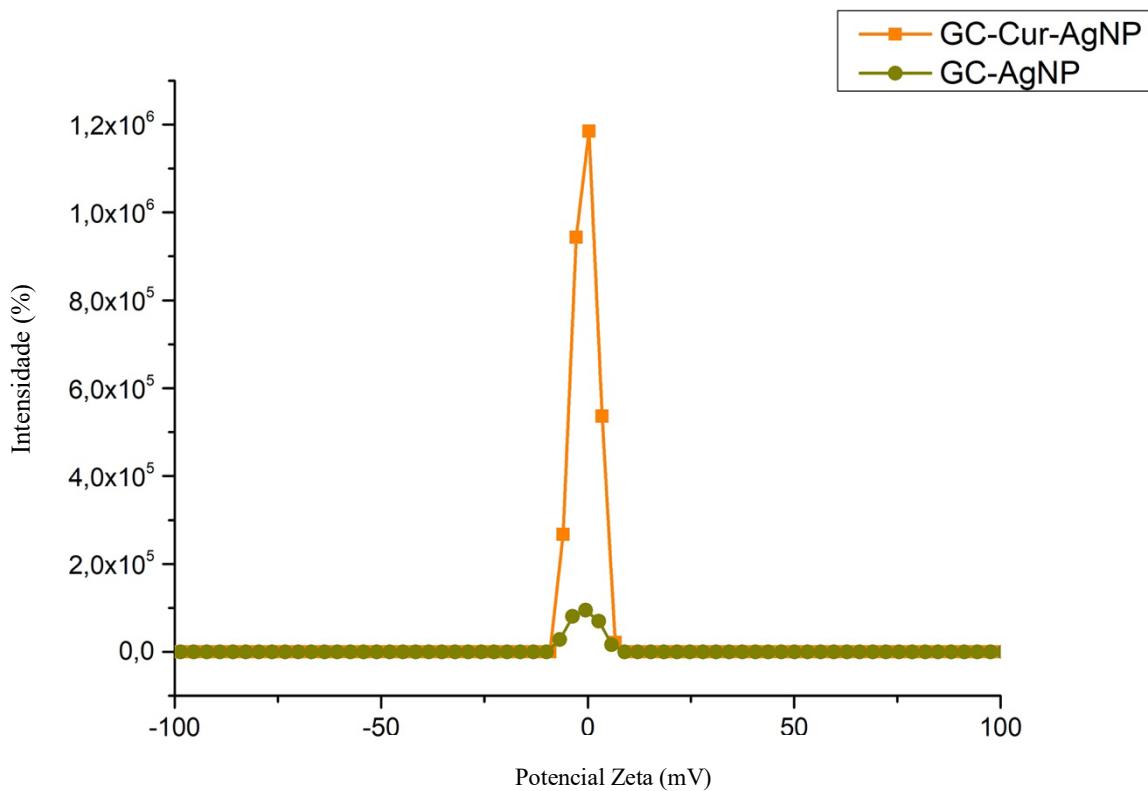


Figura 14. Potencial Zeta para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro (—) e para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina (—).

4.6. Análise do Espalhamento Dinâmico por Luz (DLS)

A análise por Espalhamento Dinâmico da Luz (DLS) foi realizada para determinar o tamanho das nanopartículas. É uma técnica precisa, facilmente reproduzível e que requer uma quantidade mínima de amostra, a qual permite medir a distribuição de tamanho de partículas em escala nanométrica (SHAMELI; AHMAD; ZAMANIAN; SANGPOUR *et al.*, 2012). Através dela, obtém-se tanto o tamanho das nanopartículas quanto o índice de polidispersidade (PDI), que indica a distribuição dos tamanhos e reflete a similaridade entre as partículas. Um valor de PDI mais próximo de 1 indica uma maior variação nos tamanhos das partículas (TSAI, 2011).

A análise de tamanho de partículas no dia da síntese para a amostra de GC-AgNP apresentou um tamanho médio de distribuição em $135,2 \pm 65,9$ nm e um PDI de $0,24 \pm 0,02$. As nanopartículas de GC-Cur-AgNP apresentaram um tamanho médio de distribuição em $175,10 \pm 40,4$ nm e PDI igual a $0,05 \pm 0,37$ (Figura 15).

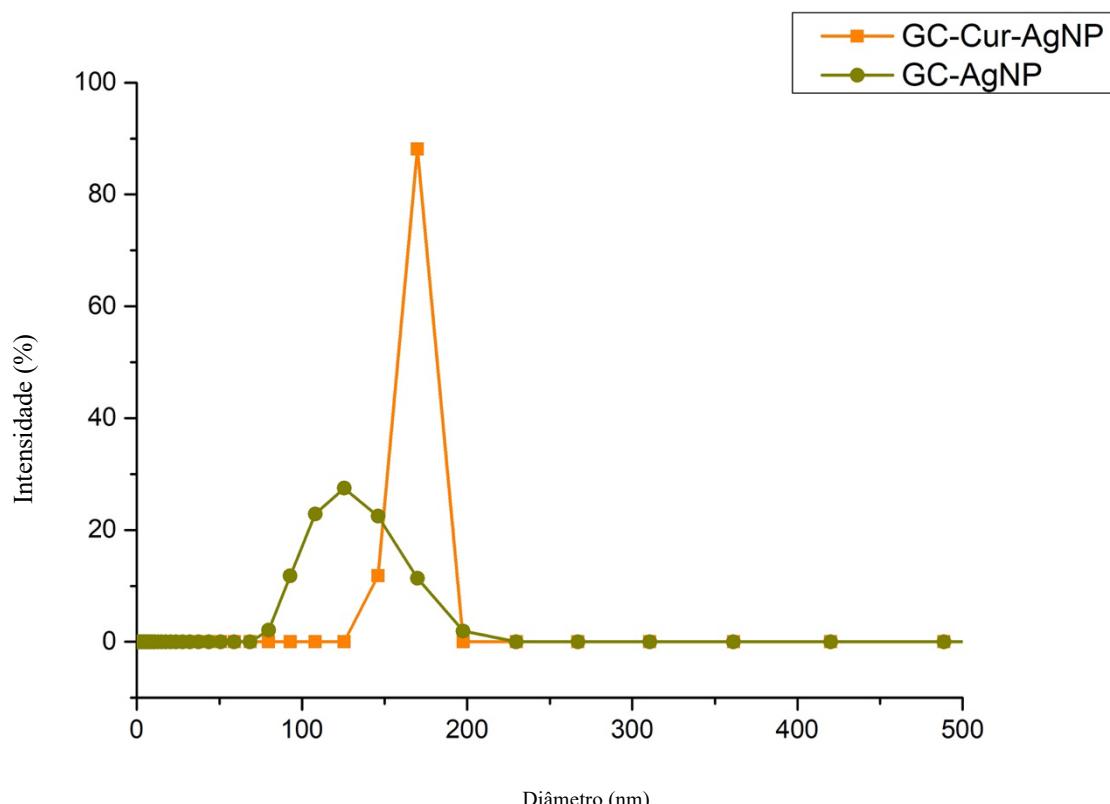


Figura 15. Distribuição de tamanho por DLS para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro (—) e para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina (—).

A análise de tamanho de partículas síntese 8 meses após a síntese para a amostra de GC-AgNP apresentou um tamanho médio de distribuição em $127,78 \pm 78,45$ nm e um PDI de $0,38 \pm 0,61$. As nanopartículas de GC-Cur-AgNP apresentaram um tamanho médio de distribuição em $128,5 \pm 30,5$ nm e PDI igual a $0,056 \pm 0,24$ (Figura 16).

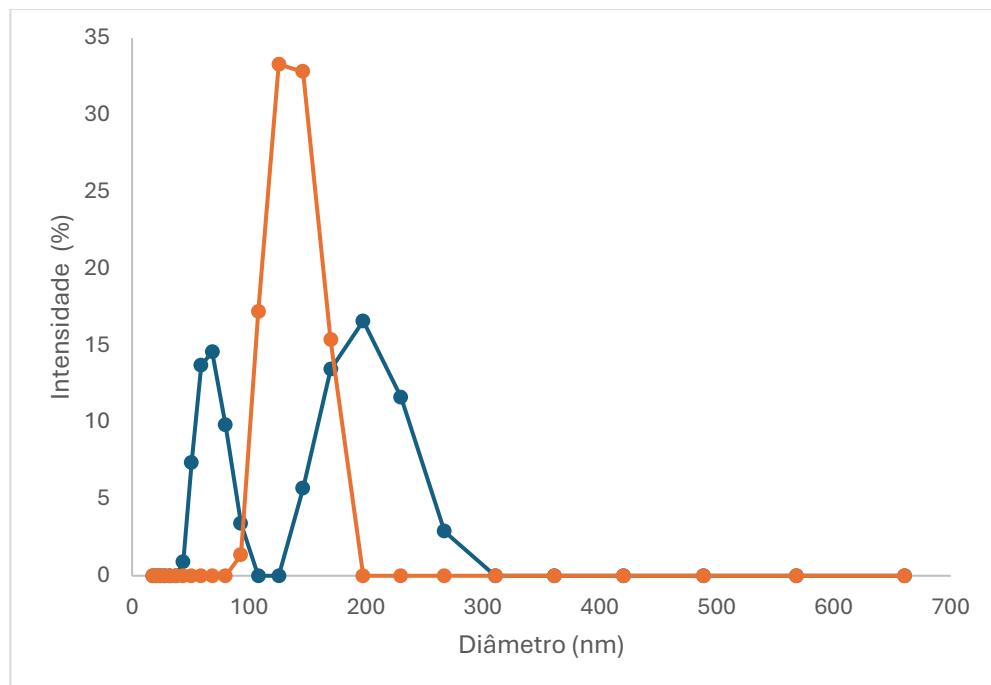


Figura 16. Distribuição de tamanho por DLS para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro (—) e para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina (—) 8 meses após a síntese.

O PDI relativamente alto indica que a amostra é polidispersa, ou seja, há uma variação significativa no tamanho das partículas, o que condiz com os achados do Potencial Zeta que indicam baixa estabilidade e uniformidade da dispersão (Figura 15).

Uma ordem de faixa de distribuição pode ser deduzida como:

GC-AgNP < GC-Cur-AgNP (Tabela 2).

Tabela 2. Tamanho médio (nm) e PDI das amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e para as amostras de nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina, por DLS.

Nanopartícula	Mês	Tamanho Médio ¹ (nm)	PDI ¹
GC-AgNP	0	$135,2 \pm 65,9$	$0,24 \pm 0,02$
GC-AgNP	8	$127,78 \pm 78,45$	$0,38 \pm 0,61$
GC-Cur-AgNP	0	$175,1 \pm 40,4$	$0,05 \pm 0,37$
GC-Cur-AgNP	8	$128,5 \pm 30,5$	$0,06 \pm 0,24$

¹ Dados obtidos por Espalhamento de Luz Dinâmico (DLS)

Esses resultados mostram que o processo de síntese utilizando apenas da goma do cajueiro apresenta menor agregação das partículas no meio. É um resultado esperado, visto se tratar de compostos orgânicos, de forma que a adição da curcumina aumenta a quantidade de macromoléculas no meio. Em relação ao índice de polidispersividade, a amostras de nanopartículas de curcumina apresentaram um PDI mais baixo comparado com as nanopartículas de goma de caju, indicando uma distribuição de tamanho semelhante entre as partículas, de forma que é possível que a estabilização da curcumina no meio deixou o meio mais homogêneo, apesar de influenciar no tamanho médio das partículas. Os resultados de medições após 8 meses de sintetização sugerem uma aglomeração das partículas do meio e uma degradação da polimerização da goma do cajueiro.

No estudo de Stati *et al.* (2022), a síntese das nanopartículas de prata estabilizadas com curcumina (Cur-AgNPs) incluiu um passo fundamental de diálise, que purificou a formulação, além de garantir a preservação das características físicas da curcumina. Os resultados mostraram um diâmetro hidrodinâmico médio de $53,0 \pm 4,0$ nm antes da diálise e $55,3 \pm 4,7$ nm após o processo. Após a diálise, o pH foi ajustado e as nanopartículas foram transferidas para uma solução tampão, que ajudou a garantir a estabilidade das Cur-AgNPs em um ambiente mais biocompatível. Além da preservação do tamanho das nanopartículas, a diálise resultou na remoção da curcumina não reagida, evidenciada pela mudança na cor da dispersão de Cur-AgNPs. Antes da diálise, a dispersão apresentava uma coloração marrom-amarelada, enquanto após o processo, a cor foi atenuada para um tom marrom claro. Essa mudança, juntamente com a eficiência de recuperação das nanopartículas de 70%, indica a eficácia do processo (STATI; ROSSI; TRAKOOLWILAIWAN; TUNG *et*

al., 2022). Este estudo indica que a formulação com curcumina tem potencial para ser aprimorada utilizando técnicas de controle de pH, diálise, sonificação, entre outros (ALDAKHEEL; MOHSEN; SAYED; FAGIR *et al.*, 2023).

4.7. Revelação das Impressões Digitais Latentes

A revelação de impressões digitais em superfícies porosas é um processo complexo devido à tendência de absorção dos componentes das impressões pelos poros do material, o que dificulta a recuperação visual das marcas. Além disso, métodos tradicionais como a aplicação de ninidrina, embora amplamente utilizados, possuem desvantagens, incluindo a formação de coloração de fundo, o alto custo e a toxicidade dos reagentes (BARROS, R. M.; FARIA, B. E. F.; KUCKELHAUS, S. A. S., 2013). Esse estudo demonstra o potencial das AgNPs estabilizadas com goma de caju e com curcumina como uma alternativa eficaz e acessível para a revelação de impressões digitais latentes (IDLs) em superfícies porosas. As IDLs são compostas por uma mistura complexa de secreções das glândulas sudoríparas e sebáceas, contendo água, aminoácidos, proteínas, sais minerais, ácidos graxos, gliceróis, colesterol e ésteres de colesterol (ALMOG; CANTU; CHAMPOD; KENT *et al.*, 2014)

As IDLs coletadas pelo doador foram reveladas nos tempos de 0h, 1h, 6h, 12h e 24h após a produção por imersão do papel branco por 30 minutos na amostra a ser testada. Todas as amostras revelaram as IDLs em algum nível de visualização (Figura 17), entretanto, as revelações com maior nível de detalhamento ocorreram nos 0h e 24h após a produção das IDLs (Figura 18). As fotografias das impressões digitais foram modificadas no programa Photoshop CS5® apenas nos quesitos brilho e contraste, para melhor visualização dos pontos característicos, de forma que não houve modificação substancial das formas e linhas das impressões digitais (ALMOG; CANTU; CHAMPOD; KENT *et al.*, 2014).

Nota-se que a impressão digital revelada é classificada primariamente no Sistema de Identificação de Vucetich como um verticilo. A classificação primária foi possível em todas as revelações com GC-AgNP e com GC-Cur-AgNP. Observa-se ainda que a revelação com GC-AgNP proporciona uma revelação com linhas mais finas, o que pode ser motivado pelo menor diâmetro das partículas da suspensão, que pode ocasionar uma interação aprimorada com os componentes da impressão digital.

A escolha por produzir IDLs predominantemente sebáceas, compostas por secreções das glândulas sebáceas, que produzem sebo, uma substância oleosa rica em lipídios, se deve

ao fato que grupos hidrofóbicos das AgNPs podem aumentar a interação com os componentes sebáceos, aprimorando a eficiência da revelação, embora a goma de caju, utilizada como estabilizante das AgNPs, possua caráter hidrofilico, o que pode resultar em menor afinidade com os componentes lipídicos das IDLs (BRANDÃO; JESUS; ARAÚJO; CARVALHO *et al.*, 2020). Desta forma, a adição de curcumina, que possui caráter hidrofóbico, pode aprimorar a interação com os componentes lipídicos da impressão digital.

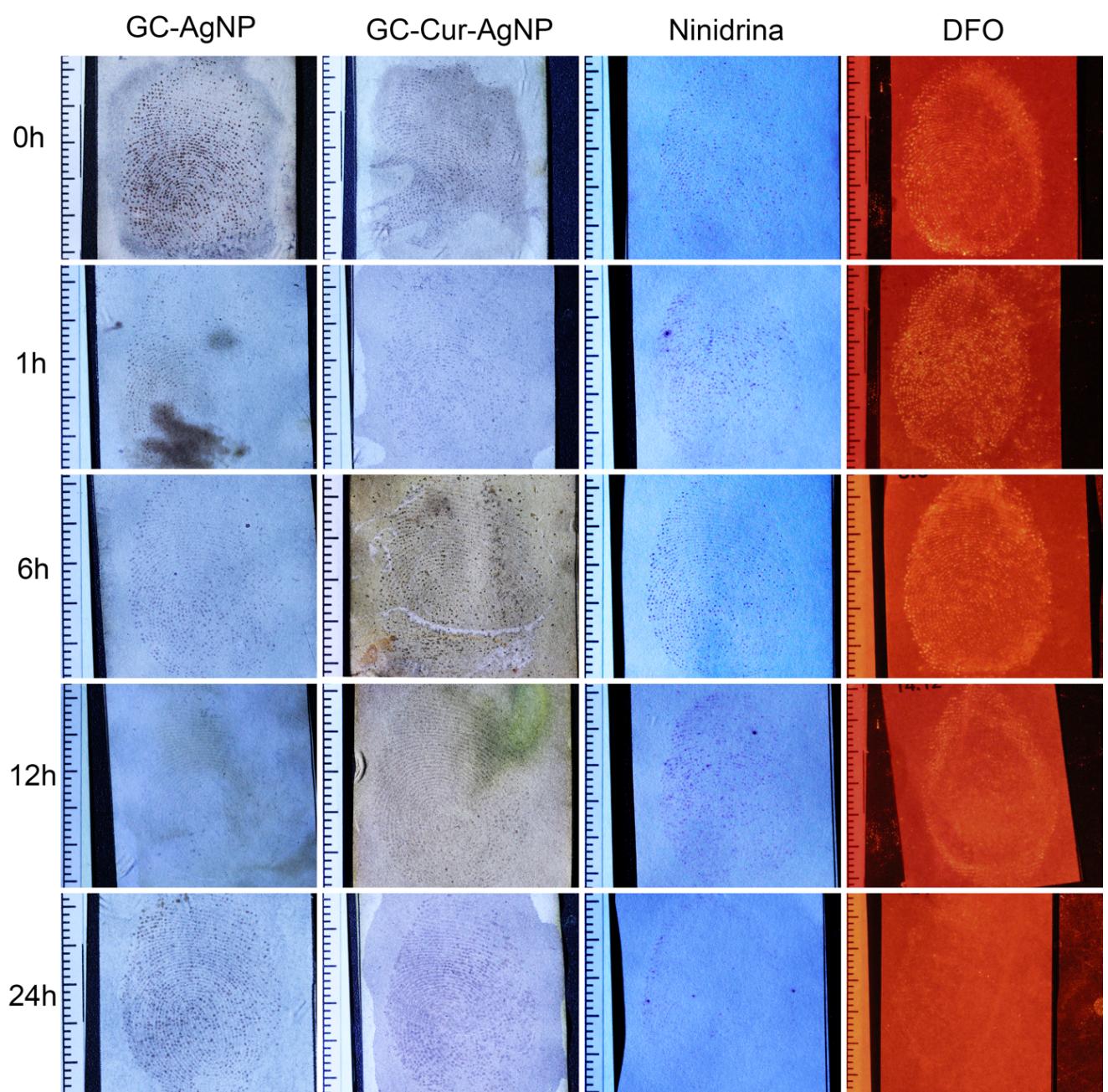


Figura 17. Fotografias da revelação de impressões digitais em papel branco nos tempos 0h, 1h, 6h, 12h e 24h com revelações das nanopartículas de prata com goma do cajueiro, das nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina e do controle positivo de ninidrina e DFO.

Tabela 3. Resultados das revelações de IDLs utilizando as nanopartículas GC-AgNP e GC-Cur-AgNP e o resultado do controle positivo com a Viabilidade de Confronto Papiloscópico.

Tempo	Nanopartículas				Controle positivo			
	GC-AgNP	VC ¹	GC-Cur-AgNP	VC ¹	Ninidrina	VC ¹	DFO	VC ¹
0h	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim	Sim
1h	Sim	-	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim
6h	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim	Sim	Sim
12h	Sim	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-
24h	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-

¹ Viabilidade de Confronto Papiloscópico

Analizando as revelações da Figura 17, evidencia-se o fato de que as nanopartículas GC-Cur-AgNP (que possui componentes hidrofóbicos) interagiram com uma área maior da impressão digital, apesar de produzir linhas com baixa precisão, o que impede a marcação de muitos pontos característicos. Ressalta-se que as linhas que contêm muita interrupção não garantem confiança para determinação de um ponto característico por poder ser confundida com início ou fim de linha.

A Figura 18 indica as marcações dos pontos característicos, onde pode-se observar que a revelação 0h e 24h após a produção das IDLs obtiveram os melhores resultados, com a marcação de 12 pontos com as nanopartículas de GC-AgNP e GC-Cur-AgNP (GALANTE FILHO, 1999).

A Tabela 3 apresenta os dados referentes a revelação e viabilidade de confronto papiloscópico da IDL revelada. Observa-se que a ninidrina foi capaz de revelar as IDLs em todos os tempos analisados, entretanto, apenas no tempo de 6h é possível utilizar a impressão digital em confronto papiloscópico. Esse resultado é justificado pela composição das IDLs, visto que são preferencialmente impressões digitais sebáceas. Todavia, o DFO revelou impressões digitais nos tempos 0h, 1h, 6h e 12h, sendo apenas as primeiras revelações viáveis para confronto papiloscópico.

Destaca-se que as impressões digitais permaneceram visíveis, o que não demanda da celeridade da fotografia. Porém, com o passar do tempo, a coloração de fundo ficou

escurecida, possivelmente pela oxidação da prata.

Uma possível explicação para os resultados observados pode ser fundamentada na interação dinâmica entre esses componentes e os resíduos presentes nas impressões digitais ao longo do tempo. Os componentes das impressões digitais interagem rapidamente com os componentes das nanopartículas. O nitrato de prata reage com essas substâncias e sofre redução para prata metálica, o que resulta na formação de um contraste visível. A goma de caju, por sua vez, contribui para a estabilização e adesão das nanopartículas à superfície da impressão digital, facilitando a revelação imediata. A curcumina apresenta propriedades antioxidantes que podem auxiliar na preservação da integridade das nanopartículas e otimizar a formação da imagem da impressão digital, particularmente no momento imediato após a sua deposição no papel.

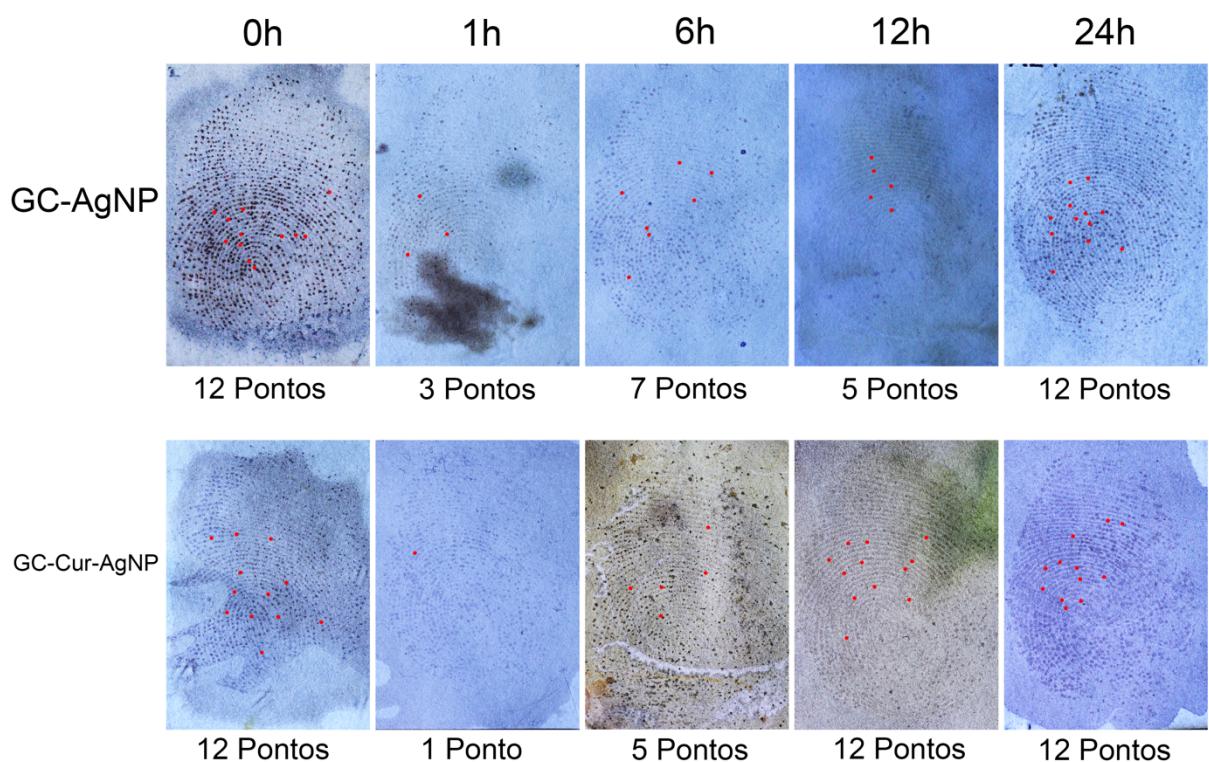


Figura 18. Marcação de pontos característicos nas fotografias digitais das revelações das nanopartículas de prata com goma do cajueiro e das nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina nos tempos 0h, 1h, 6h, 12h e 24h.

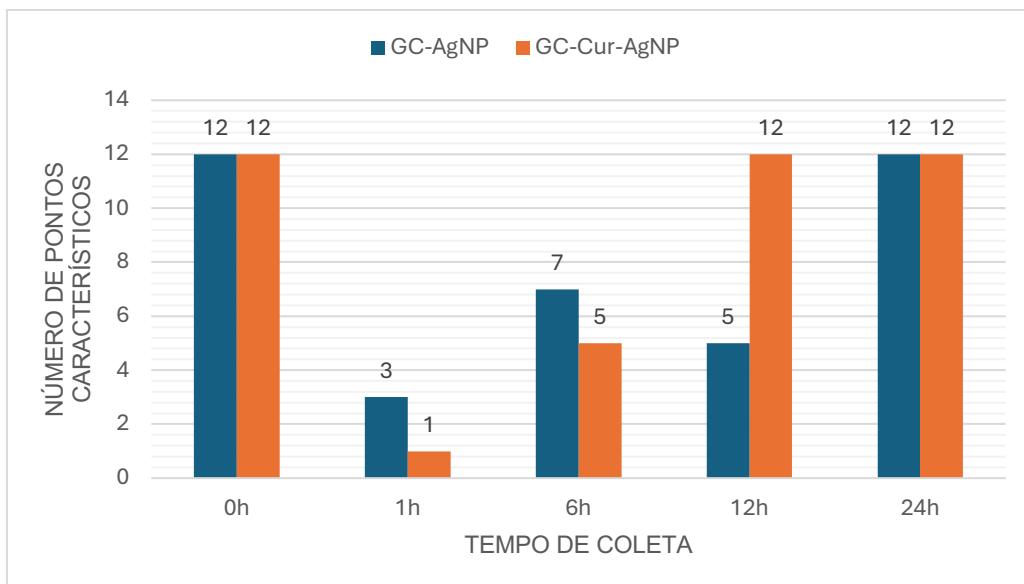


Figura 19. Gráfico representativo da marcação de pontos característicos das revelações de IDLs com GC-AgNP e GC-Cur-AgNP.

Em termos de temporalidade, os resultados sugerem que a qualidade da revelação das impressões digitais foi mais eficaz imediatamente após a sua produção, e também após 24 horas, quando os resíduos presentes na impressão digital ainda eram suficientemente reativos para interagir com as nanopartículas (Figura 19). No entanto, os tempos de 1, 6 e 12 horas não apresentaram resultados tão satisfatórios, o que indica uma diminuição na eficiência do processo de revelação. Isso pode ser explicado pela degradação gradual dos compostos presentes nas impressões digitais ao longo do tempo, como lipídios, proteínas e outros resíduos orgânicos, que se deterioram com a exposição ao ambiente. Essa diminuição nas substâncias reativas pode reduzir a eficácia da interação com as nanopartículas, comprometendo a qualidade da revelação.

Ademais, é possível que, durante os intervalos entre 1 e 12 horas, ocorra uma evaporação parcial dos compostos orgânicos ou uma alteração nas propriedades físicas e químicas da superfície do papel. Essas mudanças podem interferir na formação da imagem das impressões digitais, prejudicando o resultado final da revelação. A interação entre os resíduos das impressões digitais e as nanopartículas é, portanto, altamente dependente de variáveis temporais, ambientais e da composição do papel utilizado.

Para analisar se a fluorescência da curcumina permaneceu após a síntese das nanopartículas, as impressões digitais foram fotografadas utilizando luz ultravioleta (UV) que abrange uma faixa de comprimentos de onda que varia aproximadamente entre 315 e 400 nanômetros (nm) (Figuras 20 e 21).

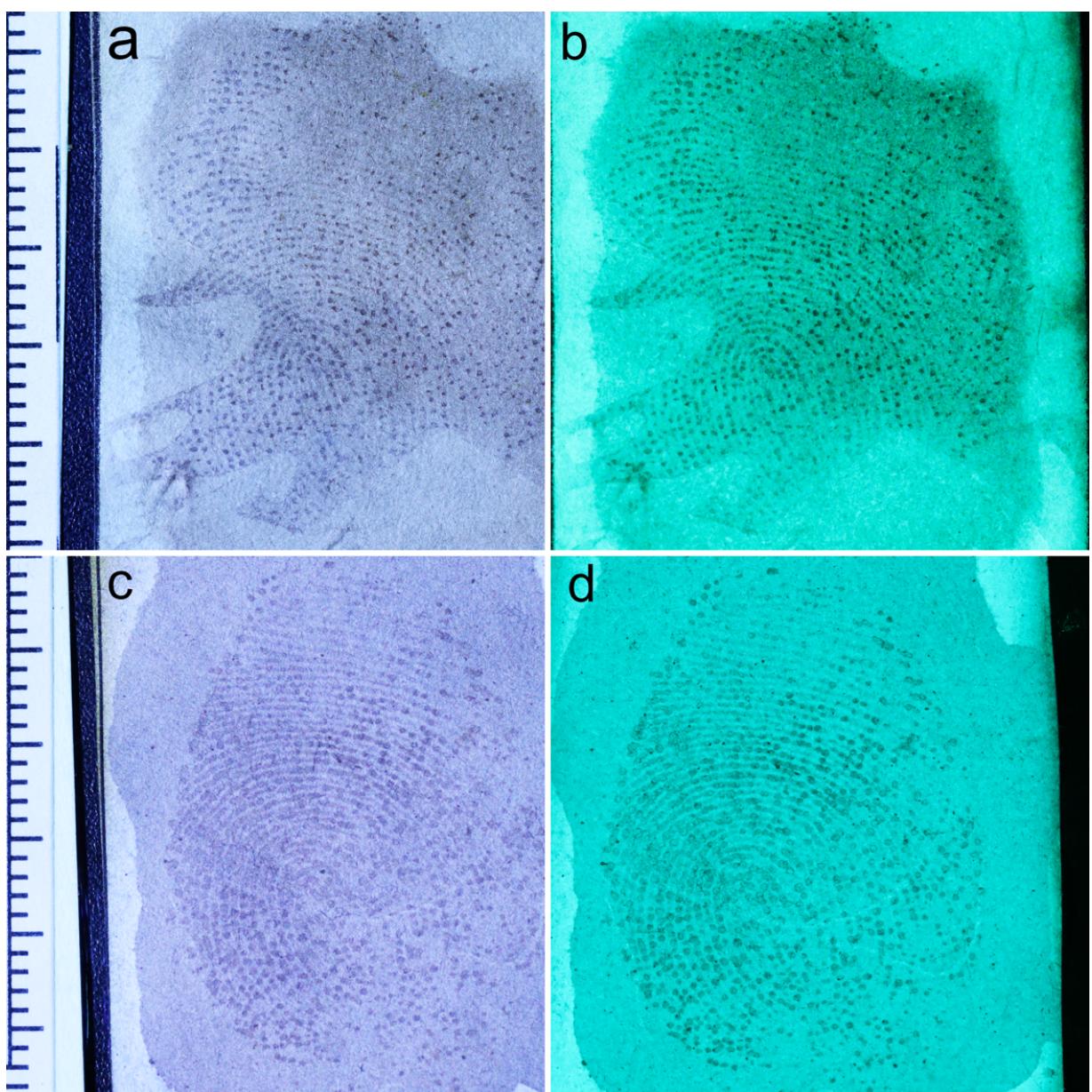


Figura 20. Comparação da fotografia digital das revelações das nanopartículas de prata com goma do cajueiro e curcumina 0h após a produção da IDL (a) e 24h após a produção da IDL (c) com luz branca e luz ultravioleta (b e d).

A formação das GC-Cur-AgNPs resulta na diminuição drástica da fluorescência da curcumina. A espectroscopia de fluorescência demonstra que a curcumina livre possui uma emissão ampla entre 460 e 620 nm, enquanto nas Cur-AgNPs essa emissão desaparece, restando apenas um pico fraco e estreito em 540 nm. As análises de espectroscopia de FTIR e fluorescência sugerem que os anéis aromáticos da curcumina interagem diretamente com o núcleo de prata das AgNPs. Essa interação próxima é apontada como a principal causa do *quenching* da fluorescência da curcumina, que é o processo em que a intensidade da

fluorescência de uma molécula é reduzida, geralmente devido à presença de um agente externo que interfere no processo de emissão de luz. O contato próximo entre os anéis aromáticos da curcumina e a superfície da prata leva à transferência de energia não radiativa, dissipando a energia de excitação da curcumina como calor e suprimindo a emissão de fluorescência (LOO; ROHANIZADEH; YOUNG; TRAINI *et al.*, 2015; STATI; ROSSI; TRAKOOLWILAIWAN; TUNG *et al.*, 2022). Pode-se comprovar que a adição de luz ultravioleta não fluoresceu nas impressões digitais reveladas ao observar as fotografias das revelações com GC-AgNP, que também não evidenciaram as linhas e pontos característicos, de forma que não houve acréscimo de fluorescência nas nanopartículas de GC-Cur-AgNP.

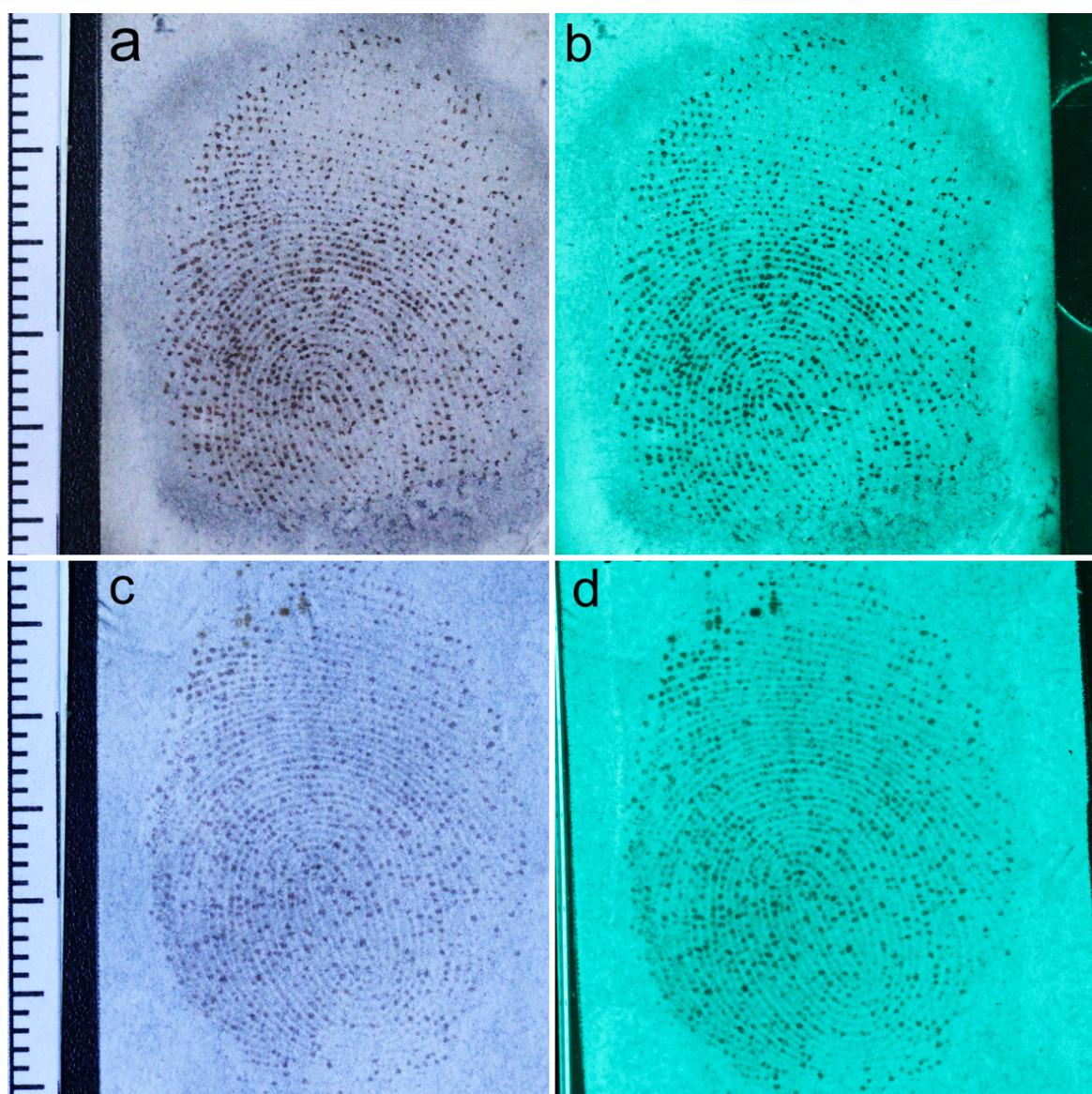


Figura 21. Comparação da fotografia digital das revelações das nanopartículas de prata com goma do cajueiro 0h após a produção da IDL (a) e 24h após a produção da IDL (c) com luz branca e luz ultravioleta (b e d).

5. CONCLUSÃO

Considera-se, após a análise em conjunto dos resultados obtidos que a síntese das nanopartículas de prata utilizando o método de redução por microondas foi eficiente em ambas as nanopartículas. Também pode-se concluir que a síntese de GC-AgNP e GC-Cur-AgNP manteve as principais características físico-químicas da goma do cajueiro e da curcumina.

As nanopartículas de goma do cajueiro e curcumina apresentaram um tamanho maior comparada às nanopartículas de goma do cajueiro como mostrado por DLS, porém com uma maior estabilidade devido ao potencial Zeta, em relação à GC-AgNP.

Os achados computacionais destacam as distintas características vibracionais e propriedades eletrostáticas da goma de cajueiro, fornecendo informações valiosas sobre seu comportamento molecular. A combinação da espectroscopia no infravermelho com o mapeamento do potencial eletrostático sugere que a goma de cajueiro apresenta um alto grau de polaridade, tornando-a particularmente adequada para interações envolvendo ligações de hidrogênio e estabilização eletrostática.

As formulações de nanopartículas sintetizadas foram capazes de revelar IDL em papel branco pelo método de imersão.

Houve perda da capacidade fluorescente da curcumina durante o processo de síntese da GC-Cur-AgNP.

O método de revelação utilizado é simples e o processo de síntese é simples, rápido, de baixo custo e utiliza materiais biocompatíveis e biodegradáveis, o que permite o desenvolvimento de um produto que pode ser utilizado na rotina pericial. Além disso, espera-se que esse material cause menos danos ambientais do que os reagentes usados em técnicas convencionais.

Em síntese, as AgNPs estabilizadas com goma de caju e com curcumina têm o potencial de substituir ou complementar métodos convencionais na revelação de impressões digitais latentes, destacando-se como uma alternativa promissora para futuras aplicações forenses. A continuidade da pesquisa nessa área pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de tecnologias mais seguras e eficientes, beneficiando a prática da ciência forense.

6. LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS

Ressalta-se que a revelação das impressões digitais com as nanopartículas de nitrato de prata, goma de caju e curcumina é um processo dinâmico, no qual as condições de tempo e ambiente desempenham um papel crucial. Para otimizar a qualidade da revelação em intervalos maiores de tempo, seria necessário investigar alternativas que possibilitem a estabilização das nanopartículas ou a preservação das características das impressões digitais por mais tempo. Ajustes nas concentrações dos componentes da fórmula, bem como no tempo de aplicação das nanopartículas, poderiam ser estratégias viáveis para melhorar a eficácia do método em diferentes condições temporais.

Outra abordagem necessária para incorporar o estudo e que se deseja instituir é a análise das alterações de pH dos nanocompostos e a melhoria da eficiência tanto na formação de nanopartículas, quanto na revelação de impressões digitais.

Pretende-se verificar a capacidade de revelação de IDLs em outros tipos de superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDAKHEEL, F. M.; MOHSEN, D.; SAYED, M. M. E.; FAGIR, M. H. *et al.* Employing of Curcumin–Silver Nanoparticle-Incorporated Sodium Alginate-Co-Acacia Gum Film Hydrogels for Wound Dressing. **Gels** 2023, Vol. 9, Page 780, 9, n. 10, 2023.
- ALLOUCHE, A.-R. Gabedit—A graphical user interface for computational chemistry softwares. **Journal of Computational Chemistry**, 32, n. 1, p. 174-182, 2011.
- ALMOG, J.; CANTU, A.; CHAMPOD, C.; KENT, T. *et al.* Guidelines for the assessment of fingermark detection techniques International Fingerprint Research Group (IFRG). **Journal of Forensic Identification**, 64, p. 174-197, 01/01 2014.
- ANAND, P.; ET AL. Bioavailability of curcumin: problems and promises. **Molecular Pharmaceutics**, 4, n. 6, p. 807-818, 2007.
- ARAGÃO, R. F. Vestígio Material e Imprecisão - Criminalística Estática, Dinâmica e Pósmoderna, 2006, IV SEMINÁRIO BRASILEIRO DE BALÍSTICA FORENSE E PERÍCIAS DE CRIMES CONTRA A VIDA.
- ARARUNA, F. B. Green Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Reduced and Stabilized by Cashew Tree Gum. **Advanced Science, Engineering and Medicine**, 5, n. 8, p. 890-893, 2013.
- ARARUNA, F. B.; OLIVEIRA, T. M. D.; QUELEMES, P. V.; NOBRE, A. R. D. A. *et al.* Antibacterial application of natural and carboxymethylated cashew gum-based silver nanoparticles produced by microwave-assisted synthesis. **Carbohydrate polymers**, 241, p. 115260, 2020.
- ARARUNA, F. B.; QUELEMES, P. V.; FARIA, B. E. F. D.; KUCKELHAUS, S. A. S. *et al.* Green Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Reduced and Stabilized by Cashew Tree Gum. **Advanced Science, Engineering and Medicine**, 5, n. 8, 2013.
- ARCHER, N. E.; CHARLES, Y.; ELLIOTT, J. A.; JICKELLS, S. Changes in the lipid composition of latent fingerprint residue with time after deposition on a surface. **Forensic science international**, 154, n. 2-3, 2005.
- ASHBAUGH, D. R. **Quantitative-Qualitative Friction Ridge Analysis.** 1999. 9780367778736.
- ASSUMPÇÃO, P. S. D. S. L. D. **Detecção de pontos característicos em um datilograma.** 2014. -, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- BARBOSA, E. A.; PLÁCIDO, A.; MOREIRA, D. C.; ALBUQUERQUE, L. *et al.* The peptide secreted at the water to land transition in a model amphibian has antioxidant effects. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, 288, n. 1962, p. 20211531, 2021.

BARROS, R. M.; FARIA, B. E. F.; KUCKELHAUS, S. A. S. Morphometry of latent palmprints as a function of time. **Science & justice : journal of the Forensic Science Society**, 53, n. 4, 2013.

BARROS, R. M.; FARIA, B. E. F.; KUCKELHAUS, S. A. S. Morphometry of latent palmprints as a function of time. **Science and Justice**, 53, n. 4, p. 402-408, 2013.

BARROS, R. M.; OLIVEIRA NETO, O. S.; BARBOSA, R. R. M.; TONIETTO, A. *et al.* Using a large-scale cyanoacrylate fuming chamber for latent fingermark detection in vehicles. **Australian Journal of Forensic Sciences**, 55, n. 5, p. 645-655, 2023/09/03 2023.

BATAGIN-NETO, A.; OLIVEIRA, E. F.; GRAEFF, C. F. O.; LAVARDA, F. C. Modelling polymers with side chains: MEH-PPV and P3HT. **Molecular Simulation**, 39, n. 4, p. 309-321, 2013/04/01 2013.

BÉCUE, A.; MORET, S.; CHAMPOD, C.; MARGOT, P. Use of stains to detect fingermarks. **Biotechnic & histochemistry : official publication of the Biological Stain Commission**, 86, n. 3, p. 140-160, 2011.

BRANDÃO, M. D. S.; JESUS, J. R.; ARAÚJO, A. R. D.; CARVALHO, J. G. D. *et al.* Acetylated cashew-gum-based silver nanoparticles for the development of latent fingerprints on porous surfaces. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, 14, 2020.

BRASIL. Código de Processo Penal. Rio de Janeiro, pp.

BRASIL. Habeas Corpus 221838 AgR. pp.

CAGLIARI, J. F. Prova no Processo Penal. **Revista Justitia**, 195, p. 78-100, 2001.

CAPLAN, R. M. How fingerprints came into use for personal identification. **Journal of the American Academy of Dermatology**, 23, n. 1, p. 109-114, 1990.

CARUSO, F. **Colloids and Colloid Assemblies: Synthesis, Modification, Organization and Utilization of Colloid Particles**. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2004.

CHOI, M. J. Preparation and evaluation of metal nanopowders for the detection of fingermarks on nonporous surfaces. **Journal of Forensic Identification**, 56, n. 5, p. 756-768, 2006.

COMMITTEE, I. S. Guidelines for the Assessment of Fingermark Detection Techniques. **Journal of Forensic Identification**, 2014.

CROXTON, R. S.; BARON, M. G.; BUTLER, D.; KENT, T. *et al.* Variation in amino acid and lipid composition of latent fingerprints. **Forensic Science International**, 199, n. 1-3, 2010.

CUMMINS, H. The topographic history of the volar pads (walking pads; Tastballen) in the human embryo / by Harold Cummins. 1929.

DIAS, S. F. L.; NOGUEIRA, S. S.; DOURADO, F. D. F.; GUIMARÃES, M. A. *et al.* Acetylated cashew gum-based nanoparticles for transdermal delivery of diclofenac diethyl amine. **Carbohydrate Polymers**, 143, 2016.

DOS SANTOS, R. C.; OMBREDANE, A. S.; SOUZA, J. M. T.; VASCONCELOS, A. G. *et al.* Lycopene-rich extract from red guava (*Psidium guajava* L.) displays cytotoxic effect against human breast adenocarcinoma cell line MCF-7 via an apoptotic-like pathway. **Food Research International**, 105, p. 184-196, 2018/03/01/ 2018.

DURAZZO, A.; LUCARINI, M. A current shot and re-thinking of antioxidant research strategy. **Braz. J. Anal. Chem.**, 5, p. 9-11, 2018.

EBAID, H.; HABILA, M.; HASSAN, I.; AL-TAMIMI, J. *et al.* Curcumin-containing Silver Nanoparticles Prevent Carbon Tetrachloride- induced Hepatotoxicity in Mice. **Combinatorial chemistry & high throughput screening**, 24, n. 10, 2021.

FARIA, B. E. F. D. **Produção e Caracterização de Nanopartículas de Prata Estabilizadas com Polissacarídeos da Goma do Cajueiro : Perspectivas na Papiloscopia Forense**. 2016. -, Universidade de Brasília.

FIGINI, A. R. L. **Identificação Humana**. Campinas: Millennium Editora, 2003.

FRISCH, M. J.; TRUCKS, G. W.; SCHLEGEL, H. B.; SCUSERIA, G. E. *et al.* **Gaussian 09, Revision B.01**. Wallingford: Gaussian Inc., 2010.

GALANTE FILHO, H. **Identificação humana**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1999.

GALTON, F. **Finger Prints**. London: Macmillan: 1892.

GIORDANO, A.; TOMMONARO, G. Curcumin and Cancer. **Nutrients**, 11, n. 10, p. 2376, 2019.

GOODWIN, J. W. **Colloids and interfaces with surfactants and polymers**. Cornwall-UK: John Wiley & Sons Ltd, 2009.

HC: 731837. 2022.

HEWLINGS, S. J.; KALMAN, D. S. Curcumin: A Review of Its Effects on Human Health. **Foods**, 6, n. 10, Oct 22 2017.

JURENKA, J. S. Anti-inflammatory properties of curcumin, a major constituent of Curcuma longa: a review of preclinical and clinical research. **Altern Med Rev**, 14, n. 2, p. 141-153, Jun 2009.

KARAN, T.; ERENLER, R.; BOZER, B. M.; KARAN, T. *et al.* Synthesis and characterization of silver nanoparticles using curcumin: cytotoxic, apoptotic, and necrotic effects on various cell lines. **Zeitschrift für Naturforschung C**, 77, n. 7-8, 2022.

KIM, S.; CHEN, J.; CHENG, T.; GINDULYTE, A. *et al.* PubChem 2025 update. **Nucleic Acids Research**, 53, n. D1, p. D1516-D1525, 2024.

KOHN, W.; SHAM, L. J. Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects. **Physical Review**, 140, n. 4A, p. A1133-A1138, 11/15/ 1965.

KUCKENA, M.; NEWELLA, A. C. Fingerprint formation. **Journal of theoretical biology**, 235, n. 1, 2005.

LAKOWICZ, J. R. **Principles of fluorescence spectroscopy**. New York: Springer Science, 2006.

LEE, C.; YANG, W.; PARR, R. G. Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density. **Physical Review B**, 37, n. 2, p. 785-789, 01/15/ 1988.

LEE, H. C.; RAMOTOWSKI, R.; GAENSSLEN, R. E. **Advances in Fingerprint Technology**. 2001.

LIMA, M. R.; PAULA, H. C. B.; ABREU, F. O. M. S.; SILVA, R. B. C. D. *et al.* Hydrophobization of cashew gum by acetylation mechanism and amphotericin B encapsulation. **International Journal of Biological Macromolecules**, 108, 2018.

LIMA, R. B. D. **Manual de processo penal: volume único**. 2017.

LOO, C.-Y.; ROHANIZADEH, R.; YOUNG, P. M.; TRAINI, D. *et al.* Combination of Silver Nanoparticles and Curcumin Nanoparticles for Enhanced Anti-biofilm Activities. 2015.

MADRIGAL, A. G. **Investigação criminal constitucional: conceito, classificação e sua tríplice função**. JusBrasil, 2017. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/artigos/investigacao-criminal-constitucional-conceito-classificacao-e-sua-triplice-funcao/481542722>. Acesso em: 19/05/2024.

MASSIMINO, L. C. **Nanopartículas de curcumina: Obtenção e caracterização**. 2016. -.

MCROBERTS, A. **The Fingerprint Sourcebook**. NIJ Journal: National Institute of Justice, 2011. 422 p.

MOHAMMADI-SAMANI, S.; BAHRI-NAJAFI, R.; YOUSEFI, G. Formulation and in vitro evaluation of prednisolone buccoadhesive tablets. **II Farmaco**, 60, n. 4, p. 339-344, 2005.

MOL – HISTOLOGIA INTERATIVA ONLINE. <https://mol.icb.usp.br/index.php/15-4-pele/>, 2017. Acesso em: 02/06/2024.

MONG, G.; PETERSEN, C.; CLAUSS, T. Advanced Fingerprint Analysis Project Fingerprint Constituents. 1999.

MORET, S.; BECUE, A.; CHAMPOD, C. Nanoparticles for fingermark detection: an insight into the reaction mechanism. **Nanotechnology**, 25, n. 42, p. 425502, 2014.

NAKSURIYA, O.; OKONOGI, S.; SCHIFFELERS, R.; HENNINK, W. Curcumin nanoformulations: a review of pharmaceutical properties and preclinical studies and clinical data related to cancer treatment - PubMed. **Biomaterials**, 35, n. 10, 2014.

PLÁCIDO, A.; BUENO, J.; BARBOSA, E. A.; MOREIRA, D. C. *et al.* The Antioxidant Peptide Salamandrin-I: First Bioactive Peptide Identified from Skin Secretion of Salamandra Genus (Salamandra salamandra). **Biomolecules**, 10, n. 4, p. 512, 2020.

PLÁCIDO, A.; DO PAIS DO AMARAL, C.; TEIXEIRA, C.; NOGUEIRA, A. *et al.* Neuroprotective effects on microglia and insights into the structure–activity relationship of an antioxidant peptide isolated from Pelophylax perezi. **Journal of Cellular and Molecular Medicine**, 26, n. 10, p. 2793-2807, 2022.

PRABAKARAN, E.; PILLAY, K. Nanomaterials for latent fingerprint detection: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, 12, 2021.

QUELEMES, P. V. Development and antibacterial activity of cashew gum-based silver nanoparticles. **International Journal of Molecular Sciences**, 14, n. 3, p. 4969-4981, 2013.

RIBEIRO, A. J.; SOUZA, F. R. L. D.; BEZERRA, J. M. N. A.; OLIVEIRA, C. *et al.* Gums' based delivery systems: Review on cashew gum and its derivatives. **Carbohydrate polymers**, 147, 2016.

RODRIGUES DE ARAÚJO, A.; ILES, B.; DE MELO NOGUEIRA, K.; DIAS, J. D. N. *et al.* Antifungal and anti-inflammatory potential of eschweilenol C-rich fraction derived from Terminalia fagifolia Mart. **Journal of Ethnopharmacology**, 240, p. 111941, 2019/08/10/2019.

SAMPAIO, N. C. R. **INVESTIGAÇÃO CRIMINAL: atuação suplementar do Ministério Público.** 2014. - Faculdade de Ciências Jurídicas e Sociais, Centro Universitário de Brasília - UniCEUB

SAUNDERS, G., 1989, Pensacola, FL, USA. **Multimetal Deposition Technique for Latent Fingermark Development.**

SHAMELI, K.; AHMAD, M. B.; ZAMANIAN, A.; SANGPOUR, P. *et al.* Green biosynthesis of silver nanoparticles using Curcuma longa tuber powder. **International journal of nanomedicine**, 7, 2012.

SILVA, D. A. Synthesis and characterization of cashew gum/acrylic acid nanoparticles. **Materials Science and Engineering**, 29, n. 2, p. 437-441, 2009.

SILVA, D. A. D.; FEITOSA, J. P. A.; PAULA, H. C. B.; PAULA, R. C. M. D. Synthesis and characterization of cashew gum/acrylic acid nanoparticles. **Materials Science and Engineering: C**, 29, n. 2, 2009.

SILVA, L. R. V. **Determinação de Variações Morfométricas em Impressões Digitais de Idosos: Estudo Longitudinal Retrospectivo.** 2015. - Ciências Médicas, Universidade de Brasília.

SOTO-QUINTERO, A.; ET AL. Curcumin to Promote the Synthesis of Silver NPs and their Self-Assembly with a Thermoresponsive Polymer in Core-Shell Nanohybrids. **Scientific Reports**, 9, n. 1, p. 18187, 2019.

SOUTO, E. B.; ET AL. Nanopharmaceutics: Part I—Clinical Trials Legislation and Good Manufacturing Practices (GMP) of Nanotherapeutics in the EU. **Pharmaceutics**, 12, n. 2, p. 146, 2020a.

SOUTO, E. B.; ET AL. Nanopharmaceutics: Part II-Production Scales and Clinically Compliant Production Methods. **Nanomaterials (Basel)**, 10, n. 3, 2020b.

STATI, G.; ROSSI, F.; TRAKOOLWILAIWAN, T.; TUNG, L. D. *et al.* Development and Characterization of Curcumin-Silver Nanoparticles as a Promising Formulation to Test on Human Pterygium-Derived Keratinocytes. **Molecules** 2022, Vol. 27, Page 282, 27, n. 1, 2022.

STEWART, J. J. P. MOPAC: A semiempirical molecular orbital program. **Journal of Computer-Aided Molecular Design**, 4, n. 1, p. 1-103, 1990/03/01 1990.

TALODTHAISONG, C.; BOONTA, W.; THAMMAWITHAN, S.; PATRAMANON, R. *et al.* Composite guar gum-silver nanoparticle hydrogels as self-healing, injectable, and antibacterial biomaterials. **Materials Today Communications**, 24, 2020.

TOLEDO, E. M. **Estudo das propriedades estruturais da curcumina no vácuo usando dinâmica molecular de Car-parrinello**. 2013. 94 f. (Dissertação (Mestrado em Ciências Moleculares)) -, Universidade Estadual de Goiás.

TSAI, Y. M. Curcumin and its nano-formulation: the kinetics of tissue distribution and blood-brain barrier penetration. **International Journal of Pharmaceutics**, 416, p. 331-338, 2011.

VIANA, A. V.; VIANA, D. D. S. F.; FIGUEIRêDO, G. S. D.; BRITO, J. E. D. *et al.* Green synthesis and characterization of silver nanoparticles in curcumin and cashew extract (*Anacardium occidentale*). **Research, Society and Development**, 10, n. 6, 2021.

YAN, F.-S.; SUN, J.-L.; XIE, W.-H.; SHEN, L. *et al.* Neuroprotective Effects and Mechanisms of Curcumin–Cu(II) and –Zn(II) Complexes Systems and Their Pharmacological Implications. **Nutrients**, 10, n. 1, p. 28, 2018.

YEUNG, A. W. K.; ET AL. Big impact of nanoparticles: analysis of the most cited nanopharmaceuticals and nanonutraceuticals research. **Current Research in Biotechnology**, 2, p. 53-63, 2020.

ZIELINSKA, A.; ET AL. Properties, Extraction Methods, and Delivery Systems for Curcumin as a Natural Source of Beneficial Health Effects. **Medicina (Kaunas)**, 56, n. 7, 2020.

APÊNDICE A - ANÁLISE COMPUTACIONAL

A análise computacional foi realizada em colaboração com o Instituto Federal de São Paulo – IFSP. Uma abordagem QM/MM foi empregada para determinar a estrutura mais estável da goma de caju (GC), modelada como um sistema simplificado composto por 10 unidades de D-galactose (213 átomos). Dada a alta flexibilidade conformacional da GC, uma busca conformacional foi realizada utilizando o módulo de mecânica molecular no GABEDIT (ALLOUCHE, 2011), resultando em 10 estruturas distintas (BATAGIN-NETO; OLIVEIRA; GRAEFF; LAVARDA, 2013). Essas conformações foram subsequentemente pré-otimizadas no nível semiempírico PM6 usando o MOPAC (STEWART, 1990), e a estrutura de menor energia foi selecionada para posterior refinamento via teoria do funcional da densidade de Kohn-Sham (DFT) (KOHN; SHAM, 1965).

A estrutura inicial da molécula de curcumina foi obtida do banco de dados PubChem (KIM; CHEN; CHENG; GINDULYTE *et al.*, 2024) e otimizada diretamente via DFT. Todos os cálculos DFT foram realizados usando o pacote computacional Gaussian 16 (FRISCH; TRUCKS; SCHLEGEL; SCUSERIA *et al.*, 2010), empregando o funcional B3LYP (LEE; YANG; PARR, 1988) com correções de dispersão GD3 e o conjunto de base 6-31G (d,p).

As otimizações geométricas foram realizadas no vácuo, assegurando a ausência de frequências negativas na análise de infravermelho (IR). A ausência de frequências imaginárias confirmou que as estruturas otimizadas correspondem a mínimos locais reais na superfície de energia potencial, validando a confiabilidade das propriedades moleculares calculadas. Essa metodologia foi aplicada com sucesso em estudos anteriores (PLÁCIDO; BUENO; BARBOSA; MOREIRA *et al.*, 2020), (PLÁCIDO; DO PAIS DO AMARAL; TEIXEIRA; NOGUEIRA *et al.*, 2022), (BARBOSA; PLÁCIDO; MOREIRA; ALBUQUERQUE *et al.*, 2021), (BRANDÃO; JESUS; ARAÚJO; CARVALHO *et al.*, 2020), (RODRIGUES DE ARAÚJO; ILES; DE MELO NOGUEIRA; DIAS *et al.*, 2019), (DOS SANTOS; OMBREDANE; SOUZA; VASCONCELOS *et al.*, 2018). Além da análise vibracional, a distribuição de carga eletrostática da GC foi examinada através de um mapa de Potencial Eletrostático Molecular (MEP), fornecendo insights sobre a localização da carga e seu papel nas interações moleculares, incluindo ligações de hidrogênio e estabilização eletrostática.

APÊNDICE B - ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

As referências utilizadas neste artigo foram selecionadas através de uma busca sistematizada na base Periódicos - CAPES (Acesso CAFé) contendo as principais palavras-chave: "fingerprint", "fingermark", "cashew gum", "curcumin", "green synthesis", "silver nanoparticles" e "nanoparticles".

Para gerenciamento das referências, foi utilizada a ferramenta EndNote 21 - Clarivate®.

De forma que o tema referente às impressões digitais em inglês (*fingerprint*) pode ser confundido com análises de FTIR, desde 2014 o Grupo Internacional de Pesquisa de Impressões Digitais (*International Fingerprint Research Group - IFRG*) determinou que o termo em inglês para se referir às impressões digitais no âmbito da papiloscopia deveria ser tratado como *fingermark* (*COMMITTEE, 2014*).

Para esta análise bibliométrica, foram analisadas 125 publicações. A publicação mais antiga analisada foi *Finger Prints* (Galton, F.) de 1892, visto que é a primeira obra científica sobre o tema da identificação por impressões digitais.

O ano com o maior número de publicações é 2011, com 9 artigos científicos, todos relacionados ao tema de nanotecnologia.

O gráfico da Figura 22 demonstra um padrão crescente de artigos publicados sobre o tema de identificação humana, impressões digitais e suas aplicações modernas, indicando uma crescente relevância do assunto na comunidade acadêmica.

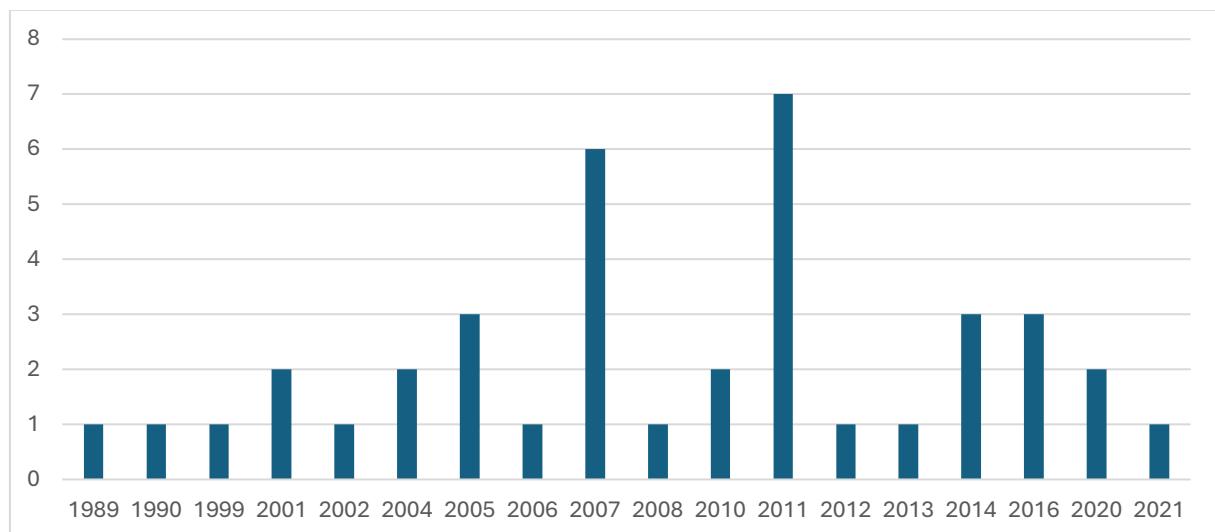


Figura 22. Gráfico do número de publicações por ano na área de identificação humana.

As palavras-chave mais frequentes foram “silver nanoparticles”, “curcumin” e “nanoparticles”. Um mapeamento gráfico feito no VOSViewer® (Figura 23) indica que publicações que contêm a palavra-chave “nanoparticles” estão mais relacionadas com publicações referentes ao tema de impressões digitais e nanopartículas de prata, enquanto publicações que contêm a palavra-chave “curcumin” estão mais relacionadas a “silver nanoparticles”. Por outro lado, publicações que contêm a palavra-chave “cashew gum” e suas variáveis estão em menor densidade.

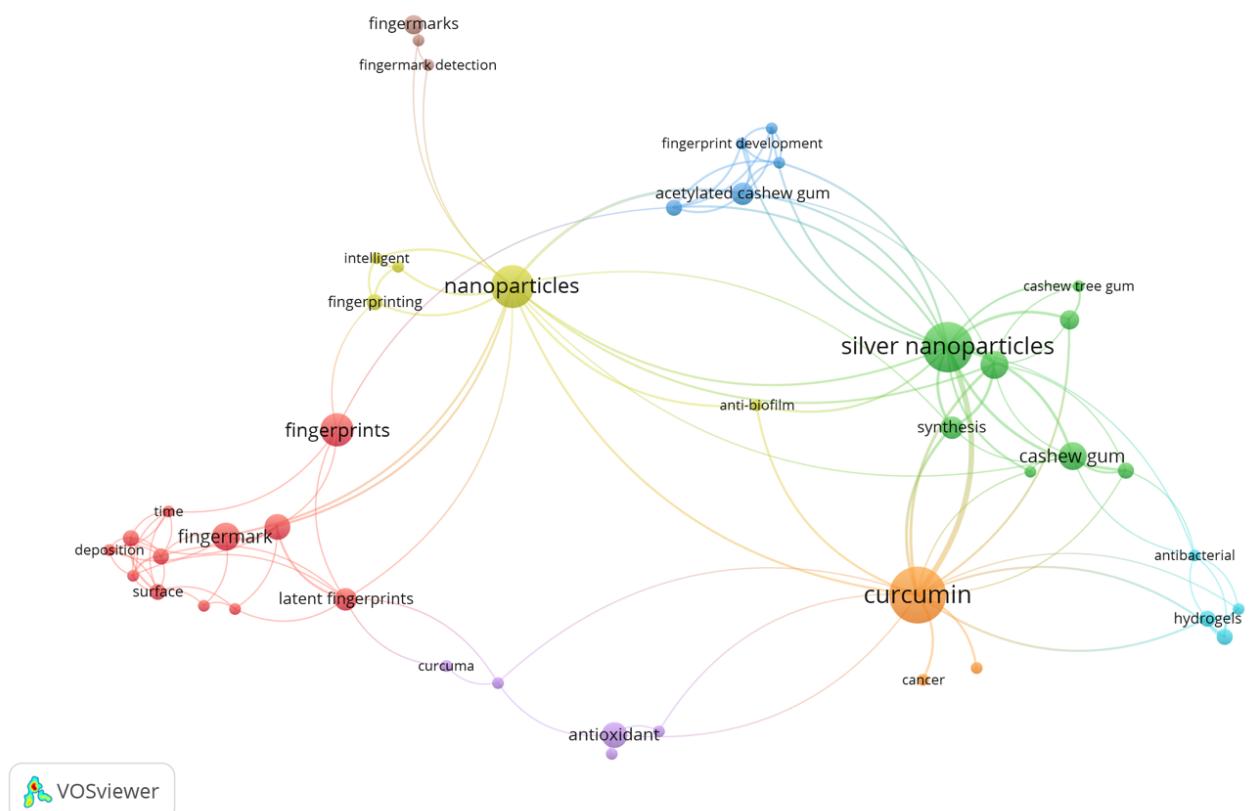


Figura 23. Mapa dos dados bibliográficos. Fonte: VOSViewer.

Desta forma, conclui-se que áreas de pesquisa sobre a Goma do Cajueiro ainda são inovadoras, enquanto é possível localizar um número expressivo de publicações sobre curcumina, um tema mais consolidado. Apesar da crescente relevância de pesquisas referentes à papiloscopia forense, ainda é um tema com poucas publicações relevantes e com um nicho muito reservado.

APÊNDICE C – PRODUÇÃO CIENTÍFICA

ARTIGO COMPLETO PUBLICADO EM REVISTA INDEXADA

BARROS, R. M., OLIVEIRA NETO, O. S., BARBOSA, R. R. M., TONIETTO, A., JACINTHO, C. V. M., DEL SARTO, R. P., & PAULINO, M. A. (2023). Using a large-scale cyanoacrylate fuming chamber for latent fingermark detection in vehicles. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 55(5), 645–655.
<https://doi.org/10.1080/00450618.2022.2057590>

TRABALHOS APRESENTADOS EM EVENTOS CIENTÍFICOS INTERNACIONAIS

BARBOSA, R. R. M.; LEITE, J. R. S. A.. A Nanotecnologia Aplicada na Revelação de Impressões Digitais: Uma Revisão. 2022. *Caderno de Ciências da Saúde e da Vida* (ISSN 2675-6838). IV Simpósio Latino-Americano de Biotecnologia.

BARBOSA, R. R. M.; RIBEIRO, F. O. S.; LONGO; J. P. F.; CARVALHO, D. S.; LEITE, J. R. S. A. Uso de Polímeros Naturais para o Desenvolvimento de Produtos Nanoestruturados com Aplicações em Papiloscopia Forense e Identificação Humana. 2024. **V Encontro Internacional de Inovação em Saúde - V INOVATEC**.

ARTIGO COMPLETO SUBMETIDO EM REVISTA INDEXADA

BARBOSA, R. R. M.; CARDOSO, M.; OLIVEIRA-NETO, D. C.; LIMA, F. C. D. A.; BATAGIN-NETO, A.; SÁ, B. S.; ARCANJO, D. D. R.; DURAZZO, A.; LUCARINI, M.; VASCONCELOS, A. G.; RIBEIRO, F. O. S.; LONGO; J. P. F.; CARVALHO, D. S.; LEITE, J. R. S. A. Green Synthesis of Silver Nanoparticle Composites with Cashew Gum and Curcumin: Development of Nanostructured Products Based on Natural Polymers for Forensic Human Identification Applications. *Journal of Composites Sciences*. Manuscript Number: jcs-3540474



Using a large-scale cyanoacrylate fuming chamber for latent fingermark detection in vehicles

Rodrigo M. Barros, Osmar S. Oliveira Neto, Raissa R. M. Barbosa, Angela Tonietto, Cecília V. M. Jacintho, Rafael P. Del Sarto and Marco A. Paulino

Instituto de Identificação – Departamento de Polícia Técnica, Polícia Civil do Distrito Federal, Brasília, Brazil

ABSTRACT

Latent fingermarks contain precise information about the identities of individuals present at the crime scene. Cyanoacrylate (CA) fuming is a popular and effective technique for fingermark development on non-porous surfaces, but few approaches have been proposed for processing vehicles. We report the use of a large CA fuming chamber for latent fingermark development in vehicles related to serious crimes in Brasília, Brazil. The chamber consists of a fuming compartment with a stainless-steel structure and is supplied with movable heating trays, air circulation fans, humidifying system, gas evacuation system, and an integrated control unit for process monitoring. Processing an entire regular vehicle requires 16 g of liquid CA and ~2 h. Identifiable fingermarks were recognized on the exterior and interior of the examined vehicles, including the door handles and the seat belt metallic tongue. Detected fingermarks were positively matched to individuals whose involvement in criminal activities was confirmed. The results support the efficiency of the CA fuming technique for fingermark development in the interior and exterior of vehicles and indicate certain parts of vehicles as being of potential interest. Considering the efficiency of the CA polymerization reaction for fingermark development in vehicles involved in crimes, large-scale chambers may offer important advantages.

ARTICLE HISTORY

Received 21 January 2022

Accepted 20 March 2022

KEYWORDS

Fingerprint evidence;
fingermark detection;
cyanoacrylate; chamber;
vehicle; murder

1. Introduction

Research groups in the fingerprint domain have been dedicated to improving the chances of developing and recording potentially identifiable fingermarks in any given situation¹. Given the distinct scenarios faced in forensic routines, the efficiency of a fingermark detection laboratory relies on the ability to properly employ a variety of techniques and reagents. Optical, physical or chemical methods may be used solely or in combination on items of interest, so that different techniques are recommended according to the surface characteristics, such as porosity, colour, and general conditions^{2–4}. The quantity and quality of friction ridge detail developed are crucial factors to achieve the identification of potential suspects.

Cyanoacrylate (CA) resin, also known as 'superglue', was developed in the 1950s for the aircraft industry, but only in the early 1980s CA fuming was described as a chemical method for the development of latent fingermarks⁵. The commercially available CA