

Materiais Inovadores Aplicados a Revelação de Impressões Digitais Latentes: uma prospecção tecnológica no contexto mundial das ciências forenses

Innovative Materials Applied to the Development of Latent Fingerprints: a technological prospection in the world context of forensic sciences

Jeane Caroline da Silva Melo¹

Adriano Ananias da Silva¹

Adriana Santos Ribeiro¹

Josealdo Tonholo¹

¹Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brasil

Resumo

As nanopartículas e os polímeros conjugados se destacam como materiais inovadores na revelação de impressões digitais latentes. A pesquisa em torno desses novos materiais busca contornar os principais desafios enfrentados pelos protocolos convencionais. Assim, bases de dados de patentes e artigos foram utilizadas buscando relacionar a Ciência Forense ao uso de nanopartículas e de polímeros conjugados aplicados na revelação de impressões digitais, no intuito de apresentar um panorama atual das pesquisas desenvolvidas nessa área. Foram observados o crescimento das pesquisas nas últimas décadas, o desenvolvimento de novos materiais e metodologias, os principais países desenvolvedores desse conhecimento, assim como os principais campos tecnológicos envolvidos nessas pesquisas. A análise desses dados pode indicar quais materiais apresentam um maior potencial, como *carbon dots*, *quantum dots*, nanomateriais terras raras, polipirrol e poli(3,4-etilenodioxitiofeno), nos quais se concentram as pesquisas e em que grau de maturidade elas se encontram, auxiliando os pesquisadores no desenvolvimento de novas metodologias.

Palavras-chave: Impressões Digitais. Nanopartículas. Polímeros Conjugados.

Abstract

Nanoparticles and conjugated polymers stand out as innovative materials in developing latent fingerprints. Research around these new materials seeks to contour the challenges in the main challenges faced by conventional protocols. Thus, databases of patents and articles were used to relate Forensic Science to the use of nanoparticles and conjugated polymers applied to the development of fingerprints, to present a current overview of the research carried out in this area. The growth of research in recent decades, the development of new materials and methodologies, the main countries developing this knowledge, as well as the main technological fields involved in these researches were observed. The analysis of these data may indicate which materials have greater potential, such as carbon dots, quantum dots, rare earth nanomaterials, polypyrrole and poly(3,4-ethylenedioxythiophene), on which research is concentrated and at what degree of maturity they are, helping the researcher in the development of new methodologies.

Keywords: Fingerprints. Nanoparticles. Conjugated Polymers.

Área Tecnológica: Ciências Forenses. Propriedade Intelectual. Inovação.



1 Introdução

As ciências forenses têm apresentado uma evolução constante no que diz respeito à pesquisa científica e ao desenvolvimento de novas técnicas ou melhoramento daquelas já existentes, no sentido de inovar cada vez mais o processamento de evidências que possibilitam a identificação mais direta de criminosos por meio de investigações conduzidas em cenas de crime. Trata-se de uma área multidisciplinar, uma vez que abrange vários campos de investigação como balística, documentoscopia, cibernética, som e imagem, análises de caligrafia, genética e biometria. Esta última ganhou intensa relevância e aceitação em todo o mundo, por permitir identificar e autenticar um indivíduo com precisão, por meio de análises de características fisiológicas e comportamentais, como impressão digital, geometria da mão, rosto, voz, íris etc. (PRABAKARAN; PILLAY, 2021; SAINI; KAPOOR, 2016; SIMGLA; KAUR; SOFAT, 2020).

Com o avanço nas tecnologias e metodologias de análises biométricas, o reconhecimento de impressões digitais se tornou o campo mais investigado e amadurecido da autenticação biométrica, uma vez que a impressão digital de um indivíduo oferece um reconhecimento pessoal concludente e comparativamente fácil. O conjunto de impressões digitais de cada ser humano é único e o acompanham por toda a vida, desde a gestação, sem que apresente mudanças significativas em suas características (CADD *et al.*, 2015; SIMGLA; KAUR; SOFAT, 2020). Assim, as impressões digitais são largamente utilizadas como meio de identificação em ciências forenses, se tornando uma das principais ferramentas utilizadas para esse fim e sendo amplamente aceita em todo o mundo (CROXTON *et al.*, 2010; SIMGLA; KAUR; SOFAT, 2020).

Fisicamente, entende-se por impressão digital a marca que é deixada em determinada superfície em decorrência do contato do(s) dedo(s) do indivíduo, em que ocorre a transferência de resíduos e secreções presentes na pele para a superfície (HUYUNH; HALÁMEK, 2016; SIMGLA; KAUR; SOFAT, 2020). Essas impressões podem ser visíveis ou latentes. As impressões digitais denominadas visíveis deixam padrões com contrastes perceptíveis a olho nu das papilas dos dedos e são obtidas quando estes estão contaminados por outras substâncias externas, como tintas ou sangue, ou quando ficam impressas em substratos macios como sabonetes, argilas, massa de modelar, ceras etc. Por outro lado, algumas impressões digitais encontram-se “escondidas”, denominadas latentes, ou seja, não são perceptíveis a olho nu e consistem, em grande parte, de secreções naturais da pele. De forma que esse tipo de impressão digital, para que possa ser analisada, necessita da aplicação de técnicas de revelação para que se tornem visíveis (BALSAN *et al.*, 2019; BLEAY; PUIT, 2018; KASPER, 2016).

Nesse contexto, vários métodos físicos e químicos são empregados na revelação de uma impressão digital latente, melhorando suficientemente sua visibilidade para possibilitar sua análise (SAPSTEAD; CORDEN; HILLMAN, 2015). A escolha da técnica para a revelação da impressão digital depende de vários fatores, como a composição do resíduo, o tipo de superfície no qual a impressão está presente, a condição na qual a impressão se encontra e do potencial da técnica que será aplicada para tratar essa evidência (BERRY; STONEY, 2001). Os métodos mais empregados na revelação de impressões digitais latentes em uma variedade de superfícies incluem a aplicação de uma grande variedade de pós, que podem ser coloridos, luminescentes, magnéticos ou termoplásticos; cianoacrilato fumegante; corantes fluorescentes; ninidrina e solução de nitrato de prata (SODHI; KAUR, 2001; GIRELLI *et al.*, 2015). Apesar dos bons resultados obtidos com esses métodos tradicionais, alguns problemas ainda dificultam sua aplicação de

forma geral, entre eles a baixa sensibilidade e seletividade do método, interferências no resíduo da impressão digital e a alta toxicidade dos reagentes. Esses problemas podem resultar em perdas nos detalhes da imagem revelada, desfavorecendo o contraste entre a superfície e a impressão digital (PRASAD *et al.*, 2019). Dessa forma, novas metodologias estão sendo desenvolvidas no sentido de remediar esses problemas. Nos últimos anos, a aplicação de nanopartículas (NPs) e de macromoléculas de polímeros conjugados tem ganhado destaque na pesquisa por novos reveladores de impressões digitais latentes.

Os avanços na nanociência e nanotecnologia resultaram no aumento do interesse na pesquisa da aplicação de NPs para revelação de impressões digitais, devido ao pequeno tamanho e à homogeneidade dessas partículas que, conseqüentemente, favorecem o processo de revelação (ABEBE *et al.*, 2020; KANODARWALA *et al.*, 2019). Nesse sentido, as NPs fluorescentes (WANG *et al.*, 2017), *carbon dots* (CDs) e *quantum dots* (QDs) (COSTA, B. *et al.*, 2020), nanopartículas metálicas (SONG; YANG, 2012), nanocompósitos (WEI; CUI, 2021), nanopós de óxidos metálicos (LEE *et al.*, 2020), e as nanopartículas de materiais terras raras (*upconversion nanoparticles*) (KANODARWALA *et al.*, 2021) constituem uma abordagem de grande interesse na revelação de impressões digitais latentes, apresentando resultados muito promissores.

Considerando a necessidade de se aprimorar técnicas para revelar impressões digitais latentes de boa qualidade em metais, especialmente em estojos de cartuchos de munição, a eletrodeposição de polímeros conjugados se destaca por ser um método fácil, rápido, eficaz e de baixo custo. Os resultados obtidos mostram que os polímeros conjugados como polipirrol (PPy), polianilina (PAni) e poli 3,4-etilenodioxitiofeno (PEDOT) apresentam grande potencial para realce de impressões digitais latentes em superfícies metálicas de aço inoxidável ou estojos de munição (latão) (BERSELLINI *et al.*, 2001; BROWN; HILLMAN, 2012; COSTA *et al.*, 2020a). Nesse método, os monômeros poliméricos precursores são eletropolimerizados no metal, na base dos vales formados pelo resíduo da impressão digital, gerando uma imagem em negativo (COSTA, C. *et al.*, 2020; SAPSTEAD; CORDEN; HILLMAN, 2015).

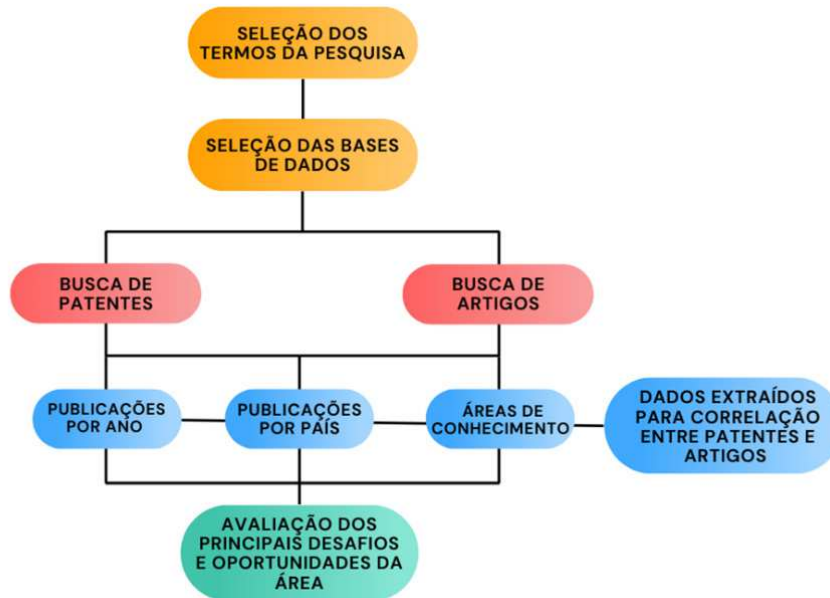
As pesquisas utilizando nanopartículas e macromoléculas de polímeros conjugados demonstram-se como uma área muito promissora, uma vez que vêm apresentando excelentes resultados. Dessa forma, este estudo pretende avaliar o cenário atual das pesquisas acerca desses materiais no processo de revelação de impressões digitais latentes, buscando, dentro do contexto das ciências forenses, compreender quais os principais países e pesquisadores que estão à frente dessas pesquisas e como esse campo vem crescendo no decorrer dos últimos anos, assim como apresentar qual o posicionamento do Brasil nas pesquisas nesta área. Esses dados podem indicar quais materiais apresentam um maior potencial, no qual se concentram as pesquisas e em que grau de maturidade elas se encontram, auxiliando os pesquisadores no desenvolvimento de novas metodologias.

2 Metodologia

Os termos das buscas foram definidos com base nas pesquisas envolvendo as ciências forenses e a utilização de nanopartículas e polímeros conjugados aplicados na revelação de impressões digitais latentes, de forma a obter um retorno significativo de documentos para as áreas analisadas. As buscas foram realizadas em língua inglesa para obter um panorama geral

da situação mundial das pesquisas na área. A Figura 1 apresenta o fluxograma com as etapas da pesquisa. As buscas de patentes foram realizadas nas bases: Patent Inspiration, Escritório Europeu de Patentes (Espacenet), Derwent Innovations Index da Clarivate Analytics, Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO – PATENTSCOPE) e na base Orbit Intelligence® (Questel). A base Scopus foi utilizada para a revisão bibliográfica.

Figura 1 – Fluxograma apresentando as etapas da pesquisa



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2022)

Todas as buscas foram realizadas no campo de pesquisa avançada, selecionando a opção de busca nos títulos e resumos das patentes e artigos científicos. Na base Orbit®, foram realizadas buscas no modo avançado, considerando título e *abstract*. Na Derwent, as pesquisas foram realizadas na função tópico e na WIPO na função da primeira página (*front page*), por possuírem as funções de interesse. As buscas nas plataformas citadas foram realizadas no período de julho e agosto de 2022.

3 Resultados e Discussão

Buscando avaliar a situação mundial das pesquisas envolvendo as ciências forenses e a revelação de impressões digitais latentes, assim como as novas tecnologias/metodologias aplicadas nessa área, foi realizada uma busca em quatro bases de dados para patentes e uma base de dado para artigos. Os termos de busca (palavras-chave) selecionados para compor a pesquisa foram: *Forensic (I)*, *Fingerprint OR Fingermark AND Development OR Enhancement OR Visualization (II)*, *Nanoparticles (III)*, *Nanocomposites (IV)*, *AgNP OR AuNP (V)*, *Carbon Dots (VI)*, *Quantum Dots (VII)*, *Upconverting OR Upconversion Nanoparticles (VIII)*, *Fluorescent Nanoparticles (IX)* e *Conjugated OR Conducting Polymer (X)*. Esses termos foram escolhidos de forma a obter uma relação consistente entre as principais inovações na área (nanopartículas e polímeros conjugados), relacionando esses materiais com a aplicação em processos de revelação de impressões digitais latentes.

Os resultados das buscas por artigos (Tabela 1) na base de dados Scopus demonstram o interesse nas pesquisas na área das ciências forenses (I), nanopartículas em geral (III a IX) e polímeros conjugados (X). A aplicação desses materiais (III a X) nos processos de revelação de impressões digitais ainda é recente e, por isso, a busca desses termos associados à aplicação II (III* a X*) registra uma considerável redução da quantidade de artigos. Por sua vez, o quantitativo de patentes (Tabela 1) da busca nas bases de dados Patent Inspiration, Espacenet, Derwent Innovations e WIPO (Patentscope) demonstram que a proteção intelectual e tecnológica nessas áreas segue a mesma tendência observada no resultado da busca por artigos, porém com um número total relativo de patentes publicadas bastante limitado, indicando que a área ainda tem muito espaço para o desenvolvimento de novas tecnologias e amadurecimento daquelas já existentes.

Tabela 1 – Quantitativo de artigos e de patentes por grupo de palavras-chave empregado na pesquisa

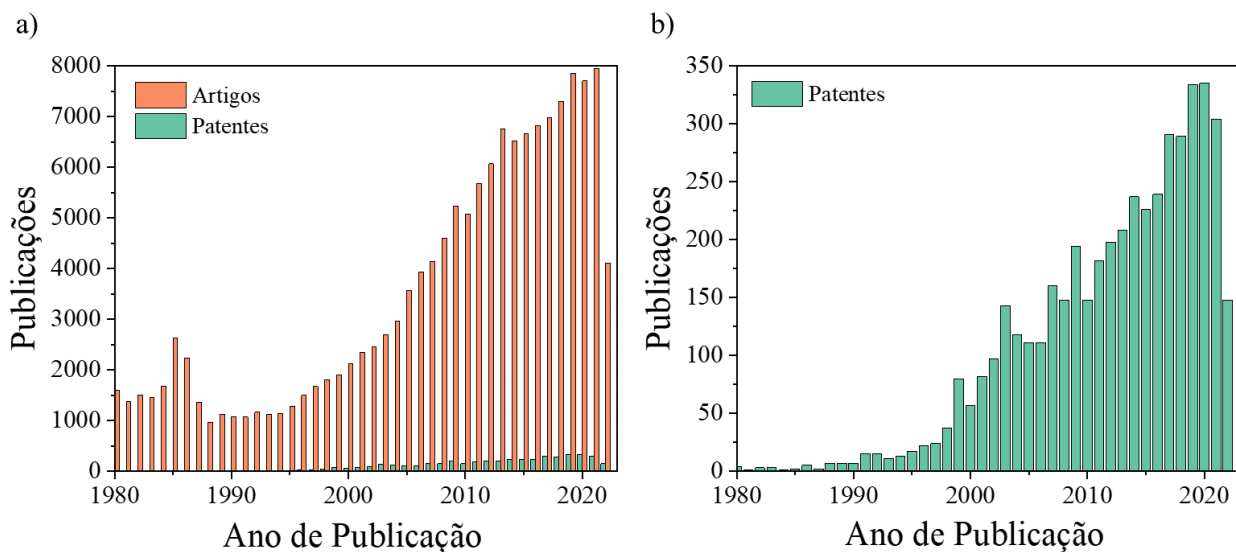
PALAVRAS-CHAVE	PATENT INSPIRATION	ESPACENET	DERWENT INNOVATIONS	WIPO (PATENTSCOPE)	SCOPUS
I	6123	2994	7463	6018	164848
II	950	2893	1029	477	3320
III	97254	24342	44116	37490	614071
IV	13156	7538	12572	11366	155361
V	11308	3535	11280	4155	149659
VI	3667	3300	9901	3312	13950
VII	28417	12324	29789	15046	126141
VIII	278	75	250	106	4539
IX	10592	7710	27550	10581	108696
X	44485	61306	82555	84355	135706
III*	22	27	6	15	101
IV*	11	11	3	3	35
V*	5	5	5	5	36
VI*	8	5	7	4	19
VII*	4	5	3	4	22
VIII*	1	3	0	0	4
IX*	4	5	4	7	39
X*	3	4	4	4	10

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo, a partir da consulta nas bases Scopus Patent Inspiration, Espacenet, Derwent Innovations e WIPO-Patentscope (2022)

A análise pela base Orbit® revela uma modesta contribuição patentária para o tema macro, que é das ciências forenses (I), com 2.803 depósitos desde o ano de 1973 (quase 50 anos), o que sugere ser esse um tema privilegiado por tecnologias abertas ou tecnologias utilizadas em caráter de proteção por sigilo. Tal número é ainda mais restrito para a pesquisa com II, em que apenas 1.016 casos são reportados desde 1968. Já a combinação das buscas I e II revela

1b) publicados na área das ciências forenses nos últimos 30 anos. Os avanços tecnológicos vivenciados nas últimas décadas possibilitaram grandes avanços nas técnicas empregadas nas investigações forenses, aumentando também a confiabilidade dos resultados obtidos, resultando em novas subdivisões da área e no, conseqüente, aumento do número de pesquisas. A área das ciências forenses está atraindo cada vez mais pesquisadores, o que é resultado de uma demanda por novas metodologias, materiais e tecnologias que contornem os desafios enfrentados na área. Apesar desse crescimento, o número de patentes ainda é incipiente se comparado ao número de artigos, indicando que ainda falta maturidade nas pesquisas e necessidade de desenvolvimento de metodologias que atendam aos protocolos necessários para a produção de tecnologias.

Gráfico 1 – (a) Quantitativo anual de artigos e patentes para o termo I. (b) Amplificação do quantitativo anual de patentes



Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo, a partir da consulta nas bases Patent Inspiration e Scopus (2022)

A partir dos dados coletados na base Scopus, com relação às áreas de conhecimentos dessas publicações, tem-se que a maioria dos artigos está centrada na área da Medicina (110.159), Ciências Sociais (24.509), Bioquímica Genética, Biologia Molecular (22.211), Ciência Computacional (17.958), Engenharia (12.656), Química (8.958) e Toxicologia e Farmacologia (6.278), indicando a multidisciplinaridade das pesquisas no campo das ciências forenses. Os principais campos tecnológicos das patentes, analisados a partir dos códigos da Classificação Internacional de Patentes (International Patent Classification – IPC) nas bases Patent Inspiration e Derwent Innovations, estão apresentados no Quadro 1. Analisando esses campos tecnológicos e as patentes resultantes, verifica-se que a maior parte da produção tecnológica dessa área estão relacionadas a análises de DNA ou outros tipos de análises genéticas; desenvolvimento de *softwares/hardwares* para análise de dados; estruturação e gerenciamento de bases de dados; administração e gestão de dados; análise/detecção/quantificação de drogas ou outras substâncias químicas e investigação e análise de materiais por métodos específicos e reconhecimento de textos ou padrões, como, por exemplo, impressões digitais. Esses resultados se relacionam com o que foi observado nas áreas de conhecimento dos artigos avaliados e ressaltam a ampla diversificação das áreas tecnológicas abrangidas pelo campo das ciências forenses, reforçando as diversas possibilidades de pesquisas que podem ser realizadas nesta área.

Quadro 1 – Quantitativo de patentes por Códigos IPC, para o termo I

QUANTITATIVO DE PATENTES	CÓDIGO IPC	DESCRIÇÃO
935 (18 %)	C12Q1/00	Processos, análises ou teste envolvendo enzimas, ácidos nucleicos ou microorganismos
510 (10 %)	G06F21/00	Dispositivos ou arranjos de segurança para proteger computadores, componentes destes, programas ou dados contra atividades não autorizadas
426 (8 %)	G01N33/00	Investigar ou analisar materiais por métodos específicos
383 (8 %)	C12N15/00	Mutação ou engenharia genética
343 (7 %)	H04L29/00	Arranjos, aparelhos, circuitos ou sistemas, não abrangidos por um único dos grupos
325 (6 %)	G06F17/00	Equipamentos ou métodos de computação digital ou processamento de dados, especialmente adaptados para funções específicas
265 (5 %)	G06K9/00	Métodos ou arranjos para ler ou reconhecer caracteres impressos ou escritos ou para reconhecer padrões, por exemplo, impressões digitais
212 (4 %)	A61B5/00	Medições para fins de diagnóstico
155 (3%)	H04L9/00	Arranjos para comunicação secreta ou segura

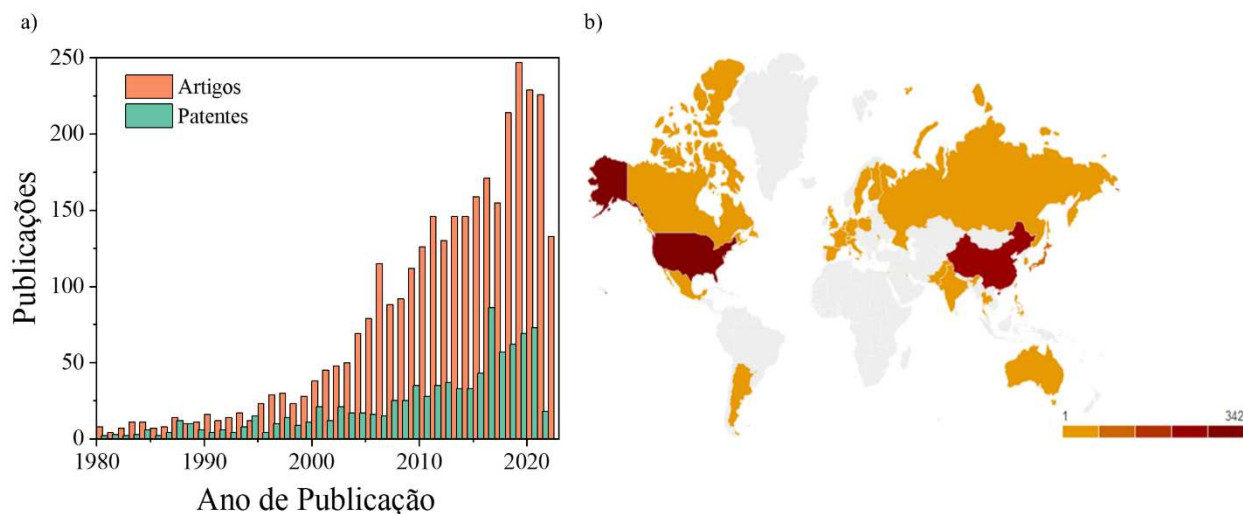
Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo, a partir da consulta nas bases Patent Inspiration e Derwent Innovations (2022)

Os três principais países nas buscas do termo I, relativas ao campo das ciências forenses, que mais depositaram patentes nesta área são: Estados Unidos (1.826), China (499) e Reino Unido (246). Em relação à publicação de artigos os Estados Unidos ocupam a 1ª posição (39.939 artigos), seguido por Reino Unido (16.118), Alemanha (11.809) e China (9.751). Isso mostra uma relação clara entre a produção de conhecimento (artigos) e produção de propriedade intelectual/tecnológica (patentes), em que a publicação de patentes segue uma tendência semelhante a publicação de artigos, para a maioria dos países. Os Estados Unidos e a China encabeçam a produção intelectual e tecnológica da área, enquanto o Brasil ocupa o 13º lugar na publicação de patentes (43 patentes), a 17ª na publicação de artigos (2532 artigos), vem registrando um crescimento significativo na última década e um conseqüente indicativo de crescimento nos próximos anos.

3.2 A Revelação de Impressões Digitais

As impressões digitais são uma das evidências mais importantes na resolução de crimes e têm sido usadas em investigações criminais como meio de identificação há séculos (SAINI; KAPOOR, 2016). Apesar dessa aplicação ser muito antiga, a busca pelo grupo de palavras II, relativa a métodos, materiais ou dispositivos para revelação de impressões digitais, demonstra que essa área iniciou um crescimento significativo apenas a partir da década de 1990, isso em relação à publicação de artigos quanto patentes, e vem em um constante crescimento desde então, conforme observado no Gráfico 2, relativo ao quantitativo anual de publicações. Tal crescimento se dá em virtude da evolução tecnológica e científica das metodologias aplicadas na revelação de impressões digitais latentes e da constante necessidade de aprimorar os materiais e métodos aplicados, em decorrência da crescente demanda de resultados melhores e mais confiáveis no campo da investigação forense.

Gráfico 2 – (a) Quantitativo anual de artigos e patentes e (b) Quantitativo de patentes publicadas por país aplicante, para o grupo de palavras II



Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo, (a) a partir da consulta nas bases Patent Inspiration e Scopus, e (b) adaptada de Patent Inspiration (2022)

A pesquisa na área de revelação de impressões digitais latentes vem chamando a atenção de um número cada vez maior de pesquisadores das mais diversas áreas de conhecimento e, por ser relativamente recente, o quantitativo do número de publicações ainda não apresenta números muito elevados, porém esse é um indicativo de que ainda há espaço para novas pesquisas e muitas questões a serem solucionadas. De forma geral, a tendência observada no crescimento quantitativo de artigos e de patentes é bastante semelhante e bem equiparada, demonstrando que essa área apresenta um grande potencial para produção de propriedade intelectual e tecnológica.

Os 10 países com maiores números de patentes publicadas são: China (259), Estados Unidos (242), Japão (66), República da Coreia (32), Taiwan (30), Reino Unido (28), Países Baixos (25), Canadá (19), Federação Russa (19), Alemanha (15) e Suíça (14), conforme observado na Figura 3, que apresenta o mapa da distribuição mundial de patentes publicadas por país aplicante. Esse resultado se correlaciona com o que foi observado na análise das buscas do grupo de palavras I, com China e Estados Unidos encabeçando as pesquisas na área.

O Brasil não apresentou resultados significativos nessa busca, porém apresentou uma patente (BR102018009038-A2) nas pesquisas nas bases de dados Derwent Innovations e WIPO. Com o intuito de avaliar a evolução do país nesse campo, foi realizada uma busca com os termos do grupo II em português na base de dados latina Latipat (Espacenet), em que o Brasil possui oito patentes das 12 que foram encontradas na busca. Destas, oito patentes, quatro foram requeridas pela Universidade Federal de Pelotas; uma pela Universidade Federal Fluminense; uma pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul; uma pelo Instituto de Biologia do Exército, Universidade do Estado do Rio de Janeiro e Universidade Federal de Goiás e uma pela Universidade Federal de Alagoas. Esta última se tratando da patente BR102018009038 (A2), já citada, que se refere à deposição eletroquímica de uma bicamada de compostos de polímeros conjugados eletrocromáticos e fluorescentes, que pode ser usado em química forense para visualização de impressões digitais latentes depositadas sobre superfícies metálicas, inclusive superfícies escuras (RIBEIRO *et al.*, 2019). Apesar de escassos, tais resultados demonstram o potencial que o Brasil vem apresentando nos últimos anos, com pesquisas inovadoras e com excelentes resultados, como é o caso da patente citada.

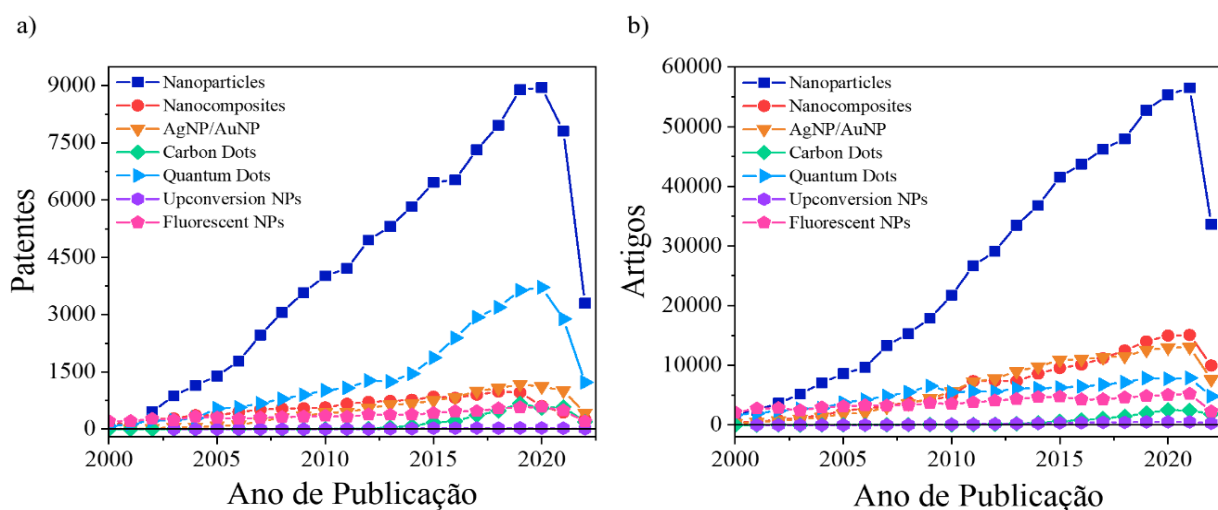
3.3 As Nanopartículas e a Revelação de Impressões Digitais

A evolução das pesquisas em nanotecnologia nos últimos anos se deu em virtude do crescente interesse de um número cada vez maior de pesquisadores atuando no desenvolvimento de nanomateriais com uma variedade de propriedades físicas e químicas, aplicados a diversas áreas, incluindo física, química, ciência de materiais e engenharia mecânica e elétrica (RAJPUT, 2015). Esse crescimento das pesquisas envolvendo nanopartículas, em especial nos últimos 20 anos, é evidenciado no Gráfico 3, que apresenta um quantitativo anual de artigos (Gráfico 3a) e patentes (Gráfico 3b), para a pesquisa relativa aos grupos de palavras III, IV, V, VI, VII, VIII, IX; relativos ao cenário atual das pesquisas em Nanopartículas (Nanoparticles), e suas subclasses, Nanocompósitos, Nanopartículas de Prata e Ouro (AgNP e AuNP), CDs, QDs, nanopartículas de materiais terras raras, que são nanopartículas emissoras de luz por conversão ascendente de energia (Upconversion Nanoparticles – UCNPs) e Nanopartículas Fluorescentes (Fluorescent NPs).

Cabe ressaltar o crescimento no número de patentes relativas à Quantum Dots (Gráfico 3b), uma vez que os QDs são mais favoráveis em termos da possibilidade do controle da engenharia de superfície, enquanto os CDs sofrem de baixa reprodutibilidade e uniformidade das partículas obtidas (HIMMELSTOß; HIRSCH, 2019). Porém, com avanços nas pesquisas neste sentido, os CDs têm apresentado uma boa constância nas publicações, com indicação de crescimento, enquanto os QDs têm apresentado uma queda bastante significativa, que, em parte, pode ser resultado da influência da pandemia de Covid-19 entre os anos de 2020-2022.

Os Nanocompósitos, as AgNPs e AuNPs e as Nanopartículas Fluorescentes apresentam uma constância no quantitativo e na tendência de publicação de artigos e patentes, isso por se tratar de materiais que já se encontram bem estabelecidos no campo da nanotecnologia. As UCNPs também são interessantes em termos de engenharia de superfície e já se estabeleceram como materiais promissores, mas ainda existem obstáculos que precisam ser superados, tais como eficiência de conversão de energia, estabilidade e biocompatibilidade (HIMMELSTOß; HIRSCH, 2019), o que explica o pequeno número de publicações.

Gráfico 3 – Quantitativo anual de (a) artigos e (b) patentes para os grupos de palavras III, IV, V, VI, VII, VIII e IX

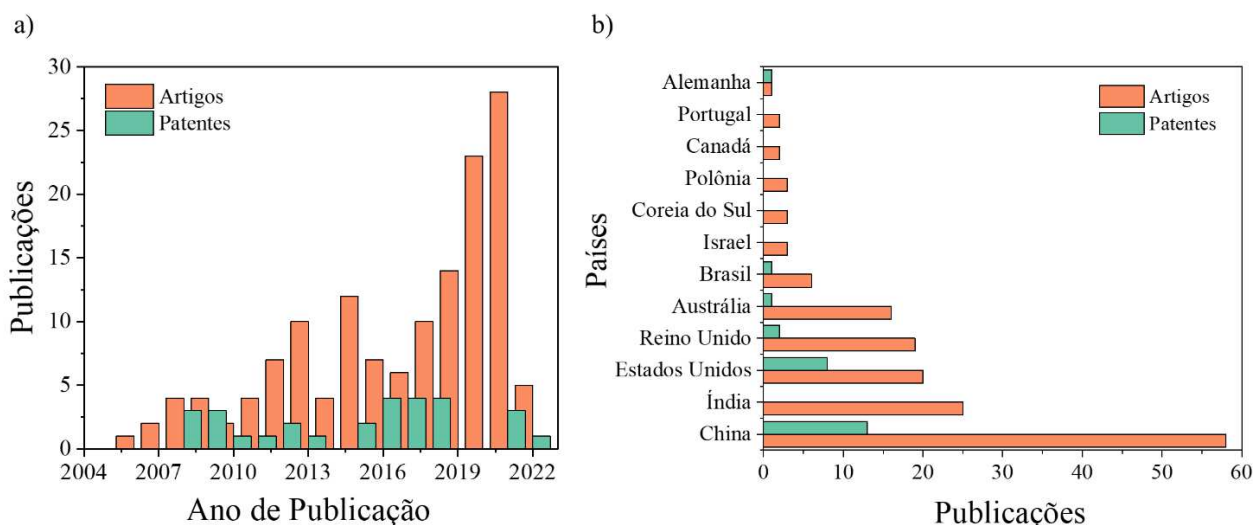


Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo, a partir da consulta nas bases Patent Inspiration e Scopus (2022)

A ciência forense está dentre as áreas de destaque da aplicação das nanopartículas, especialmente com relação a aplicação das NPs na revelação de impressões digitais. Nesse sentido, seu pequeno tamanho, capacidade de funcionalização da superfície e propriedades de luminescência podem levar a uma melhor resolução, maior sensibilidade e seletividade no processo de revelação (KANODARWALA *et al.*, 2019). Analisando o quantitativo de artigos e patentes para a pesquisa das nanopartículas associadas a revelação de impressões digitais (Tabela 1), os Nanocompósitos (IV), as Nanopartículas Fluorescentes (IX), e as AgNPs e AuNPs (V), já apresentam metodologias bem estabelecidas na área e por isso apresentam o maior número total de artigos e um significativo número de patentes. Os CDs (VI) apresentam uma boa relação entre artigos e patentes. Questões de toxicidade e estabilidade dos QDs podem influenciar na redução do número de patentes em relação ao número de artigos para estes materiais. As UCNPs (VIII) são um campo de pesquisa recente, com desafios a serem solucionados, mas que podem vir a ser promissores no futuro.

Um quantitativo anual do número de artigos e patentes referentes a Nanocompósitos, AgNPs e AuNPs, Carbon Dots, Quantum Dots, UCNPs e Nanopartículas Fluorescente utilizados na revelação de impressões digitais latentes está apresentado no Gráfico 4a, em que se observa um número ainda pequeno de artigos, mas com um crescimento significativo e constante nos últimos três anos, indicando que a área vem apresentando resultados promissores. O quantitativo de patentes apresentado ainda é muito baixo, mas considerando a tendência de publicação de artigos, espera-se que com o amadurecimento dessas pesquisas o número de patentes também cresça nos próximos anos. Com relação aos países que publicam esses artigos e patentes (Gráfico 4b), a China encabeça as publicações, a Índia ocupa o segundo lugar na publicação de artigos, mas não apresentou um número significativo de patentes na busca realizada, os Estados Unidos aparecem em terceiro lugar na publicação de artigos e em segundo no depósito de patentes, seguido pelo Reino Unido. O Brasil ocupa o sexto lugar na publicação de artigos e divide o terceiro lugar no depósito de patentes com Austrália e Alemanha. A tendência observada para os países que mais publicam na área é similar aquelas observadas anteriormente neste trabalho. É interessante apontar que o Brasil está entre os seis países que mais publicam artigos e patentes nesse campo e, se a tendência permanecer a mesma, nos próximos anos pode estar ocupando uma posição de referência na área de nanopartículas aplicadas na revelação de impressões digitais latentes.

Gráfico 4 – Quantitativo de artigos e patentes que utilizam os materiais dos grupos V, VI, VII, VIII e IX em métodos de revelação de impressões digitais, (a) por ano de publicação e (b) por país aplicante



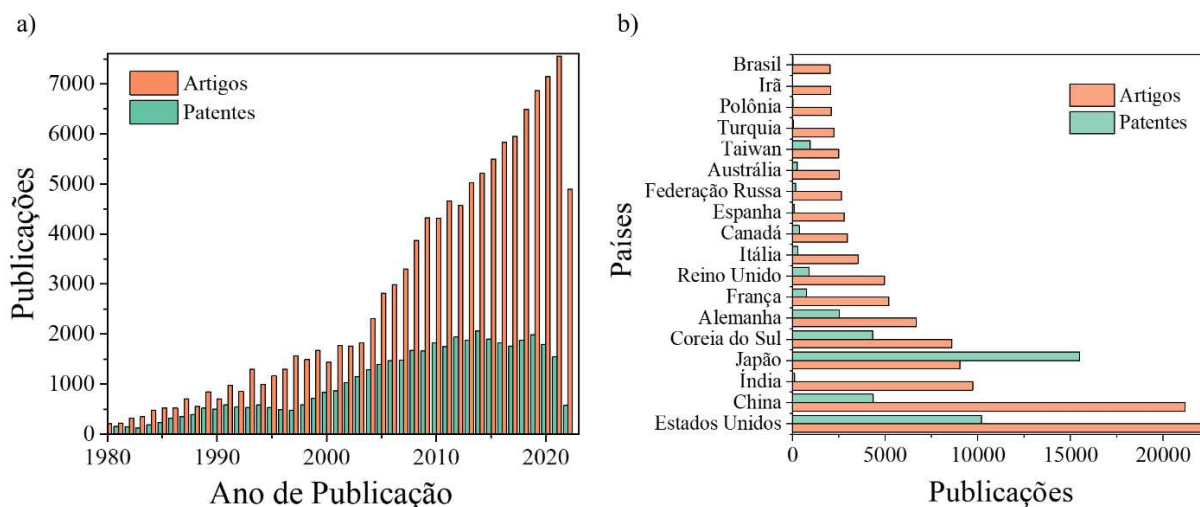
Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo, a partir da consulta nas bases Patent Inspiration, Spacenet, Derwent Innovations, WIPO-patentscope e Scopus (2022)

3.4 Os Polímeros Conjugados e a Revelação de Impressões Digitais

Pesquisas relacionadas a polímeros conjugados aumentaram significativamente nos últimos anos, com esses materiais sendo empregados em diversas aplicações. Os polímeros conjugados (PCs) são reconhecidos como uma classe de materiais orgânicos com propriedades elétricas e ópticas únicas semelhantes às de semicondutores inorgânicos e metais. Os PCs podem ser sintetizados usando abordagens simples, versáteis e econômicas. São macromoléculas com capacidades multifuncionais, que podem ser facilmente sintetizadas usando processos simples de eletropolimerização (NEZAKATI *et al.*, 2018).

O crescimento das pesquisas com PCs pode ser observado no Gráfico 5a, que apresenta o quantitativo anual de artigos e patentes publicados nessa área (busca para palavras do grupo X), que teve um aumento bastante significativo na última década, um resultado do avanço tecnológico e da visibilidade desse tipo de material para diversas aplicações. No Gráfico 5b, relativo aos países que mais publicam artigos na área, observa-se que Estados Unidos e China dominam a publicação de artigos nessa área, seguidos por Índia, Japão e Coreia do Sul; o Brasil aparece em 18º lugar, com um total de 2.035 artigos. Com relação a depósitos de patentes, o Japão domina o *ranking* com 15.478 patentes, seguido pelos Estados Unidos (10.184), China (4.343) e Coreia do Sul (4.332), o Brasil ocupa a 40ª posição, com 13 patentes. Apesar do crescente número de publicações e da qualidade dessas produções, o Brasil ainda demonstra um déficit com relação à proteção de propriedade intelectual e tecnológica.

Gráfico 5 – Quantitativo de artigos e patentes relativos a pesquisas com polímeros conjugados (X), (a) por ano de publicação e (b) por país aplicante



Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo, a partir da consulta nas bases Patent Inspiration e Scopus (2022)

A pesquisa envolvendo PCs na revelação de impressões digitais é bastante recente, e apresenta um pequeno número de publicações. Com relação aos artigos publicados na área observa-se que a pesquisa teve início em 2001 com o trabalho de Bersellini *et al.* (2001) e foi retomada em meados de 2010 por Beresford e Hillman e desde então vem apresentando um crescente no número de artigos, com trabalhos de Beresford *et al.* (2012), Brown e Hillman (2012), Sapstead, Corden e Hillman (2015) e Sapstead *et al.* (2013), Slaninová *et al.* (2019), Costa *et al.* (2020a; 2020b), Broncová *et al.* (2021a; 2021b) e Lyra *et al.* (2021). Apesar do pequeno número de publicações, a área tem se mostrado bastante promissora e autores como Brown e Hillman (2012), Costa *et al.* (2020a; 2020b) e Lyra *et al.* (2021) apresentaram excelentes resultados para a revelação de impressões digitais em superfícies metálicas utilizando a eletropolimerização de PCs, apresentada como um método simples, rápido e de baixo custo. Cabe ressaltar que três dessas publicações são de pesquisadores brasileiros, de modo que o Brasil vem despontando como uma das referências na área.

Com relação às patentes publicadas relativas a processos de revelação de impressões digitais utilizando PCs, foram avaliadas as patentes retornadas nas consultas as quatro bases de dados avaliadas, juntamente com os códigos IPC dessas patentes, que são relativos a produtos em camadas, reconhecimento de pessoas e padrões e compostos orgânicos; evidenciando o tipo de material orgânico utilizado (polímero conjugado) e sua respectiva aplicação, a revelação de impressões digitais latentes com o intuito de identificar indivíduos em investigações forenses. Avaliando cada uma das patentes apresentadas, a patente BR102018009038-A2 trata-se da mesma patente avaliada neste trabalho, por meio das buscas na base latina Latipat, em que os inventores Ribeiro *et al.* (2019) desenvolveram um sistema de bicamada polimérica para revelação de impressões digitais latentes presentes em superfícies metálicas sob luz visível e/ou ultravioleta, a patente foi depositada pela Universidade Federal de Alagoas (Brasil). A família de patentes GB2471446-A (2009), WO2010109222-A1 (2010) e EP2410913-B1 (2012) (Inv. HILLMAN, A. ROBERT) refere-se à revelação de impressão digital em superfícies metálicas por

meio da eletrodeposição seletiva de polímeros conjugados entre as cristas da impressão digital. A deposição seletiva do polímero nestas áreas é influenciada pelas propriedades eletricamente isolantes do resíduo da impressão digital, e as patentes foram depositadas pela Universidade de Leicester (Reino Unido). A patente IN201831017339-A (Inv. MALIK *et al.*, 2019) é relativa a um copolímero de um polieletrólito conjugado catiônico usado para revelar impressões digitais latentes em investigação forense/criminal, a patente foi depositada pelo Instituto Indiano Guwahati de Tecnologia. E por fim a patente CN113087878-A (Inv. FAN *et al.*, 2021) trata de um derivado de politiofeno fluorescente, o poli(5-etinil-2-((4-etinilfenil)etinil)-3-metiltiofeno), útil na revelação de impressões digitais e detecção de resíduos de impressões digitais e sangue, a patente foi depositada pela Universidade de Soochow (China).

Por se tratar de uma área muito recente, o número de patentes ainda é pequeno, mas o campo já apresenta uma boa proporção de artigos e patentes, indicando que se a tendência permanecer a mesma, nos próximos anos a área deve apresentar um crescimento significativo no número de patentes, uma vez que vem apresentando resultados muito promissores.

A utilização de nanopartículas e macromoléculas de polímeros conjugados aplicadas às ciências forenses, na revelação de impressões digitais latentes, vem apresentando uma quantidade significativa de pesquisas, que, por sua vez, apresentam excelentes resultados, nos mais diversos tipos de superfícies de interesse forense (metais, plásticos, papel e vidro). Nesse sentido, Assis *et al.* (2023) apresentam uma revisão acerca da aplicação desses materiais no processo de revelação de impressões digitais latentes, que justifica o crescimento de publicações observado, ao evidenciar a possibilidade de manipulação da estrutura molecular e do tamanho das partículas, que possibilitam modificações das propriedades óticas, eletrônicas, físicas e químicas desses materiais, resultando em diversas formas distintas de otimizar os processos utilizados e, conseqüentemente, aprimorar a qualidade das impressões digitais reveladas.

4 Considerações Finais

O presente estudo objetivou avaliar o panorama mundial de materiais inovadores (nanopartículas e polímeros conjugados) aplicados na revelação de impressões digitais latentes, no contexto das ciências forenses. Foi observado que o quantitativo de patentes e artigos avaliados nesta pesquisa demonstraram que a aplicação de nanomateriais e polímeros conjugados na área forense apresenta grande potencial e espaço para o desenvolvimento de novas tecnologias e amadurecimento daquelas já existentes. A área analisada também demonstrou um crescimento anual significativo no número publicações, em especial na última década, indicando que um número cada vez maior de pesquisadores está realizando pesquisas nesse campo. Apesar de Estados Unidos e China encabeçarem a produção intelectual e tecnológica da área, é interessante observar que muitos outros países estão despontando com um número significativo de publicações. Nesse contexto, o Brasil surge com pesquisas promissoras, se consolidando como referência em inovação na área, uma vez que já apresenta uma participação bastante significativa na pesquisa envolvendo polímeros conjugados, como reveladores de impressões digitais latentes, e com relação às nanopartículas, sua contribuição vem aumentando significativamente nos últimos anos.

5 Perspectivas Futuras

As nanopartículas e as macromoléculas de polímeros conjugados têm se mostrado materiais muito promissores dentro do contexto das ciências forenses. Neste trabalho foi avaliado o contexto geral das pesquisas envolvendo esses materiais, com enfoque na revelação de impressões digitais latentes. De forma que, considerando a tendência de aumento no número de publicações nessa área nos últimos anos, é esperado para os próximos anos que haja um crescimento e um amadurecimento bastante acentuado dessas pesquisas. Assim como mudanças muito significativas no contexto das ciências forenses, uma vez que comecem a empregar estas metodologias inovadoras em sua rotina, onde os métodos convencionais não se façam suficientes.

Como visto, a pesquisa por nanopartículas e polímeros conjugados tem crescido bastante nos últimos anos e, apesar desse trabalho ter focado na aplicação desses materiais em processos de revelação de impressões digitais latentes, é importante ressaltar que, dentro do panorama multidisciplinar das ciências forenses, esses materiais possuem diversas outras aplicações que podem vir a ser abordadas em trabalhos futuros.

Referências

ABEBE, B. *et al.* Latent Fingerprint Enhancement Techniques: A Review. **Journal of Chemical Reviews**, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 40-56, 2020. DOI: 10.33945/SAMI/JCR.2020.1.3.

ASSIS, A. M. L. *et al.* From nanomaterials to macromolecules: Innovative technologies for latent fingerprint development. **WIREs Forensic Sci.**, [s.l.], v. 5, n. e1475, 2023. DOI: 10.1002/wfs2.1475.

BALSAN, J. D. *et al.* Desenvolvimento de metodologia de revelação de impressão digital latente com chalconas. **Química Nova**, [s.l.], v. 42, n. 8, p. 845-850, 2019. DOI: 10.21577/0100-4042.20170815.

BERESFORD, A. L. *et al.* Comparative study of electrochromic enhancement of latent fingerprints with existing development techniques. **Journal of Forensic Sciences**, [s.l.], v. 57, n. 1, p. 93-102, 2012. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2011.01908.x.

BERRY, J.; STONEY, D. A. History and Development of Fingerprinting. *In*: LEE, H. C.; GAENSSLEN, R. E. **Advances in Fingerprint Technology**. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2001. p. 10-49.

BERRY, C. *et al.* Development of latent fingerprints on metallic surfaces using electropolymerization processes. **Journal of Forensic Sciences**, [s.l.], v. 46, n. 4, p. 871-877, 2001.

BERSELLINI, C. *et al.* Development of latent fingerprints on metallic surfaces using electropolymerization processes. **Journal of Forensic Sciences**, [s.l.], v. 46, n. 4, p. 871-877, 2001.

BLEAY, S. M.; de PUIT, M. Introduction. *In*: BLEAY, S. M.; CROXTON, R. S.; PUIT, M. (2018). **Fingerprint Development Techniques: Theory and Application**. 1. ed., cap. 1, John Wiley & Sons Ltd., 383-399, 2018. P. 1-10. DOI: 10.1002/9781119187400.

BRONCOVÁ, G. *et al.* Optimization of Electrochemical Visualization of Latent Fingerprints with Poly(Neutral Red) on Brass Surfaces. **Polymers**, [s.l.], v. 13, n. 3.220, 2021a. DOI: 10.3390/polym13193220.

BRONCOVÁ, G. *et al.* Poly(neutral red) modified metal substrates for fingerprint visualization. **Chem. Pap.**, [s.l.], v. 75, p. 6.673-6.676, 2021b. DOI: 10.1007/s11696-021-01794-6.

BROWN, R. M.; HILLMAN, A. R. Electrochromic enhancement of latent fingerprints by poly(3,4-ethylenedioxythiophene). **Physical Chemistry Chemical Physics**, [s.l.], v. 14, p. 8653-8661, 2012. DOI: 10.1039/c2cp40733g.

CADD, S. *et al.* Fingerprint composition and aging: A literature review. **Science & Justice**, [s.l.], v. 55, p. 219-238, 2015. DOI: doi.org/10.1016/j.scijus.2015.02.004.

COSTA, B. M. F. *et al.* SATS@CdTe hierarchical structures emitting green to red colors developed for latent fingerprint applications. **Dyes and Pigments**, [s.l.], v. 180, n. 108483, 2020. DOI: 10.1016/j.dyepig.2020.108483.

COSTA, C. V. *et al.* A low-potential electrochemical method for fast development of latent fingerprints on brass cartridge cases by electrodeposition of poly(3,4-ethylenedioxythiophene). **Nano Select**, [s.l.], v. 1, n. 4, p. 405-412, 2020a. DOI: 10.1002/nano.202000040.

COSTA, C. V. *et al.* Bilayer systems based on conjugated polymers for fluorescence development of latent fingerprints on stainless steel. **Synthetic Metals**, [s.l.], v. 262, n. 116347, 2020b. DOI: 10.1016/j.synthmet.2020.116347.

CROXTON, R. S. *et al.* Variation in amino acid and lipid composition of latent fingerprints. **Forensic Sci Int**, [s.l.], v. 15, n. 199, p. 93-102, 2010. DOI: 10.1016/j.forsciint.2010.03.019.

FAN, L. *et al.* **New fluorescent conjugated polymer i.e. cationic 5-ethynyl-2-((4-ethynylphenyl)ethynyl)-3-methylthiophene-based fluorescent conjugated polymer useful in visualizing grease fingerprints and blood fingerprints.** Depositante: Universidade Federal de Alagoas. CN113087878A. Depósito: 28 dez. 2021.

GIRELLI, C. M. A. *et al.* Comparison of practical techniques to develop latent fingermarks on fired and unfired cartridge cases. **Forensic Science International**, [s.l.], v. 250, p. 17-26, 2015. DOI: 10.1016/j.forsciint.2015.02.012.

HILLMAN, R. A. **Visualization of print on surface by contacting surface comprising print with monomer-containing fluid, passing electrical current between surface and fluid to deposit polymer on surface, and applying electrical potential to surface.** Depositante: Universidade de Leicester. WO2010109222-A1. Depósito: 8 jan. 2010.

HIMMELSTOß, S. F.; HIRSCH, T. A critical comparison of lanthanide based upconversion nanoparticles to fluorescent proteins, semiconductor quantum dots, and carbon dots for use in optical sensing and Imaging. **Methods Appl. Fluoresc.**, [s.l.], v. 7, n. 022002, 2019. DOI: 10.1088/2050-6120/ab0bfa.

HUYUNH, C.; HALÁMEK, J. Trends in fingerprint analysis. **Trends in Analytical Chemistry**, [s.l.], v. 82, p. 328-336, 2016. DOI: 10.1016/j.trac.2016.06.003.

KANODARWALA, F. K. *et al.* Nanoparticles used for fingerprint detection – a comprehensive review. **WIREs Forensic Science**, [s.l.], v. 1, n. e1341, 2019. DOI: 10.1002/wfs2.1341.

- KANODARWALA, F. K. *et al.* Novel upconverting nanoparticles for fingerprint detection. **Optical Materials**, [s.l.], v. 111, 2021. DOI: 10.1016/j.optmat.2020.110568.
- KASPER, S. P. **Latent Print Processing Guide**. [S.l.]: Academic Press, 2016. ISBN 9780128035078.
- LEE, P. L. T. *et al.* Latent fingerprint detection using functionalised silicon oxide nanoparticles: Optimisation and comparison with cyanoacrylate fuming. **Forensic Science International**, [s.l.], v. 315, n. 110442, 2020. DOI: 10.1016/j.forsciint.2020.110442.
- LYRA, A. C. F. *et al.* Functionalization of pyrrole derivatives as a way to improve their solubility in aqueous medium for applying in latent fingerprints development. **Forensic Chemistry**, [s.l.], v. 26, n. 100373, 2021. DOI: 10.1016/j.forc.2021.100373.
- MALIK, A. H. *et al.* **Copolymer having aggregation-induced enhanced emission active conjugated polyelectrolyte used to develop latent fingerprints in forensic/criminal investigation comprises cationic polyelectrolyte and contrast developing latent fingerprints**. Depositante: Instituto Indiano Guwahati de Tecnologia. IN201831017339A. Depósito: 16 dez. 2019.
- NEZAKATI, T. *et al.* Conductive Polymers: Opportunities and Challenges in Biomedical Applications. **Chem. Rev.**, [s.l.], v. 118, p. 6.766-6.843, 2018. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00275.
- PRABAKARAN, E.; PILLAY, K. Nanomaterials for latent fingerprint detection: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, [s.l.], v. 122, p. 1.856-1.885, 2021. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.110.
- PRASAD, V. *et al.* Role of Nanomaterials for Forensic Investigation and Latent Fingerprinting-A Review. **Journal of Forensic Sciences**, [s.l.], v. 65, n. 1, p. 26-36, 2019. DOI: doi.org/10.1111/1556-4029.14172.
- RAJPUT, N. Methods of Preparation of Nanoparticles – A Review. **International Journal of Advances in Engineering & Technology**, [s.l.], v. 7, n. 4, p. 1.806-1.811, 2015.
- RIBEIRO, A. S. *et al.* **Bilayer polymeric composite system for visualization of latent fingerprints present on metallic surfaces, including dark surfaces, or under visible and/or ultraviolet light, comprises conjugated polymer layer and fluorescent film layer**. Depositante: Universidade Federal de Alagoas. BR102018009038A2. Depósito: 19 nov. 2019.
- SAINI, M.; KAPOOR, A. K. Biometrics in Forensic Identification: Applications and Challenges. **Journal of Forensic Medicine**, [s.l.], v. 1, n. 2, 2016. DOI: 10.4172/2472-1026.1000108
- SAPSTEAD, R. M., *et al.* Nanoscale control of interfacial processes for latent fingerprint enhancement. **Faraday Discussions**, [s.l.], v. 164, p. 391-410, 2013. DOI: 10.1039/c3fd00053b.
- SAPSTEAD, R. M.; CORDEN, N.; HILLMAN, A. R. Latent fingerprint enhancement via conducting electrochromic copolymer films of pyrrole and 3,4-ethylenedioxythiophene on stainless steel. **Electrochimica Acta**, [s.l.], v. 162, p. 119-128, 2015. DOI: 10.1016/j.electacta.2014.11.061
- SIMGLA, N.; KAUR, M.; SOFAT, S. Automated latent fingerprint identification system: A review. **Forensic Science International**, [s.l.], v. 309, 2020. DOI: 10.1016/j.forsciint.2020.110187.
- SLANINOVÁ, T. *et al.* The visualization of fingerprints using conducting polymer layers. **Chemicke Listy**, [s.l.], v. 113, n. 9, p. 530-539, 2019.

SONG, W. S.; YANG, H. Efficient White-Light-Emitting Diodes Fabricated from Highly Fluorescent Copper Indium Sulfide Core/Shell Quantum Dots. **Chem. Mater.**, [s.l.], v. 24, p. 1.961-1.967, 2012. DOI: 10.1021/cm300837z.

SODHI, G. S.; KAUR, J. Powder method for detecting latent fingerprints: A review. **Forensic Science International**, [s.l.], v. 120, n.3, p. 172-176, 2001. DOI: 10.1016/S0379-0738(00)00465-5.

WANG, J. *et al.* Time-Gated Imaging of Latent Fingerprints and Specific Visualization of Protein Secretions via Molecular Recognition. **Anal. Chem.**, [s.l.], 2017. DOI: 10.1021/acs.analchem.7b03003.

WEI, S.; CUI, X. Synthesis of gold nanoparticles immobilized on fibrous nano□silica for latent fingerprints detection. **Journal of Porous Materials**, [s.l.], v. 28, p. 751-762, 2021. DOI: 10.1007/s10934-020-01030-8.

Sobre os Autores

Jeane Caroline da Silva Melo

E-mail: jeane.melo@iqb.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7623-4899>

Mestre em Química e Biotecnologia pela Universidade Federal de Alagoas em 2022.

Endereço profissional: Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.

Adriano Ananias da Silva

E-mail: adriano.silva@iqb.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4479-3068>

Bacharel em Química Tecnológica e Industrial pela Universidade Federal de Alagoas em 2021.

Endereço profissional: Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.

Adriana Santos Ribeiro

E-mail: aribeiro@qui.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6109-9428>

Doutora em Química pela Universidade Estadual de Campinas em 2003.

Endereço profissional: Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.

Josealdo Tonholo

E-mail: tonholo@qui.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4015-9564>

Doutor em Físico-Química pelo Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo em 1997.

Endereço profissional: Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.