



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA- UEFS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PPPG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM EM CIÊNCIAS DA
TERRA E DO AMBIENTE – PPGM**

**NANOPARTÍCULAS DE PRATA SINTETIZADAS POR *Turnera subulata* Sm. E
SUA APLICAÇÃO COMO SENSOR COLORIMÉTRICO PARA A DETECÇÃO
DE ÍONS METÁLICOS EM ÁGUA**

HISMILEI CHAVES DOS SANTOS SILVA

**FEIRA DE SANTANA
2025**

HISMILEI CHAVES DOS SANTOS SILVA

**NANOPARTÍCULAS DE PRATA SINTETIZADAS POR *Turnera subulata* Sm. E
SUA APLICAÇÃO COMO SENSOR COLORIMÉTRICO PARA A DETECÇÃO
DE ÍONS METÁLICOS EM ÁGUA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Modelagem em Ciências da Terra e do
Ambiente, da Universidade Estadual de
Feira de Santana, como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre em
Ciências Ambientais.

Área de conhecimento: Estudos
Ambientais e Geotecnologias

Orientador: Prof. Dr. Edrian Mania
Coorientadora: Prof^ª. Dra. Taíse Bomfim
de Jesus.

**FEIRA DE SANTANA
2025**

Ficha catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

S58n Silva, Hismilei Chaves dos Santos
Nanopartículas de prata sintetizadas por *Turnera subulata* Sm. e sua aplicação como sensor colorimétrico para a detecção de íons metálicos em água / Hismilei Chaves dos Santos Silva. – 2025.
66f. : il.

Orientador: Edrian Mania
Coorientadora: Taise Bomfim de Jesus
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana. Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, 2025.

1. *Turnera subulata* Sm. 2. Nanopartículas de prata. 3. Íons metálicos. 4. Sensor colorimétrico. 5. Síntese verde (biossíntese). I. Mania, Edrian, orient. II. Jesus, Taise Bomfim de, coorient. III. Universidade Estadual de Feira de Santana. Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente. IV. Título.

CDU: 681.2:581

Rejane Maria Rosa Ribeiro CRB-5/695

Hismilei Chaves Santos Silva

"Nanopartículas de Prata Sintetizadas por *Turnera subulata* Sm.. e sua Aplicação como Sensor Colorimétrico para a Detecção de Íons Metálicos em Água."

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana.

Orientador: Prof. Dr. Edrian Mania

Co-Orientador: Prof^ª Dr^a Taise Bomfim de Jesus

Linha de Pesquisa: Estudos Ambientais e Geotecnologias.

Data de aprovação: 27 de fevereiro de 2025.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente



EDRIAN MANIA
Data: 26/05/2025 15:55:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edrian Mania - Orientador
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

Documento assinado digitalmente



TAISE BOMFIM DE JESUS
Data: 09/05/2025 07:50:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a Dr^a Taise Bomfim de Jesus - Coorientadora
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

Documento assinado digitalmente



SUSANE ETERNA LEITE MEDEIROS
Data: 09/05/2025 10:37:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a Dr^a Susane Eterna Leite Medeiros
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

Documento assinado digitalmente



ERNANDO SILVA FERREIRA
Data: 15/05/2025 17:05:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ernando Silva Ferreira
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

Dedico esta dissertação aos meus pais e irmãos, pelo amor e apoio incondicional. Minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar comigo em cada passo dessa jornada, me fortalecendo nos momentos difíceis e iluminando o caminho com sabedoria e coragem.

À minha família, especialmente aos meus pais e ao meu irmão, pelo amor incondicional, apoio constante e por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei. Cada conquista é também de vocês.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edrian Mania, pela orientação, paciência e confiança no meu trabalho. Sua escuta e incentivo foram fundamentais para que este projeto se concretizasse. À minha coorientadora, Profa. Dra. Taíse Bomfim, minha gratidão pela generosidade em compartilhar conhecimento, pelas contribuições valiosas e pelo apoio contínuo durante toda a pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo apoio financeiro que viabilizou este trabalho.

Ao INCITE de Nanotecnologia e ao Laboratório de Espectroscopia, Nanomateriais e Sensores (LENS), pelo suporte técnico, pela infraestrutura, por todo acolhimento, troca de experiências e por fazer parte do meu crescimento científico.

Ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente Universidade Estadual de Feira de Santana (PPGM/UEFS), pela formação acadêmica de qualidade e pelas oportunidades que me proporcionaram durante o mestrado.

À Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), pela infraestrutura, pelo ambiente acadêmico enriquecedor e pelos recursos disponibilizados durante minha pesquisa.

Aos amigos que estiveram ao meu lado nessa caminhada, oferecendo apoio, risos e força nos momentos em que mais precisei, meu carinho e gratidão.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo aqui meu sincero e afetuoso agradecimento.

RESUMO

Este trabalho aborda a síntese verde de nanopartículas de prata (AgNPs) utilizando extrato aquoso das folhas da planta *Turnera subulata* Sm., investigando seu potencial como sensor colorimétrico para a detecção seletiva de íons metálicos em água. A síntese das TS-AgNPs foi confirmada por espectroscopia UV-Vis, com a presença de um pico de ressonância plasmônica de superfície em 414 nm, bem como por análises de TEM e DLS, que revelaram morfologia esférica, tamanho médio entre 10 e 20 nm e distribuição bimodal. O elevado potencial zeta (-48 mV) demonstrou excelente estabilidade coloidal, essencial para prevenir a agregação e preservar as propriedades das partículas. A estabilidade das AgNPs foi avaliada sob três condições experimentais: ao longo de 60 dias, em diferentes concentrações salinas e variações de pH. Os resultados validaram a capacidade das TS- AgNPs em se manterem estáveis em condições adversas. No que se refere à seletividade, o sensor apresentou alta especificidade para Hg^{2+} , evidenciada por mudanças perceptíveis na coloração a olho nu da solução e alterações significativas na absorvância. A curva de calibração revelou excelente linearidade ($R^2 = 0,98$), com limites de detecção (LOD) e quantificação (LOQ) de 0,31 ppm e 1,03 ppm, respectivamente. Ensaio realizados em matrizes complexas contendo múltiplos íons metálicos demonstraram que o sensor manteve sua especificidade mesmo na presença de interferentes potenciais, destacando sua robustez e aplicabilidade em condições reais. Adicionalmente, estudos cinéticos mostraram a rápida interação entre o nanosensor e o Hg^{2+} , com reação total em menos de 1,5 minutos. Em síntese, os resultados obtidos comprovam a aplicabilidade das TS- AgNPs como sensor colorimétrico, oferecendo alta seletividade, estabilidade, robustez e rapidez na detecção de íon mercúrio. Este trabalho não só contribui para o avanço das metodologias verdes, mas também destaca o potencial de aplicação das nanopartículas biossintetizadas em tecnologias de monitoramento ambiental.

Palavras-chave: *Turnera subulata* sm, síntese verde, nanopartículas de prata, íons metálicos, sensor colorimétrico.

ABSTRACT

This work addresses the green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) using an aqueous extract from the leaves of the plant *Turnera subulata* Sm., investigating their potential as a colorimetric sensor for the selective detection of metallic ions in water. The synthesis of TS-AgNPs was confirmed by UV-vis spectroscopy, showing a surface plasmon resonance peak at 414 nm, as well as TEM and DLS analyses, which revealed spherical morphology, an average size between 10 and 30 nm, and a bimodal distribution. The high zeta potential (-48 mV) demonstrated excellent colloidal stability, essential for preventing aggregation and preserving particle properties. The stability of the AgNPs was evaluated under three experimental conditions: over 60 days, at different saline concentrations, and pH variations. The results validated the ability of TS-AgNPs to remain stable under adverse conditions. Regarding selectivity, the sensor showed high specificity for Hg^{2+} , evidenced by perceptible color changes to the naked eye and significant absorbance alterations. The calibration curve revealed excellent linearity ($R^2 = 0.98$), with detection (LOD) and quantification (LOQ) limits of 0.31 ppm and 1.03 ppm, respectively. Tests conducted in complex matrices containing multiple metallic ions demonstrated that the sensor maintained its specificity even in the presence of potential interferents, highlighting its robustness and applicability under real conditions. Additionally, kinetic studies showed the rapid interaction between the nanosensor and Hg^{2+} , with a total reaction time of less than 1.5 minutes. In summary, the results obtained confirm the applicability of TS-AgNPs as a colorimetric sensor, offering high selectivity, stability, robustness, and speed in detecting mercury ions. This work not only contributes to advancing green methodologies but also highlights the potential application of biosynthesized nanoparticles in environmental monitoring technologies.

Keywords: *Turnera subulata* Sm, green properties, silver nanoparticles, metal ions, colorimetric sensor.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	OBJETIVOS.....	17
2.1.	Objetivo geral	17
2.2.	Objetivos específicos.....	17
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1.	Desenvolvimento sustentável e a química verde.....	17
3.2.	Introdução à nanotecnologia.....	19
3.3.	Nanopartículas metálicas.....	20
3.3.1.	Propriedades ópticas	21
3.3.2.	Métodos de síntese de nanopartículas metálicas	22
3.3.2.1.	Métodos físicos (<i>top-down</i>).....	22
3.3.2.2.	Métodos químicos e biológicos (<i>bottom-up</i>).....	23
3.4.	Nanopartículas de prata (AgNPs).....	24
3.4.1.	Síntese verde de nanopartícula de prata com plantas	24
3.6.	Poluição por metais pesados e seus impactos ambientais	27
3.6.1.	Metais potencialmente tóxicos	27
3.7.	Nanosensores colorimétricos.....	29
4.	METODOLOGIA.....	30
4.1.	Materiais	30
4.2.	Soluções estoque	31
4.3.	Preparo do extrato de <i>Turnera subulata</i>	31
4.4.1.	Condições ideais de síntese das TS-AgNPs	31
4.4.2.	Síntese das nanopartículas de prata (AgNPs).....	32
4.4.3.	Caracterização físicas e químicas das TS-AgNPs biossintetizadas.....	33
4.4.4.	Avaliação da estabilidade	34
4.5.	Nanosensor colorimétrico.....	34
4.5.1.	Seletividade e sensibilidade de detecção colorimétrica dos íons metálicos.....	34
4.5.2.	Estudo cinético	35
4.5.3.	Teste de interação com matriz complexa	36
5.	RESULTADO E DISCUSSÕES.....	36

5.1. Nanopartículas de prata	36
5.1.1. Condições ideais de síntese das TS-AgNPs	36
5.1.2. Síntese das AgNPs mediada por T. Subulata	36
5.1.3. Caracterização das TS-AgNPs sintetizadas	38
5.1.4. Avaliação da estabilidade das TS- AgNPs	41
5.1.4.1. Ao longo do tempo	41
5.1.4.2. Em diferentes concentrações de pH	45
5.1.4.3. Em diferentes concentrações de salinidade	46
5.2. Nanosensor colorimétrico	47
5.2.1. Estudos de sensibilidade e seletividade	47
5.2.2. Estudo cinético da reação	51
5.2.3. Teste de interação com matriz complexa	52
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
7. REFERÊNCIAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Arbustos, folhas e flor da <i>Turnera subulata</i> Sm.....	26
Figura 2- Representação do processo para obtenção do extrato de folhas de <i>Turnera subulata</i> Sm.	31
Figura 3- Representação do processo de síntese de nanopartículas de prata utilizando o extrato aquoso de <i>T. Subulata</i> (TS- AgNPs).	33
Figura 4 - Síntese e caracterização de nanopartículas de prata utilizando extrato vegetal: análise visível e espectral.	37
Figura 5- Potencial Zeta das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs).	38
Figura 6 - Distribuição de tamanho das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) por DLS.....	39
Figura 7- Imagens de microscopia eletrônica de transmissão das nanopartículas biossintetizadas (TS- AgNPs).....	41
Figura 8- Estabilidade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) armazenadas sem luz e sob refrigeração.....	42
Figura 9 - Estabilidade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) armazenadas sem luz e sem refrigeração.....	43
Figura 10 - Estabilidade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) armazenadas sob luz e sem refrigeração.	43
Figura 11 - Estabilidade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) expostas a diferentes concentrações de pH's.	45
Figura 12 - Estabilidade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) expostas a diferentes concentrações de salinidade.....	47
Figura 13 - Avaliação da seletividade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) para diferentes íons metálicos.....	49
Figura 14 - Variação de absorbância das TS-AgNPs na presença de íons Hg^{2+} e sua respectiva curva de calibração nas concentrações de 20 a 0,01 ppm.	50
Figura 15 - Cinética da interação do nanosensor colorimétrico com íon Hg^{2+}	51
Figura 16 - Resposta do nanosensor às diferentes condições de interferência.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores de referência para metais potencialmente tóxicos para Resolução CONAMA nº 420/2009 e nº 357/2005.....	28
Tabela 2– Variáveis e pontos para otimização da preparação das nanopartículas de prata.	32

LISTA DE SIGLAS

AgNP – Nanopartículas de prata

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

d.nm – Diâmetro em nanômetros

DLS – Espalhamento dinâmico de luz (do inglês Dynamic Light Scattering)

IBM – IBM Zurich Research Laboratory

keps – Kilocontagem por segundo

LOD – Limite de detecção (do inglês Limit of Detection)

LOQ – Limite de quantificação (do inglês Limit of Quantification)

LSPR – Superfície localizada de ressonância de plasmon (do inglês Localized surface plasmon resonance)

mV –Milivolt

nm – Nanômetro

pH – Potencial hidrogeniônico

ppm – Partes por milhão

TEM – Microscopia de transmissão eletrônica (do inglês Transmission Electron Microscopy)

TS-AgNP – Nanopartículas de prata produzidas a partir de extrato de *T. subulata*

UV - Vis – Espectrofotometria Ultra-Violeta no visível

µL – Microlitros

1. INTRODUÇÃO

A água, como recurso vital para a sustentabilidade e equilíbrio dos ecossistemas, desempenha um papel crucial na manutenção da vida. Diante da crescente pressão exercida por atividades antropogênicas, a preservação da qualidade da água torna-se uma prioridade essencial para a preservação ambiental e a saúde humana. Embora seja essencial à vida, a água pode apresentar contaminações de diversas formas, o que pode comprometer a sua qualidade (Ganeshkumar et al., 2018).

No Brasil, as principais fontes de contaminação da água são os esgotos lançados em rios e lagos, os aterros sanitários sem infraestrutura, garimpos com o despejo de materiais tóxicos e metais pesados, resíduos industriais, e a agricultura com os agrotóxicos, que se fixam no solo contaminando águas subterrâneas e que escoam com a irrigação sendo arrastados para os rios e lagos (Ali; Khan; Sajad, 2013; Haldar; Ghosh, 2020). A contínua produção de resíduos provenientes dessas fontes poluidoras e a perturbação dos ciclos biogeoquímicos naturais tem gerado preocupação em relação à contaminação ambiental por poluentes químicos, com destaque para metais pesados e compostos orgânicos persistentes (Patra et al., 2007; Zhao; Xie, 2018).

Esses metais acumulam-se ao longo da cadeia alimentar, provocando efeitos tóxicos em organismos vivos, devido à sua natureza não biodegradável (Ali; Khan; Sajad, 2013; Shan et al., 2019). A exposição prolongada a esses elementos pode levar ao desenvolvimento de diversas patologias, incluindo disfunções renais, neurológicas e cardiovasculares, com a gravidade variando conforme o tipo de metal, a dose de exposição e a susceptibilidade individual (Ali; Khan; Sajad, 2013; Rehman et al., 2017). Mesmo íons metálicos considerados essenciais, como Cu^{2+} , Zn^{2+} e Fe^{3+} , podem oferecer riscos à saúde e ao meio ambiente em altas concentrações, resultando em estresse oxidativo, danos celulares e desregulação de funções biológicas (Sharma *et al.*, 2019). No ambiente aquático, a presença desses metais induz toxicidade em organismos, resultando na degradação de habitats e na redução da biodiversidade (Kiran Marella; Saxena; Tiwari, 2020).

Metais como mercúrio (Hg), chumbo (Pb), cádmio (Cd) e arsênio (As) acumularam-se ao longo do tempo, especialmente em espécies no topo da cadeia alimentar, como peixes e aves predadoras. Esse processo de bioacumulação é agravado pela biomagnificação, em que a concentração dos metais aumenta a cada nível trófico, aumentando os riscos para organismos de diferentes níveis da cadeia alimentar (Marella;

Saxena; Tiwari, 2020). Além de seus impactos diretos sobre a biodiversidade, esses metais interferem nos ciclos biogeoquímicos essenciais dos ecossistemas aquáticos, comprometendo processos como a solubilidade de nutrientes e a dinâmica do oxigênio, fatores cruciais para a saúde e o equilíbrio ecológico (Singh et al., 2011). Essas interferências causam desequilíbrios na cadeia alimentar e reduzem a capacidade dos ecossistemas aquáticos em sustentarem uma diversidade saudável de organismos.

Atualmente, existe um consenso universal a respeito da necessidade de monitorar continuamente o teor de contaminantes químicos nos cursos de águas naturais. Nessa perspectiva, diversos métodos têm sido empregados para a detecção desses elementos em várias matrizes ambientais. Entre os mais comuns estão a espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) (De Freitas et al., 2015), espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) (Heltai et al., 2019), espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-AES) (Evans, 2005), espectroscopia de absorção atômica (AAS) (Saleh, 2020) e espectroscopia de fluorescência atômica (CV-AFS) (Amais; Rocha; Nóbrega, 2017). No entanto, apesar de sua precisão, essas abordagens são frequentemente complexas, caras e exigem infraestrutura laboratorial avançada (Jin et al., 2020). Essas limitações destacam a necessidade do desenvolvimento de métodos alternativos que sejam mais acessíveis, mas igualmente rápidos, seletivos e sensíveis.

Nesse contexto, combinando eficiência, portabilidade e acessibilidade, destacam-se os nanosensores. Esses dispositivos nanométricos são capazes de detectar e monitorar características em escalas moleculares com rápida resposta (Leong et al., 2022). Podem ser produzidos com diversos materiais e aplicados em áreas como monitoramento ambiental para detecção de metais pesados em amostras de água, segurança alimentar para análise de ácidos graxos, e até mesmo em diagnósticos médicos (Ahmed; Kabir; Xiong, 2020; Almeida et al., 2015; Cancino; Marangoni; Zucolotto, 2014). Na detecção de metais pesados, por exemplo, podem gerar respostas visuais ou de sinal na presença desses elementos, oferecendo uma abordagem sensível e seletiva para análise (Ahmed; Kabir; Xiong, 2020; Piriya et al., 2017).

A capacidade de fornecer resposta visual em função de mudanças moleculares específicas, é uma característica dos sensores colorimétricos (Yang; Ge, 2023). Esses sensores são projetados para modificar sua cor quando expostos a determinadas substâncias ou condições, permitindo a detecção visual ou por meio de instrumentação (Fakayode et al., 2023). Esses sensores se destacam por não exigirem equipamentos

sofisticados ou mão de obra altamente especializada. A simplicidade de uso e a capacidade de operar em campo, sem a necessidade de preparação laboratorial complexa, os tornam uma ferramenta valiosa para monitoramento ambiental em tempo real (Alberti et al., 2020).

Existem vários tipos de nanosensores colorimétricos, cada um com suas próprias características e aplicações específicas. As nanopartículas, estruturas com dimensões entre 1 e 100 nanômetros, são amplamente exploradas como sensores colorimétricos devido propriedades únicas referentes à alta razão superfície-área-volume (Altammar, 2023; HAO et al., 2023; LU, 2022; Patel et al., 2023; Sapyen et al., 2022). Sua síntese pode ser realizada através de métodos químicos, que utilizam agentes redutores químicos (Duman et al., 2024); métodos físicos, que envolvem técnicas complexas como a condensação em gás inerte e a ablação a laser (Kumari et al., 2023); ou métodos biológicos, que utilizam extratos de plantas, bactérias ou fungos para reduzir e estabilizar as nanopartículas pela ação de biocompostos presentes na solução, promovendo a síntese com menor impacto ambiental quando comparada a outras rotas e sem o uso de agentes tóxicos (Adio et al., 2016).

A *Turnera Subulata* Sm, uma planta nativa de regiões tropicais e subtropicais, destaca-se como uma opção promissora para a síntese verde de nanopartículas devido à sua rica composição de compostos fenólicos, como flavonoides e taninos (Costa, 2023; Parra-Naranjo et al., 2023). Esses biocompostos antioxidantes presentes no extrato vegetal têm a capacidade de reduzir íons de prata (Ag^+) a prata metálica (Ag^0) e de estabilizar as nanopartículas, promovendo sua formação e prevenindo sua agregação, respectivamente (Beloni, 2016; Santos, 2017)

Diante das limitações das técnicas convencionais para a detecção desses íons metálicos em amostras ambientais e do potencial dos sensores colorimétricos baseados em nanopartículas, este trabalho tem como objetivo sintetizar e avaliar o potencial das nanopartículas de prata sintetizadas a partir do extrato aquoso das folhas da *Turnera subulata* Sm como nanosensor colorimétrico para detecção seletiva de íons metálicos em amostras de água.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Sintetizar e avaliar o potencial das nanopartículas de prata produzidas a partir do extrato aquoso das folhas da *Turnera subulata* Sm. como nanosensor colorimétrico para detecção seletiva de íon metálicos em amostras de água.

2.2. Objetivos específicos

- I. Preparar o extrato aquoso das folhas da *Turnera subulata* Sm;
- II. Otimizar as condições de síntese das nanopartículas de prata a partir de extrato aquoso das folhas de *T. subulata*;
- III. Caracterizar as AgNPs formadas quanto ao tamanho, morfologia, carga de superfície e propriedades ópticas;
- IV. Determinar a seletividade e sensibilidade das AgNPs para detecção de íons metálicos;
- V. Determinar as condições ótimas para utilização das nanopartículas de prata como sensor colorimétrico para quantificação dos íons metálicos;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Desenvolvimento sustentável e a química verde

A sustentabilidade pode ser definida como a capacidade de manutenção ou conservação de um processo ou sistema, e é um tema de crescente relevância. Na prática, refere-se às ações realizadas para atender às necessidades humanas presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias demandas (Torresi; Pardini; Ferreira, 2010). O desenvolvimento sustentável só é possível se houver a integração de três princípios: o social, o econômico e o ambiental, também conhecidas como *triple bottom line*, nos termos de Elkington (2004).

O primeiro princípio está relacionado às condições de vida das pessoas, abordando aspectos como educação, saúde, lazer e bem-estar. Os princípios econômicos, por sua vez, referem-se aos sistemas de produção, distribuição e consumo de bens e serviços, levando em consideração, sempre que possível, as questões sociais e ambientais. Os princípios ambientais, frequentemente associados à sustentabilidade, abordam as questões inerentes aos recursos naturais, incluindo sua utilização e preservação (Romeiro, 2012).

Com o objetivo de garantir o progresso científico sustentável, foi desenvolvido o conceito de Química Verde, que se foca na criação de processos e produtos químicos que minimizem ou eliminem a geração de substâncias perigosas, promovendo práticas sustentáveis que protejam tanto a saúde humana quanto o meio ambiente (Tundo et al., 2000). Esse campo emergiu como resposta às crescentes preocupações sobre o impacto dos resíduos industriais e a toxicidade no final do século XX, tornando-se essencial para o avanço das iniciativas de sustentabilidade em diversos setores, como manufatura, agricultura e saúde pública (Jeurissen, 2000; Romeiro, 2012).

Com o avanço do movimento ambientalista, as inter-relações entre justiça social, gestão de recursos e saúde ambiental tornaram-se cada vez mais evidentes, destacando-se como pilares na discussão sobre sustentabilidade (Dalla; Portanova, 2014). Essa interação moldou as discussões atuais sobre sustentabilidade e a necessidade de uma economia limpa e de base biológica, representando uma evolução significativa no pensamento e na prática ambiental, desde os primeiros movimentos de conservação até os dias atuais (Romeiro, 2012).

A química verde é guiada por doze princípios que visam minimizar os impactos ambientais e de saúde dos processos químicos. Esses princípios foram desenvolvidos por Paul Anastas e John Warner na década de 1990 e servem como base para o desenvolvimento de processos químicos que sejam eficientes e sustentáveis (Anastas; Eghbali, 2009; Jeurissen, 2000). Conforme ressaltado por Lenardão et al. (2003), os doze princípios operam como um marco conceitual na configuração e no desenvolvimento de produtos e processos de síntese voltados à prevenção de problemas socioambientais. São eles:

- a) é melhor prevenir que tratar os resíduos provenientes de processos químicos;
- b) os métodos sintéticos devem ser projetados para maximizar a incorporação de toda a massa dos reagentes no produto;
- c) sempre que forem viáveis, as rotas sintéticas devem utilizar e gerar substâncias com a menor toxicidade possível à vida humana e ao meio ambiente;
- d) os produtos químicos devem ser projetados de forma a ter a maior eficiência no cumprimento de seus objetivos, com menor toxicidade;
- e) o uso substâncias auxiliares do processo (como solventes, agentes de separação, etc.) deve, sempre que possível, ser desnecessário ou inofensivo;

f) as exigências energéticas devem ser reconhecidas por seus impactos ambientais e econômicos, e precisam ser minimizadas. As rotas sintéticas devem, sempre que possível, ser conduzidas à temperatura e pressão ambientes;

g) a matéria-prima deve ser proveniente de fontes renováveis;

h) deve-se planejar a metodologia de modo a não precisar de reações de derivatização como grupos de proteção;

i) catalisadores são sempre superiores a reagentes convencionais;

j) os produtos químicos devem ser projetados de maneira tal que, depois de terem sido utilizados, eles não persistam no meio ambiente e que seus produtos de degradação sejam inócuos;

k) os métodos analíticos devem ser desenvolvidos para monitorar o processo em tempo real controlando, a priori, a formação de substâncias perigosas;

l) as substâncias e a forma como são usadas no processo químico devem minimizar o potencial de acidentes.

A implementação efetiva desses princípios requer colaboração entre vários setores da sociedade, onde a integração dessas práticas surge como estratégia-chave para promover o crescimento econômico, ao mesmo tempo em que mitiga os impactos ambientais (Anastas; Eghbali, 2009), não sendo apenas essenciais para abordar questões ambientais contemporâneas, mas também importantes para promover um futuro sustentável (Souza, 2019).

3.2.Introdução à nanotecnologia

Nanotecnologia se refere à manipulação, design e aplicação de materiais na nanoescala, tipicamente dentro da faixa de 1 a 100 nanômetros (Baig et al., 2021). Esta área interdisciplinar combina princípios de física, química, biologia e engenharia para explorar as particularidades estruturais e funcionais dos materiais em escala reduzida (Altammar, 2023), com implicações significativas em setores como o ambiental, médico, eletrônico e de ciência de materiais (Ahmed; Kabir; Xiong, 2020; Almeida et al., 2015; Vashist et al., 2024).

O termo "nanômetro" foi introduzido pela primeira vez em 1914 por Richard Adolf Zsigmondy (Ferreira; Rangel, 2009), mas foi somente em 1959 que o conceito de nanotecnologia foi notavelmente articulado pelo físico americano Richard Feynman. Durante sua palestra seminal intitulada "*There's Plenty of Room at the Bottom*",

apresentada em uma reunião da *American Physical Society*, Feynman propôs a ideia de manipular átomos e moléculas individuais (Feynman, 2018). Este discurso tornou-se um marco, inspirando gerações futuras a explorar essa área emergente (Bayda et al., 2019).

A década de 1980 marcou um progresso significativo no campo com o desenvolvimento de ferramentas críticas para manipular e gerar imagens de materiais na nanoescala (Bayda et al., 2019). O microscópio de tunelamento de varredura (STM), inventado por Gerd Binnig e Heinrich Rohrer no IBM *Zurich Research Laboratory* em 1981, permitiu que cientistas visualizassem superfícies no nível atômico (Binnig et al., 1982). Esta inovação recebeu o prêmio nobel de física em 1986, ressaltando sua importância na pesquisa em nanotecnologia. Binnig, junto com Calvin Quate e Christoph Gerber, também desenvolveu o microscópio de força atômica (AFM) em 1986, que expandiu ainda mais as capacidades em investigações em nanoescala (Binnig; Quate; Gerber, 1986).

Na década de 1990, o interesse pela nanotecnologia cresceu significativamente, impulsionado pela descoberta dos fulerenos em 1985 – uma nova classe de alótropos de carbono com propriedades únicas, que revolucionaram a ciência dos materiais e a nanomedicina (Binnig; Quate; Gerber, 1986; Kroto et al., 1985). Essas descobertas não apenas ampliaram as fronteiras do conhecimento, mas também estimularam o desenvolvimento de novas aplicações nanotecnológicas, fomentando a transformação de tecnologias existentes e a criação de inovações disruptivas (Altammar, 2023; Bayda et al., 2019).

Com o aumento da área nanotecnológica, os debates sobre suas implicações éticas e os riscos potenciais à saúde humana e ao meio ambiente se intensificaram (Boczkowski; Hoet, 2010; Cancino; Marangoni; Zucolotto, 2014; Service, 2004). As propriedades únicas dos nanomateriais, que diferem significativamente dos materiais em escala macro, como maior reatividade química e a capacidade de atravessar barreiras biológicas, levantam preocupações sobre a toxicidade e o comportamento imprevisível desses materiais nos organismos e no ambiente (Altammar, 2023; Whitesides, 2003). Nesta perspectiva, embora a nanotecnologia apresente potencialidades em diversas aplicações, como eletrônica, medicina e energia (Da Costa; Da Costa, 2021), ela também suscita questões éticas e riscos potenciais que precisam ser cuidadosamente avaliados.

3.3. Nanopartículas metálicas

As nanopartículas metálicas têm atraído grande interesse entre pesquisadores devido às suas propriedades elétricas, magnéticas e ópticas únicas, resultantes do fenômeno de ressonância plasmônica de superfície (Teixeira, 2018). Essas propriedades estão diretamente ligadas a características como o tamanho, a forma, a concentração e o estado de agregação das partículas, sendo ajustáveis por meio de parâmetros de síntese específicos (Khan; Saeed; Khan, 2019). Dois fatores fundamentais sustentam essas propriedades: a elevada razão superfície/volume e o confinamento quântico (Santos et al., 2020). A primeira resulta da combinação entre o baixo volume e a ampla área superficial das nanopartículas, o que proporciona uma grande área de contato com menor massa (Guisbiers; Mejía-Rosales; Leonard Deepak, 2012). O segundo fator, o confinamento quântico, está relacionado aos efeitos quânticos que emergem quando os materiais são reduzidos à escala nanométrica (Joudeh; Linke, 2022).

Características como maiores áreas superficiais específicas, propriedades ópticas distintas, pontos de fusão reduzidos, resistências mecânicas aprimoradas e magnetizações são inerentes a essa classe de materiais (Hove, 2009). A estrutura metálica, definida por retículos cristalinos, envolve cada átomo com 8 ou 12 átomos do mesmo metal, gerando atrações uniformes, exceto nas laterais. A presença de 1, 2 ou 3 elétrons na camada de valência gera elétrons livres, movendo-se pelo reticulado via ligação metálica e mantendo a coesão atômica (Dos Santos; Grasseschi, 2021). Essa estrutura reticulada e ligação química influenciam propriedades metálicas, desempenhando papel crucial na produção de nanopartículas metálicas pela agregação entre átomos e nucleação facilitadas pelos elétrons livres (Fogaça, 2017).

Apesar dos avanços tecnológicos, persistem desafios significativos a serem superados. Um desses desafios reside na necessidade de garantir a estabilidade de longo prazo das nanopartículas metálicas, evitando a perda de suas propriedades ou alterações estruturais, uma vez que essas partículas são naturalmente termodinamicamente instáveis e propensas à agregação. Portanto, há uma busca intensiva por novos métodos de síntese e funcionalização das mesmas, visando aprimorar sua estabilidade química (Horikoshi; Serpone, 2017; Moraes, 2019).

3.3.1. Propriedades ópticas

As ópticas das nanopartículas são resultantes da mobilidade dos elétrons nos metais. Quando uma onda de luz incide sobre um campo eletromagnético oscilante e atinge a superfície desse campo elétrico, os elétrons móveis são impulsionados para frente e para trás (Duarte et al., 2018). Essa oscilação dos elétrons resulta na emissão de luz,

representando essencialmente a remissão da luz incidente. Os elétrons oscilam em sintonia com a luz incidente, emitindo luz com a mesma frequência, o que significa que a cor da radiação refletida pelo metal corresponderá à cor da luz incidida (Hove, 2009; Kvasnička; Homola, 2008).

Em virtude dessas condições, cada solução coloidal de nanopartículas metálicas reflete uma cor específica. Por exemplo, as soluções de nanopartículas de ouro exibem uma tonalidade roxa, enquanto as de prata assumem uma coloração amarela. Isso ocorre devido aos efeitos quânticos e à ressonância plasmônica de superfície (SPR) (Willeits; Van Duyne, 2007). A ressonância é o fenômeno que emerge quando a frequência dos elétrons de condução oscila em resposta ao campo elétrico alternante da radiação eletromagnética incidente (Chung et al., 2011). Este fenômeno é restrito a dimensões reduzidas do condutor, não sendo observado para o mesmo material em escalas macroscópicas (Santos *et al.*, 2016).

Para além das características intrínsecas das nanopartículas metálicas, o meio no qual as partículas metálicas nanoestruturadas estão dispersas desempenha um papel crucial (Ferreira; Rangel, 2009). Fatores como a forma, o índice de refração do meio e a distância entre as nanopartículas metálicas exercem influência nas suas propriedades espectrais e ópticas (Anker et al., 2008). A avaliação desses aspectos frequentemente é realizada por meio de técnicas de caracterização, destacando-se a espectrofotometria UV-Vis (ultravioleta-visível) (Kusuma et al., 2023; Memon et al., 2022; Piriya et al., 2017).

3.3.2. Métodos de síntese de nanopartículas metálicas

Do ponto de vista tecnológico, os métodos empregados na produção de nanopartículas metálicas e nanomateriais em geral podem ser categorizados em duas classes. A primeira é o método Top-down (de cima para baixo), que se fundamenta na desagregação de estruturas maiores, utilizando técnicas de nanofabricação para cortar, moer e modelar materiais até alcançar a escala nanométrica. A segunda classe é o método Bottom-up (de baixo para cima), que explora as propriedades químicas de átomos individuais, induzindo sua organização e formação de uma estrutura em nanoescala (Baig et al., 2021; Mittal; Chisti; Banerjee, 2013).

3.3.2.1. Métodos físicos (*top-down*)

As sínteses físicas, embora menos frequentes, utilizam a abordagem top-down, na qual as nanopartículas são geradas pela manipulação do material em sua forma macro até atingir o tamanho desejado. A redução de tamanho para a escala nanométrica é alcançada

por meio de técnicas especializadas, como decomposição térmica, moagem mecânica, gravação e corte (Biswas et al., 2012). A escolha da técnica apropriada depende da composição química e das características finais desejadas (Lima, 2019).

O método físico é uma técnica extremamente versátil, na qual os átomos podem se autoagrupar e autoorganizar para formar estruturas nanométricas. No entanto, controlar precisamente o tamanho e as formas nessas condições é mais desafiador, requerendo elevadas temperaturas e um considerável consumo de energia, o que torna o processo produtivo mais dispendioso (Cao, 2004; Fu et al., 2018).

3.3.2.2. Métodos químicos e biológicos (*bottom-up*)

A síntese de nanopartículas metálicas também é realizada por métodos químicos e biológicos, predominantemente seguindo a abordagem "*bottom-up*". Essa técnica envolve a manipulação individual de átomos e moléculas agregando-os até atingirem os tamanhos apropriados para cada nanomaterial (Fu et al., 2018). Os métodos químicos e biológicos de produção de nanopartículas podem envolver reações eletroquímicas, assim como redução química utilizando diferentes agentes e organismos biológicos (De Oliveira et al., 2020; Indiartho et al., 2021).

Os métodos químicos são amplamente preferidos, especialmente quando se busca um controle mais preciso do tamanho e da forma das nanopartículas (Panigrahi et al., 2004). Nesse tipo de síntese, uma fonte de íons é empregada para gerar *clusters*, os quais são formados por meio de redução induzida por um agente redutor específico em solução. Além disso, agentes estabilizadores são frequentemente empregados para prolongar a estabilidade coloidal e proporcionar um maior controle sobre a geometria das nanopartículas (Hyeon, 2003; Talapin; Shevchenko, 2016). Muitos agentes redutores podem ser utilizados entre os quais estão, citrato de sódio (Cândido et al., 2022), borohidreto de sódio (Rodrigues et al., 2019) e hidrazina (Vieira et al., 2005).

O método biológico emergiu da preocupação com a saúde, biocompatibilidade e sustentabilidade ambiental (Sharma; Yngard; Lin, 2009). As sínteses biológicas têm como fonte de agentes redutores e estabilizadores extratos de fungos (Crescentino et al., 2024; Gomes et al., 2020), bactérias (Oliveira et al., 2019; Varanda et al., 2022) ou plantas (Ahmed; Kabir; Xiong, 2020; Mittal; Chisti; Banerjee, 2013a). Nesse método de síntese, as nanopartículas são produzidas por agentes que estão naturalmente presentes nos organismos biológicos empregados.

3.4. Nanopartículas de prata (AgNPs)

A obtenção de AgNPs é frequentemente realizada por meio da reação de redução em meio aquoso. Nessa reação simples, os cátions de prata (Ag^+) são reduzidos para seu estado neutro (Ag^0). Os átomos resultantes colidem, formando um núcleo estável que inicia o processo de nucleação. Em seguida, ocorre o crescimento, no qual mais átomos colidem, formando partículas maiores e, por fim, as AgNPs. O produto final dessas reações é uma solução coloidal contendo nanopartículas de até 100 nm (EL-SAYED, 2001; Erdemir; Lee; Myerson, 2009). Esse método é denominado co-precipitação devido à sua associação com fenômenos como redução, nucleação, crescimento e aglomeração (Gebauer; Cölfen, 2011).

As suspensões de AgNPs são reconhecidas por exibir um pico pronunciado de absorção de radiação na faixa de comprimentos de onda entre 400-670 nm, sendo este fenômeno atribuído à sua ressonância plasmônica de superfície (Willeits; Van Duyne, 2007). Em virtude disso, uma variação de cor característica é observada em soluções dispersas de AgNPs, variando de marrom avermelhado a marrom escuro, dependendo do tamanho das partículas produzidas e da composição do meio de dispersão (Anker et al., 2008; Chung et al., 2011).

3.4.1. Síntese verde de nanopartícula de prata com plantas

Nos últimos 30 anos, as plantas têm despertado interesse entre os pesquisadores e são alvo de exploração sistemática para a biossíntese de AgNPs, utilizando extrato vegetal. Essa abordagem é preferida devido à sua natureza isenta de solventes e menor toxicidade em relação a métodos convencionais de síntese química, que frequentemente utilizam agentes redutores e estabilizantes tóxicos, como hidrazina, borohidreto de sódio e citrato (Makarov et al., 2014; Mittal; Chisti; Banerjee, 2013).

A redução de um íon metálico por um extrato vegetal é conhecida desde o início do século XX, apesar do processo de redução ainda não ser claramente elucidado, geralmente envolve a mistura de um extrato vegetal natural com a solução aquosa de sal metálico (Baig et al., 2021; Mittal; Chisti; Banerjee, 2013). Entretanto, sabe-se que a biossíntese por plantas, em geral, é realizada por uma combinação de compostos bioativos, como alcaloides, fenóis, taninos, terpenóides, aminoácidos, polissacarídeos, além de metabólitos secundários como flavonoides, ácido tânico e terpenoides, os quais agem como agentes redutores e estabilizantes (Ahmed et al., 2016; Ali et al., 2016; Altammar, 2023).

A produção das AgNPs mediadas por biomoléculas se inicia com a adição do extrato vegetal e um sal precursor de prata em meio aquoso onde ocorre o processo químico de biorredução (Adio et al., 2016). Esse processo é intermediado por diferentes compostos fitoquímicos que transformam o íon prata em prata metálica através de uma reação de oxirredução. Posteriormente, os átomos de prata recém reduzidos começam a se agregar, formando as primeiras nanopartículas de prata em suspensão (Rai, 2013)

Na sequência, mais íons prata são reduzidos e estes se agregam ao redor das nanopartículas previamente formadas. Tais etapas podem ser controlada através de diferentes fatores, como temperatura, pH e concentração dos reagentes (Singh et al., 2018). Por fim, parte das biomoléculas do extrato vegetal se aderem à superfície das nanopartículas, evitando o crescimento e aglomeração das nanoestruturas (Ebrahimezhad et al., 2017).

Várias pesquisas já foram realizadas, utilizando os mais diversos tipos de extratos para síntese de nanopartículas, tais como os de aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius*) (Ferreira, 2021; Lurdes, 2023), bagaço de *Vitis labrusca* (cultivar Ives) (Raota, 2018), margarida (*Calendula officinalis*)(Santos, 2017), tucumã (*Astrocaryum aculeatum*) (Santos, 2022), algas (*Crassiphycus birdiae*) (De Medeiros et al., 2021).

3.5. Planta de interesse: *Turnera subulata* Sm.

A família Passifloraceae é representada por 12 gêneros e aproximadamente 220 espécies, com distribuição nas Américas e na África (Muschner et al., 2012; Thulin et al., 2012). No Brasil, destacam-se os dois maiores gêneros dessa família, Piriqueta e *Turnera*, os quais abrangem 155 espécies (Arbo, 2005). O gênero *Turnera*, por sua vez, engloba 135 espécies que se distribuem em regiões tropicais e subtropicais da América, além de partes da África (Arbo, 2005; Muschner et al., 2012; Thulin et al., 2012).

Popularmente conhecida como "Chanana", é uma planta herbácea que cresce espontaneamente, apresentando alta resistência a condições adversas. É amplamente encontrado nas regiões Norte e Nordeste do Brasil (Costa, 2023). A espécie é reconhecida por suas propriedades medicinais, que incluem atividades antioxidantes, anti-inflamatórias, antiulcerogênicas e antibacterianas (Parra-Naranjo et al., 2023; Souza, 2017). Essas características tornam-se relevantes no campo farmacêutico, especialmente devido à presença de compostos bioativos como flavonoides, alcaloides, taninos e compostos fenólicos, que são fundamentais para suas atividades biológicas (Moreira, 2023).

Ainda, segundo Passos (2019), a espécie é classificada como uma planta PANC (Planta Alimentícia Não Convencional). Suas folhas e flores podem ser utilizadas no preparo de saladas e geleias (Passos, 2019). Kinupp *et al.* (2021) destacam o uso das flores em saladas, saladas de frutas e na decoração de drinks, além da utilização das folhas secas ou frescas como substitutas do chá verde. As folhas secas e moídas também servem como tempero aromatizante (Kinupp *et al.*, 2021). A utilização das plantas PANC poderia ser mais eficiente, porém, a falta de conhecimento da população faz com que muitas dessas plantas sejam vistas como ervas daninhas, sendo facilmente descartadas ou ignoradas (Liberato; Lima; Silva, 2019).

Do ponto de vista morfológico, trata-se de um subarbusto ereto ramificado, com porte pequeno, atingindo até 80 cm de altura, e apresenta floração ao longo de todo o ano. As folhas desta espécie são simples, alternas, as margens são serreadas, com pecíolo variando de 0,4 a 1,9 cm de comprimento (Arbo, 2005). Flores, axilares solitárias e terminais, possuem cinco pétalas branco-amareladas (Figura 1), abrindo apenas na parte da manhã, depois de receber a luz direta do sol (Soares; Florêncio; Silva, 2023). Desenvolve-se em solos arenosos ou pedregosos e, até mesmo, em solos argilosos e secos (Arbo, 2005; Muschner *et al.*, 2012; Thulin *et al.*, 2012).

Figura 1- Arbustos, folhas e flor da *Turnera subulata* Sm.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Os compostos fenólicos, flavonoides e taninos presentes em *T. subulata* desempenham um papel crucial na síntese verde de nanopartículas. Esses metabólitos secundários atuam como agentes redutores e estabilizantes na formação AgNPs. Durante

a síntese, os íons Ag^+ são reduzidos a Ag^0 pela ação dos compostos antioxidantes presentes no extrato aquoso da planta. A capacidade de moléculas dos flavonoides em doar elétrons ou átomos de hidrogênio promove a redução dos íons metálicos. Simultaneamente, os taninos e compostos fenólicos estabilizam as nanopartículas, evitando sua aglomeração e garantindo uma dispersão uniforme (Ahmad *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2018).

Diversos trabalhos exploram a utilização de *Turnera subulata* Sm na síntese de nanopartículas metálicas e de óxidos com aplicações diversas. Batista (2024) destacou a utilização do extrato da planta para a produção de nanopartículas de óxido de cobre, incorporadas em filmes poliméricos para aplicações biomédicas, incluindo propriedades antibacterianas e cicatrizantes (Batista, 2024). Por outro lado, Govindarajulu *et al.* (2017) sintetizaram nanopartículas de prata, evidenciando sua eficácia como larvicidas contra *Culex quinquefasciatus* (Govindarajulu *et al.*, 2017).

Thenmozhi *et al.* (2023) avaliaram as AgNPs sintetizadas e demonstraram propriedades antimicrobianas, antioxidantes, citotóxicas e anticancerígenas contra células de adenocarcinoma pancreático (PANC-1) (A *et al.*, 2023). Além disso, nanopartículas de óxido de zinco obtidas com extratos da planta demonstraram excelente desempenho fotocatalítico na degradação de corantes orgânicos sob luz solar, evidenciando sua aplicabilidade ambiental (Vivekraj; Gideon, 2018). Esses estudos reforçam o potencial da planta na síntese verde de nanopartículas com usos que abrangem desde saúde pública até remediação ambiental.

3.6. Poluição por metais pesados e seus impactos ambientais

3.6.1. Metais potencialmente tóxicos

Os metais potencialmente tóxicos são contaminantes químicos não biodegradáveis que tendem a se acumular em organismos vivos, causando distúrbios e várias enfermidades. Esses elementos são continuamente introduzidos no ambiente, afetando a qualidade do solo e da água (Campos; Silva; Warden, 2021; Manzini; Sá; Plicas, 2010). As principais fontes de metais incluem emissões pontuais e difusas, como efluentes de áreas urbanas e industriais, deposição atmosférica e escoamento superficial urbano e agrícola (Manzini; Sá; Plicas, 2010). Outros exemplos são resíduos de construção civil, partículas geradas pelo desgaste de pneus, lonas de freio e asfalto, além de resíduos de combustíveis, óleos e graxas depositados por veículos (Broska *et al.*, 2010; Drumm *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2019).

Alguns metais são essenciais à vida em pequenas quantidades; no entanto, elevadas concentrações desses elementos podem comprometer a qualidade do solo, da água e dos ciclos biogeoquímicos essenciais à manutenção dos ecossistemas (Manzini; Sá; Plicas, 2010). Os impactos dos metais em organismos incluem alterações metabólicas, imunossupressão, distúrbios reprodutivos (Manzini; Sá; Plicas, 2010; Moschem; Gonçalves, 2020) e bioquímicos (Moschem; Gonçalves, 2020). Além disso, podem interferir nos ciclos de nutrientes e na produtividade primária dos ecossistemas aquáticos, afetando os ciclos biogeoquímicos ao alterar processos naturais como a oxidação e redução, a ciclagem de nutrientes e a solubilidade de minerais, exacerbando a contaminação a longo prazo (Barros *et al.*, 2009; Belluta *et al.*, 2008).

No Brasil, os parâmetros para concentrações de metais potencialmente tóxicos em solos e águas são estabelecidos por resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Para solos, a Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009, define valores orientadores para substâncias químicas, incluindo metais pesados. Para águas, a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, estabelece as diretrizes para a classificação dos corpos d'água e os limites máximos permitidos de substâncias químicas, incluindo metais pesados, conforme o uso preponderante da água (abastecimento humano, recreação, preservação da vida aquática, entre outros). Abaixo, apresenta-se a tabela 1 com alguns desses valores:

Tabela 1- Valores de referência para metais potencialmente tóxicos para Resolução CONAMA nº 420/2009 e nº 357/2005.

Metais	Solo (mg/kg de peso seco) ¹	Água Doce (mg/L) ²	Água Salina (mg/L) ²
Arsênio (As)	15	0,01	0,069
Cádmio (Cd)	1,3	0,001	0,04
Chumbo (Pb)	72	0,01	0,21
Cobre (Cu)	60	0,009	0,0078
Cromo (Cr)	75	0,05	1,1
Mercúrio (Hg)	0,5	0,0002	0,0018
Níquel (Ni)	30	0,025	0,074
Zinco (Zn)	300	0,18	0,12
Selênio (Se)	3,5	0,01	0,29

¹Solo: Valores de prevenção (concentração acima da qual há potencial risco de comprometimento das funções do solo) conforme a Resolução CONAMA nº 420/2009.

²Água: Valores máximos permitidos para águas de Classe 2, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005.

Dado o impacto abrangente dos metais potencialmente tóxicos nos ecossistemas e na saúde humana, torna-se evidente a necessidade de estratégias eficazes para monitorar, controlar e mitigar sua presença no ambiente (Musadis, 2024; Negrão; Oliveira; Butik, 2021; Stark, 2022). A compreensão das fontes de contaminação, dos processos de bioacumulação e biomagnificação, bem como dos efeitos nocivos nos ciclos biogeoquímicos, é fundamental para embasar políticas públicas e desenvolver tecnologias de identificação, quantificação e remediação. Investimentos em pesquisa e inovação são essenciais para minimizar os riscos associados, preservando a qualidade dos recursos naturais e protegendo a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos (Andrade, 2004) .

3.7. Nanosensores colorimétricos

Os sensores colorimétricos são dispositivos que utilizam mudanças visíveis da cor para indicar a detecção de analitos. Baseiam-se em interações químicas e físicas que induzem alterações na cor dos materiais que compõem o sensor, frequentemente de forma irreversível, oferecendo uma resposta qualitativa ou semi-quantitativa (Fakayode et al., 2023). Esses sensores podem ser confeccionados com diferentes materiais, incluindo polímeros (Carioca, 2017), compostos orgânicos (Luchesi, 2023) e, mais recentemente, nanopartículas metálicas (Fakayode et al., 2023), que têm chamado atenção devido às suas propriedades ópticas únicas (Homola; Yee; Gauglitz, 1999; Lee; Kim; Park, 2023; Willets; Van Duyne, 2007).

A funcionalidade dos sensores depende de características fundamentais. Para serem eficazes, eles precisam apresentar alta seletividade, garantindo que a resposta ocorra apenas na presença do analito alvo, sensibilidade para detectar concentrações extremamente baixas, estabilidade frente a variações ambientais e reprodutibilidade em diferentes condições experimentais (Anker et al., 2008). Além disso, o tempo de resposta e a simplicidade operacional são vantagens significativas em relação a métodos analíticos convencionais (Wendling, 2010).

Sensores baseados em nanopartículas metálicas têm recebido atenção especial devido às suas propriedades plasmônicas. A interação entre as nanopartículas e o analito pode ocorrer por ligação direta por meio de grupos funcionais específicos e agregação. O mecanismo de agregação é o mais comumente observado (Leong et al., 2022) . Na presença do analito, as nanopartículas metálicas formam aglomerados, alterando a banda plasmônica de ressonância, o que se manifesta como uma mudança de cor visível

(Grasseschi; Dos Santos, 2021). Essa propriedade permite não apenas a detecção a olho nu, mas também a quantificação precisa usando espectrofotômetros (Zhang *et al.*, 2016).

Cada analito interage de maneira única com o sensor, dependendo de suas propriedades químicas e do tipo de funcionalização presente na superfície das nanopartículas (Dos Santos; Grasseschi, 2021). Por exemplo, metais pesados podem desencadear a agregação de nanopartículas devido à formação de pontes metálicas, enquanto moléculas orgânicas podem interagir por ligações de hidrogênio ou adsorção química (Grasseschi; Dos Santos, 2021). Essa versatilidade permite a aplicação de sensores colorimétricos em diversas áreas, como o monitoramento ambiental (Alberti *et al.*, 2020; Risana *et al.*, 2024; Sakthivel; Sekar, 2020), detecção de contaminantes em alimentos (ALMEIDA *et al.*, 2015), diagnóstico de doenças (A *et al.*, 2023; Cancino; Marangoni; Zucolotto, 2014) e controle de qualidade industrial (RIBEIRO *et al.*, 2023; Teixeira; Soares; Stringheta, 2021).

4. METODOLOGIA

4.1. Materiais

Todos os produtos químicos e reagentes empregados neste trabalho eram de grau analítico e usados sem purificação adicional. O Nitrato de prata (AgNO_3 99,0%) utilizado da Sigma- Aldrich e o hidróxido de sódio (NaOH 98,0%) produzido pela Cromoline Química Fina Ltda. Os íons metálicos Manganês (Mn^{2+}), Chumbo (Pb^{2+}), Ferro (Fe^{3+}), Cromo (Cr^{3+}), Vanádio (V^{3+}), Zinco (Zn^{3+}), Cobre (Cu^{2+}), Níquel (Ni^{2+}) e Cádmio (Cd^{2+}) são da solução padrão (1000 mg/L) da Specsol® e o Magnésio (Mg), Molibdênio (Mo^{3+}), Bário (Ba^{2+}), Cálcio (Ca^{2+}), Cobalto (Co^{2+}), Mercúrio (Hg^{2+}), Alumínio (Al^{3+}), Potássio (K^+), Lítio (Li^+) e Sódio (Na^+) da ACS Científica.

As folhas frescas de *Turnera subulata* Sm foram coletadas na Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), localizada em Feira de Santana, Bahia, Brasil. Para garantir a correta identificação e preservação da espécie, o material botânico foi depositado no Herbário da própria Universidade, que está registrado no Index Herbariorum sob a sigla HUEFS e nº 285.136 garantindo a validação científica e a acessibilidade do material para futuros estudos.

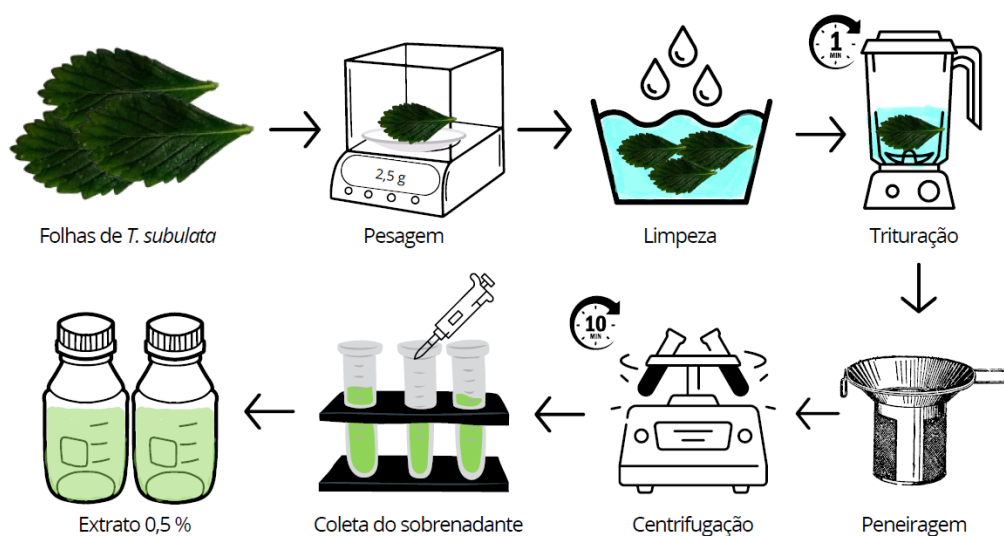
4.2. Soluções estoque

As soluções estoque de íons metálicos, assim como as de AgNO_3 a 1 mM e NaOH a 1 M, foram preparadas utilizando água ultrapura tipo I, com resistividade $\geq 18,2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$, obtida por meio do sistema de purificação PURELAB Option-R15 BP US.

4.3. Preparo do extrato de *Turnera subulata* Sm.

Para obtenção do extrato aquoso a uma concentração de 0,5%, 2,5 g de folhas frescas de *T. subulata* foram coletadas, pesadas, lavadas e posteriormente trituradas com 500 mL de água ultrapura durante 1 minuto. Após o processo de trituração, a solução obtida foi peneirada para remover o excesso de partículas maiores e, sequencialmente, submetidas a centrifugação durante 10 minutos para retirar as partículas sólidas mais densas do líquido. O sobrenadante resultante foi coletado e armazenado em frasco reagente, para posterior preparação das nanopartículas de prata. A Figura 2 ilustra o processo de obtenção do extrato de *T. subulata*.

Figura 2- Representação do processo para obtenção do extrato de folhas de *T. subulata*.



Fonte: Elaboração própria (2024).

4.4. Nanopartículas de prata

4.4.1. Condições ideais de síntese das TS-AgNPs

O processo para obtenção dos parâmetros ideais para a síntese das TS-AgNPs foi conduzido a fim de determinar as condições experimentais ideais que assegurassem uma formação eficiente, reprodutível e estável das nanopartículas. Diversos parâmetros

experimentais foram sistematicamente avaliados e ajustados, conforme descrito na Tabela 2, que apresenta as variações testadas e os pontos testados para cada parâmetro.

Tabela 2– Variáveis e pontos para otimização da preparação das nanopartículas de prata.

Variáveis	Pontos			
Volume de NaOH (μL)	50	100	200	400
Temperatura de síntese (°C)	0	60	80	100
Proporção extrato/prata (v/v)	10:10	10:5	15:5	5:15
Concentração extrato (%)	2	1	0,5	0,05

Fonte: autoria própria (2024).

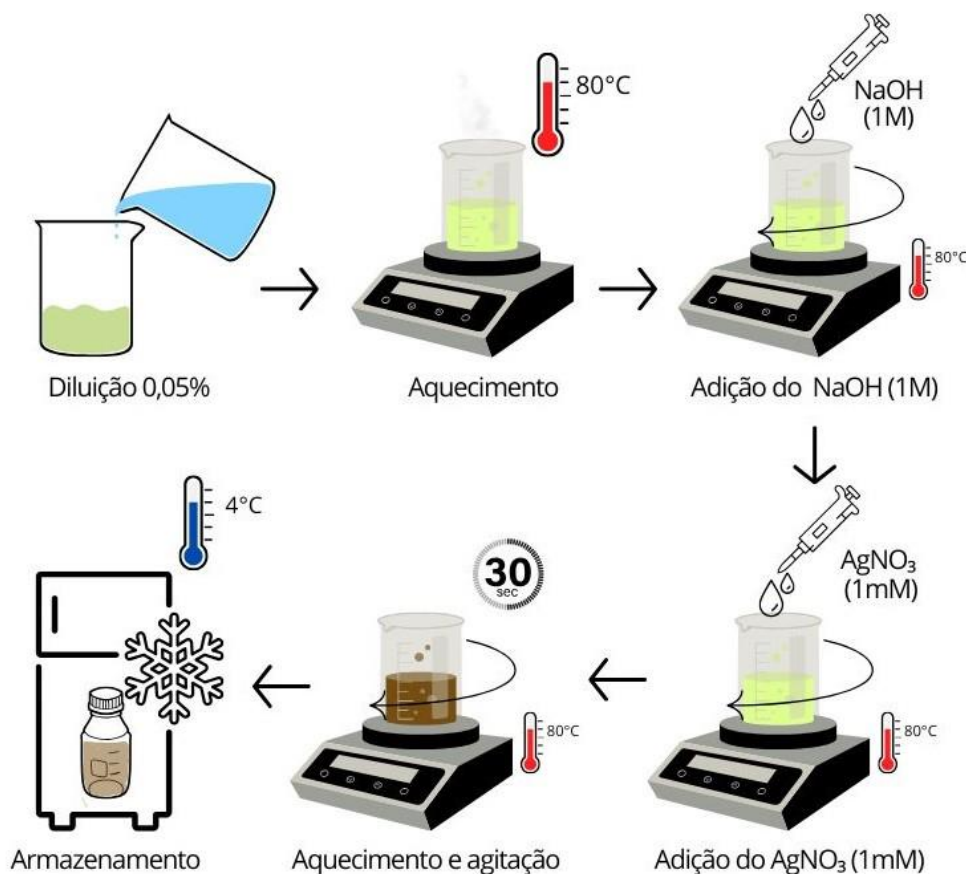
O processo incluiu a avaliação de condições como a proporção entre o extrato vegetal e a solução de prata, a concentração do extrato aquoso de *T. subulata*, a concentração da solução de nitrato de prata (AgNO_3), o volume de NaOH adicionado e a temperatura de síntese. As variações foram planejadas de forma a identificar sua influência nas nanopartículas sintetizadas.

Para o monitoramento e validação das condições de síntese, utilizou-se a espectroscopia UV-Vis, que permitiu acompanhar a formação das TS-AgNPs com a identificação do comprimento de onda correspondente ao pico plasmônico. Além disso, a mudança de cor da solução foi observada como um indicativo visual da síntese bem-sucedida, e a microscopia eletrônica de transmissão (TEM) foi empregada confirmando a formação e validando a eficiência do processo.

4.4.2. Síntese das nanopartículas de prata (TS-AgNPs)

Para o processo de síntese das TS-AgNPs, o extrato de *T. subulata* foi inicialmente diluído para uma concentração final de 0,05%, sendo posteriormente aquecido em uma chapa até 80°C. Após atingir a temperatura, o mesmo foi agitado mecanicamente, e 400 μL de NaOH 1 M foram adicionados a solução. Em seguida, 5 mL de solução de AgNO_3 (1 mM) foram incorporados à mistura. O aquecimento com agitação foi mantido por 30 segundos. Ao final do processo, observou-se uma mudança de coloração da mistura para amarelo ouro, indicando a formação das TS-AgNPs. As TS-AgNPs biossintetizadas foram armazenadas em geladeira a 4 °C. A Figura 3 ilustra o processo de preparo de nanopartículas de prata utilizando extrato de *T. subulata* (TS-AgNPs).

Figura 3- Representação do processo de síntese de nanopartículas de prata (TS-AgNPs) utilizando o extrato aquoso de *T. subulata*.



Fonte: Elaboração própria (2024).

4.4.3. Caracterização físicas e químicas das TS-AgNPs biossintetizadas

Para a caracterização das nanopartículas, foi utilizada a espectrofotometria de absorção molecular no visível, para varredura entre 200 - 700 nm usando o espectrofotômetro LAMBDA™ 265 UV/Vis da PerkinElmer Inc. A estabilidade coloidal das nanopartículas foi avaliada através da variação da absorção da banda plasmônica. Foi realizada a microscopia de transmissão eletrônica para obter o tamanho médio das nanopartículas. A determinação do diâmetro hidratado, a distribuição do tamanho e o índice de polidispersão das nanopartículas foram avaliados pela técnica de espalhamento dinâmico de luz (DLS), usando um Zetasizer série Nano da Malvern Panalytical Ltd. A forma e os tamanhos das TS-AgNPs foram analisados por microscopia eletrônica de transmissão (TEM) utilizando um microscópio modelo JEM-2800, 200 kV (JEOL USA Inc., Peabody, EUA).

4.4.4. Avaliação da estabilidade

A estabilidade dos TS-AgNPs foi avaliada considerando três parâmetros: o tempo de estabilidade pós síntese, a resistência a diferentes concentrações de salinidade e o comportamento em condições variáveis de pH. Os testes foram analisados por espectrofotometria UV-Vis, na faixa de 200–700 nm, para monitorar possíveis alterações no pico de absorção em torno de 414 nm.

O teste de estabilidade ao longo do tempo incluiu os intervalos de 0, 1, 2, 7, 10, 20, 30 e 60 dias após a síntese, avaliando as nanopartículas em três diferentes condições experimentais. A primeira condição envolveu o armazenamento na ausência de luz e sob refrigeração a 4 °C, enquanto a segunda consistiu no armazenamento das amostras na ausência de luz, mas em temperatura ambiente. Na terceira condição, as amostras foram expostas à luz em temperatura ambiente.

Para avaliar o impacto da salinidade, as TS-AgNPs foram expostas a soluções de NaCl preparadas com diferentes concentrações (0 M, 0,01 M, 0,05 M, 0,10 M, 0,50 M e 1,00 M), permitindo investigar a estabilidade em ambientes com gradientes de salinidade. Além disso, o comportamento das nanopartículas foi analisado em uma faixa de pH variando entre 3,0, 5,0, 7,0, 8,0 e 12,0, com os valores ajustados por meio da adição controlada de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH). As leituras dos ensaios foram realizadas 15 minutos após a exposição das amostras às respectivas soluções.

4.5. Nanosensor colorimétrico

4.5.1. Seletividade e sensibilidade de detecção colorimétrica dos íons metálicos

Diferentes soluções de íons metálicos (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Ba^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} , Pb^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , Mo^{3+} , Li^+ , Al^{3+} , V^{3+}) foram adicionadas à suspensão TS-AgNPs para avaliar sua capacidade de detecção em soluções aquosas. Para cada ensaio, 500 μL da suspensão de TS-AgNPs (0,25 mM) foram pipetados em 19 microtubos tipo Eppendorf, contendo 1500 μL de cada solução de íons metálicos a 500 ppm (estabelecida como referência para a interação). A mudança de cor instantânea, de amarelo dourado para incolor, foi usada como um indicador qualitativo preliminar de detecção. Adicionalmente, o espectro UV-vis foi registrado imediatamente após a adição dos metais, utilizando-o como ferramenta analítica para indicar a presença e a concentração dos íons no sistema.

Após a realização da seletividade com a concentração de referência de 500 ppm, a avaliação da sensibilidade foi conduzida em duas etapas. Na primeira, buscou-se identificar a concentração mínima do íon seletivo que induz uma resposta visual perceptível do nanosensor colorimétrico baseado nas TS-AgNPs. Para isso, as concentrações foram gradualmente reduzidas até atingir o limite mínimo de detecção, que foi adotado como o valor final de referência para seletividade. A partir dessa concentração mínima, foram realizadas diluições sucessivas para a construção da curva de calibração, empregando diferentes concentrações do íon em estudo.

A curva de calibração foi obtida monitorando-se as alterações espectrais no UV-Vis, com o objetivo de determinar os limites de detecção (LOD) e limites de quantificação (LOQ) do sistema. Esses parâmetros foram utilizados para caracterizar quantitativamente a sensibilidade do sistema colorimétrico mediado pelas TS-AgNPs, evidenciando sua eficácia na detecção seletiva do íon metálico.

O cálculo do LOD e LOQ foi realizado utilizando as fórmulas estabelecidas pela *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), baseadas na relação entre o desvio padrão do branco (σ) e o coeficiente angular da curva de calibração (s):

$$LOD = \frac{3\sigma}{s} \quad (1)$$

$$LOQ = \frac{10\sigma}{s} \quad (2)$$

onde,

σ = É o desvio padrão dos valores de absorbância medidos para o branco; e
 s = É o coeficiente angular da curva de calibração.

4.5.2. Estudo cinético

O estudo cinético foi realizado utilizando a metodologia de cinética baseada em tempo, que permite avaliar a velocidade de uma reação ao longo de um intervalo predeterminado. O comportamento das nanopartículas foi monitorado continuamente ao longo de um período total de 2,5 minutos, com coletas de dados realizadas em intervalos regulares de 5 segundos. A solução do analito alvo utilizada no teste possuía a concentração de 20 ppm. As medições foram realizadas automaticamente pelo espectrofotômetro LAMBDA™ 265 UV/Vis da PerkinElmer Inc.

4.5.3. Teste de interação com matriz complexa

Para avaliar a robustez do nanosensor em condições reais, foi simulada uma matriz complexa composta por múltiplos íons metálicos. O experimento foi realizado sob diferentes condições: uma matriz sem presença do íon seletivo, uma matriz contendo apenas Hg^{2+} , uma matriz enriquecida com Hg^{2+} e um controle, contendo apenas TS-AgNPs dispersos em água deionizada. As interações entre os TS-AgNPs e os componentes das diferentes condições foram avaliadas tanto visualmente quanto por espectroscopia UV-Vis, permitindo o monitoramento detalhado das mudanças ocorridas.

5. RESULTADO E DISCUSSÕES

5.1. Nanopartículas de prata

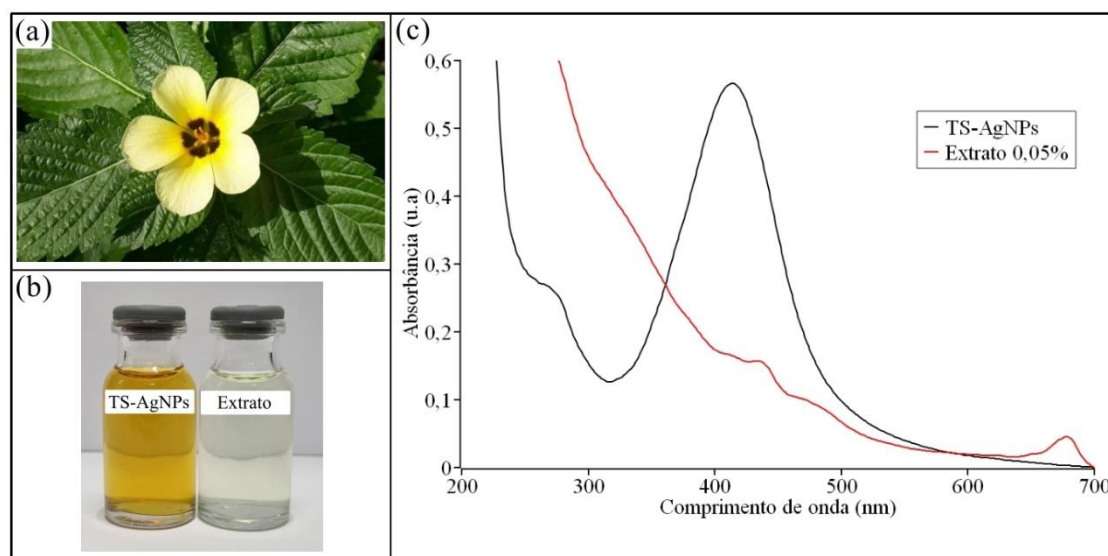
5.1.1. Condições ideais de síntese das TS-AgNPs

A otimização foi realizada considerando fatores críticos no processo de síntese. As variáveis foram ajustadas com base em análises realizadas por espectroscopia UV-Vis, permitindo identificar as condições que favorecem a formação das nanopartículas. O melhor resultado foi obtido utilizando uma proporção de 15 partes de extrato vegetal para 5 partes de solução de prata, extrato vegetal na concentração de 0,05%, solução de AgNO_3 a 1 mM, temperatura de síntese a 80°C , 400 μL de NaOH e tempo de síntese de 30 segundos (após a adição da solução de prata). Essas condições foram consideradas ideais para garantir a formação de nanopartículas uniformemente distribuídas e com propriedades características desejadas.

5.1.2. Síntese das TS-AgNPs mediada por *T. subulata*

A síntese de nanopartículas de prata mediada pelo extrato aquoso de folhas de *T. subulata* (Figura 4a) foi confirmada por meio de mudanças visuais e espectroscópicas. A solução inicial, de coloração verde clara, tornou-se amarelo-ouro após a reação (Figura 4b), indicando visualmente a formação das nanopartículas.

Figura 4 - Estudo da síntese de nanopartículas de prata utilizando *Turnera subulata* Sm.



(a) Folhas de *Turnera subulata* Sm; (b) Solução de TS-AgNPs sintetizadas (esquerda) e extrato aquoso de folhas de *T. Subulata* (direita); (c) Espectro de absorvância: a solução de TS-AgNPs apresenta um pico em aproximadamente 414 nm, indicando a formação de nanopartículas de prata. Fonte: autoria própria (2024).

Espectros de absorção revelaram que o extrato de *T. subulata* isolado não apresenta absorção significativa na região espectral analisada, enquanto as TS-AgNPs exibem uma banda bem definida com máximo de absorvância em 414 nm (Figura 4c). Este pico característico confirma a formação das nanopartículas de prata, associado à ressonância de plasmônica de superfície.

Esse comportamento tem sido amplamente relatado em estudos que exploram a síntese verde de nanopartículas de prata (AgNPs) a partir de extratos vegetais, evidenciando picos de absorvância próximos a 414 nm, indicativos da formação dessas nanopartículas. Lemos et al. (2021) sintetizaram AgNPs utilizando extrato de girassol (*Helianthus annuus*), observando picos de absorvância entre 414 nm e 422 nm, correspondentes a nanopartículas com dimensões em torno de 20 nanômetros. De forma semelhante, Barbosa (2018), desenvolveu a síntese biogênica de AgNPs a partir de própolis vermelha de Alagoas, registrando um pico de absorvância em 414 nm após 2 horas de reação, o que reforça a formação dessas nanopartículas. Além disso, Erjaee; Rajaian; Nazifi (2017) realizaram a síntese de AgNPs utilizando extrato aquoso de *Chamaemelum nobile* (camomila romana), verificando um pico em 414 nm na condição ótima após 2 horas, com nanopartículas apresentando propriedades antibacterianas promissoras.

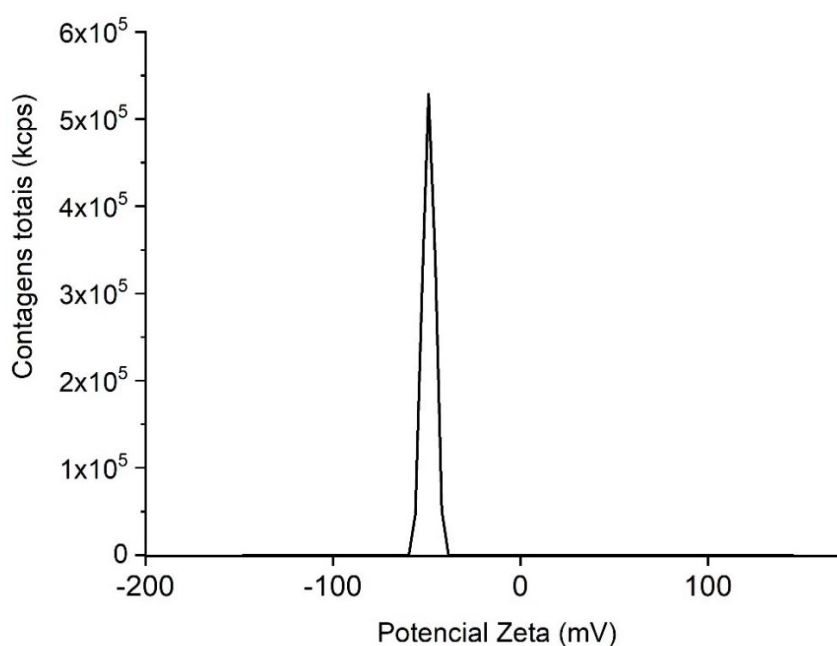
5.1.3. Caracterização das TS-AgNPs sintetizadas

Neste estudo, a síntese de TS-AgNPs com extrato aquoso de *T. subulata* resultou em um pico SPR em 414 nm (Figura 4c), o que confirma a formação de nanopartículas. A mudança visual da solução, de verde claro para marrom escuro, reflete a redução dos íons de prata mediada pelos compostos bioativos presentes no extrato vegetal, que atuaram como agentes redutores e estabilizadores no processo.

Observa-se que o comprimento de onda obtido é condizente com estudos recentes na área da síntese verde de AgNPs, que reportam picos SPR característicos na faixa de 400 a 450 nm (Bhagat et al., 2022; Memon et al., 2022; Moond et al., 2023; Reddy et al., 2021; Sangaonkar et al., 2020; Sreebamol; Devika; Anu, 2023). Esses trabalhos confirmam os parâmetros esperados para sistemas biogênicos e destacam a eficácia do extrato de *T. subulata* nesse contexto.

O potencial Zeta de -48 mV, demonstrado na Figura 5, indica uma excelente estabilidade coloidal das TS-AgNPs em solução, refletindo uma forte repulsão eletrostática entre as partículas, o que previne sua agregação. Isso é justificado pelo fato de que elevados valores, tanto positivos quanto negativos (acima de +30 mV ou abaixo de -30 mV), indicam alta repulsão eletrostática, evitando a formação de agregados e promovendo maior estabilidade ao longo do tempo, como evidenciado por Ahmad et al., (2017) e Restrepo; Villa (2021).

Figura 5- Potencial Zeta das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs).

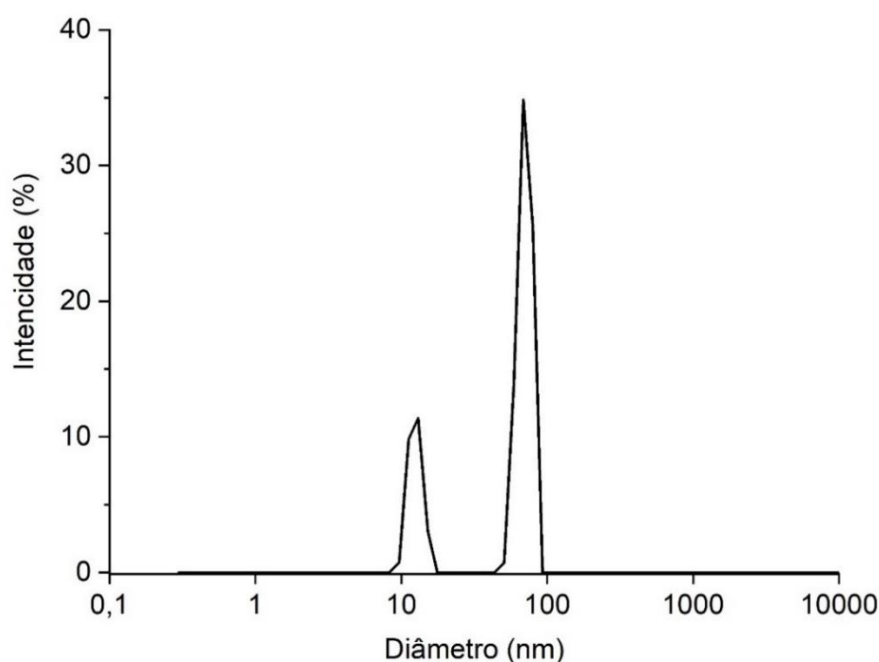


Fonte: autoria própria (2024).

No caso das TS-AgNPs, um potencial Zeta significativamente negativo garante que as partículas permaneçam dispersas e estáveis, o que é essencial para o funcionamento eficiente do nanosensor colorimétrico. A agregação das nanopartículas comprometeria suas propriedades ópticas, reduzindo a sensibilidade e a precisão na detecção de íons metálicos (Alorabi; Abdelbaset; Zabin, 2019; Bhattacharjee, 2016).

O estudo de DLS da solução, representado na Figura 6, demonstra uma distribuição bimodal dos tamanhos das nanopartículas. Observa-se que 73,7% da intensidade de espalhamento corresponde a partículas de 93,1 nm, enquanto os 26,3% restantes são atribuídos a partículas de 14,5 nm. Esse comportamento pode ser justificado pela nucleação rápida e crescimento heterogêneo das partículas, característico de sínteses biogênicas com agentes redutores complexos, como extratos vegetais.

Figura 6 - Distribuição de tamanho das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) por DLS.



Fonte: autoria própria (2024).

Na literatura, distribuições bimodais são frequentemente reportadas em sínteses verdes, sendo atribuídas à presença de diferentes fitoquímicos que atuam de forma simultânea como agentes redutores e estabilizantes, promovendo a formação de nanopartículas com distintos tamanhos (Ahmed *et al.*, 2016). Esse comportamento contribui para uma maior heterogeneidade na morfologia e no tamanho das

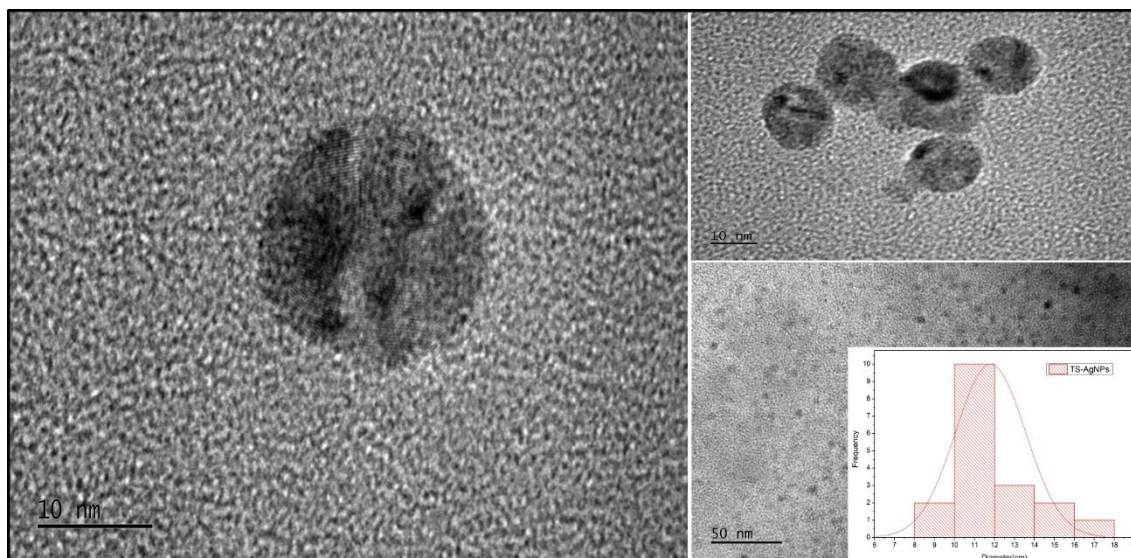
nanopartículas formadas, aspecto frequentemente observado em rotas de síntese baseadas em extratos vegetais (Sharma; Yngard; Lin, 2009).

De acordo com critérios estabelecidos para análise por espalhamento dinâmico de luz (DLS), valores de índice de polidispersão (PDI) inferiores a 0,1 são indicativos de sistemas monodispersos; entre 0,1 e 0,4, caracterizam sistemas moderadamente polidispersos; e valores superiores a 0,4 são considerados altamente polidispersos (Maguire et al., 2018). O PDI obtido neste estudo, igual a 0,43, sugere uma distribuição de tamanhos amplamente dispersa, situando-se na faixa de alta polidispersão, em consonância com os padrões esperados para metodologias de síntese verde.

A presença de nanopartículas com diferentes tamanhos pode impactar diretamente o comportamento óptico do sistema, refletindo-se nas características da ressonância de plásmons de superfície (SPR). Enquanto nanopartículas menores tendem a exibir picos de SPR em comprimentos de onda mais curtos devido à maior frequência de oscilação dos elétrons de condução, partículas maiores promovem o deslocamento desse pico para comprimentos de onda mais longos, em decorrência do aumento do efeito de espalhamento (Kelly et al., 2003; Link; El-Sayed, 1999). Nesse contexto, a distribuição bimodal observada na análise por DLS, associada à presença de um único pico plasmônico bem definido em 414 nm, possivelmente reflete o efeito combinado das duas populações de tamanhos distintos, uma vez que cada uma contribui com uma resposta plasmônica ligeiramente diferente (Noguez, 2007).

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de transmissão, revelaram a morfologia esférica das nanopartículas sintetizadas e proporcionaram uma estimativa do seu tamanho médio, que variou de 5 a 20 nm. A Figura 7 apresenta as imagens obtidas em diferentes escalas de ampliação, permitindo uma visualização clara da morfologia e o tamanho das nanopartículas.

Figura 7- Imagens de microscopia eletrônica de transmissão (TEM) das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs).



À esquerda, grupo isolado de nanopartículas (NPs); à direita, nanopartículas dispersas. Inset: Histograma de distribuição dos diâmetros das NPs. Fonte: autoria própria (2024).

A técnica de TEM oferece uma visão detalhada do núcleo sólido das nanopartículas, sendo ideal para caracterizar sua forma e tamanho direto. Em contraste, as medições feitas por DLS resultaram em tamanhos maiores para as TS-AgNPs, o que é explicado pelo fato de o DLS medir o diâmetro hidrodinâmico, incluindo a camada de solvatação ao redor das partículas. Essa diferença entre as técnicas é comum em sistemas coloidais, onde o DLS considera a partícula completa em solução, enquanto o TEM avalia apenas o núcleo sólido da nanopartícula, sem interferência da solvatação.

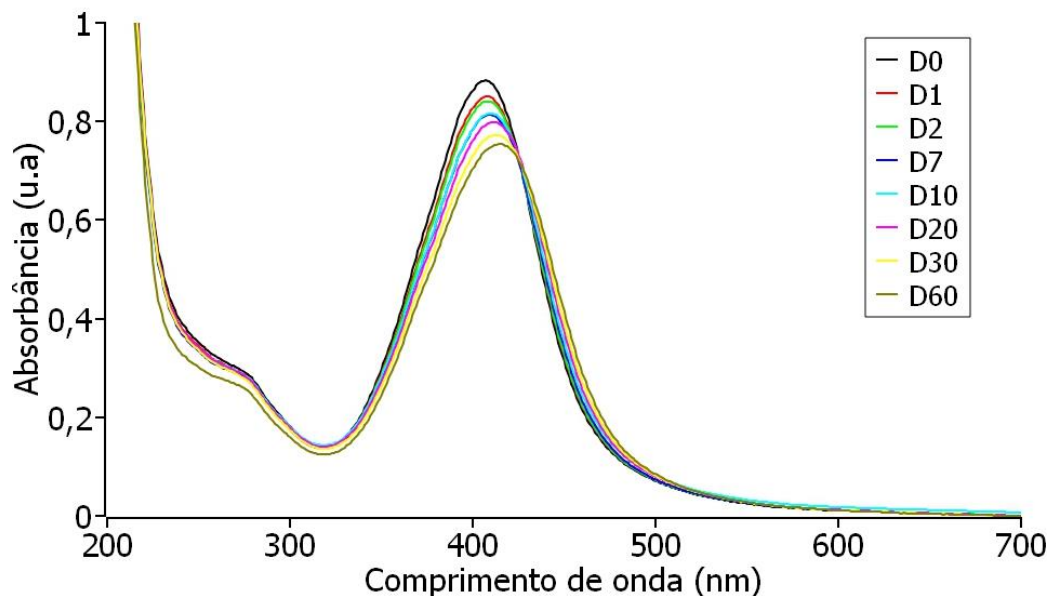
5.1.4. Avaliação da estabilidade das TS-AgNPs

5.1.4.1. Ao longo do tempo

Os resultados obtidos sobre a estabilidade das TS-AgNPs em diferentes condições de armazenamento ao longo de 60 dias demonstram a influência significativa de fatores como exposição à luz, temperatura e local de armazenamento na preservação das propriedades ópticas e estruturais dessas partículas. As siglas D0 a D60 nas figuras, correspondem aos dias específicos em que as leituras foram realizadas durante o período de acompanhamento.

A Figura 8 apresenta o comportamento das nanopartículas monitoradas sob a primeira condição de armazenamento, mantidas em frasco âmbar e sob refrigeração controlada de 4 °C.

Figura 8- Estabilidade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) armazenadas sem luz e sob refrigeração em diferentes dias de análise (D0 a D60).

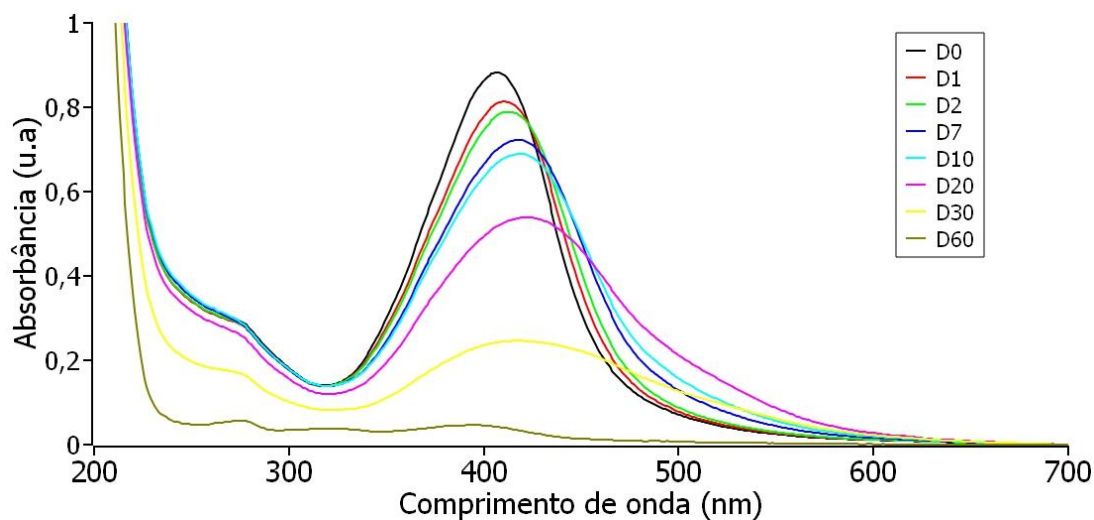


Fonte: autoria própria (2024).

A partir dos dados, é possível notar que TS-AgNPs armazenadas nessas condições demonstraram uma estabilidade significativa ao longo do período de 60 dias. A curva de detecção observada evidencia que a intensidade do pico da amostra, localizado em torno de 406 nm, se manteve quase constante durante todo o período de análise. Houve um deslocamento do pico 6 nm no comprimento de onda e 0,11 u.a na absorbância. Esse comportamento discreto de alteração é indicativo de que os processos de oxidação, agregação ou qualquer alteração na forma das partículas foram minimizados, em reflexo à combinação das condições de armazenamento utilizadas.

As nanopartículas armazenadas sob a segunda condição de armazenamento (ausência de luz e temperatura ambiente) apresentaram uma diminuição significativa na intensidade do pico de absorção ao longo do tempo, com redução mais acentuada observada nos dias finais do monitoramento (D20, D30 e D60). Observa-se que, embora a ausência de luz tenha ajudado a reduzir parcialmente os danos às nanopartículas, as condições de temperatura ambiente ainda resultaram em uma diminuição progressiva na estabilidade. Esse comportamento, representado na Figura 9, sugere que a temperatura ambiente, mesmo sem a presença de luz, contribui significativamente para os processos de oxidação, agregação e outras alterações estruturais.

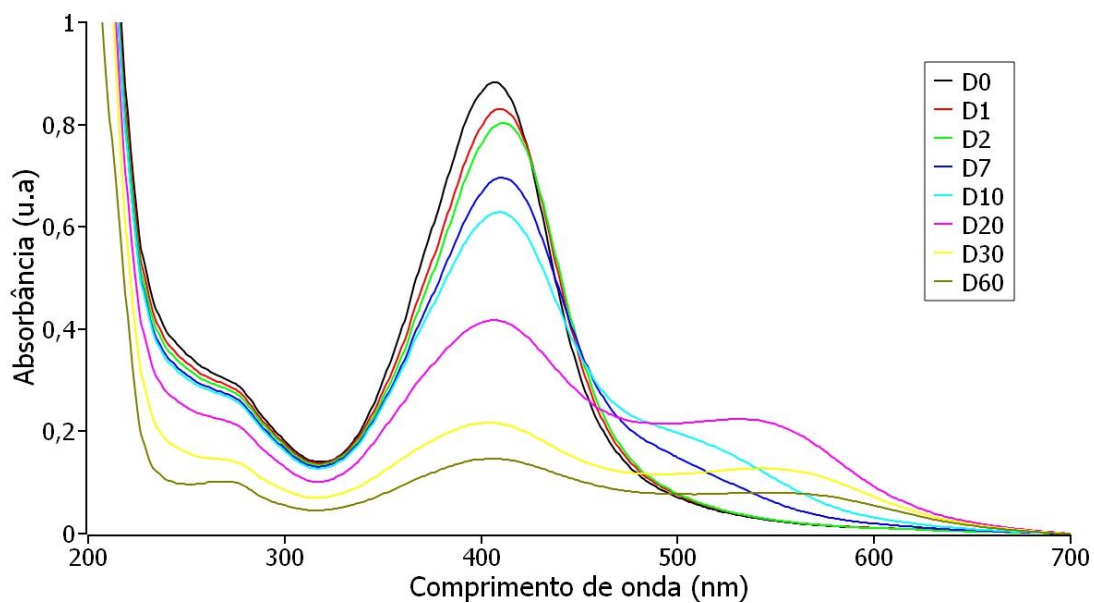
Figura 9 - Estabilidade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) armazenadas sem luz e sem refrigeração em diferentes dias de análise (D0 a D60).



Fonte: autoria própria (2024).

A exposição das nanopartículas a luz e a temperatura não controlada demonstrou o quanto os fatores ambientais influenciam a estabilidade. Os dados evidenciam alterações significativas no comportamento dos picos de absorvância, especialmente a partir do dia 7 (D7), o que sugere mudanças estruturais e químicas devido às condições ambientais impostas. A Figura 10 exibe o comportamento obtido ao longo dos 60 dias.

Figura 10 - Estabilidade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) armazenadas sob luz e sem refrigeração em diferentes dias de análise (D0 a D60).



Fonte: autoria própria (2024).

Nos primeiros dias, o espectro mantém-se relativamente estável, com um único pico predominante em torno de 406 - 412 nm. Esse comportamento sugere que, inicialmente, as nanopartículas mantiveram preservadas suas propriedades ópticas e estruturais originais, demonstrando uma certa resistência às condições adversas. Contudo, a partir do sétimo dia, observa-se o surgimento de um novo pico na região entre 458 e 600 nm. Esse pico cresce progressivamente até o dia 60 (D60), indicando mudanças graduais e significativas na estrutura ou composição das nanopartículas.

A formação desse novo pico pode estar associada a fenômenos como agregação das nanopartículas, degradação química, deformação na estrutura ou crescimento de impurezas na solução. A exposição à luz e a falta de controle térmico podem acelerar a fusão ou aglomeração das partículas, alterando suas propriedades ópticas. Além disso, reações químicas como oxidação, promovidas pela interação com moléculas do ambiente (como água ou oxigênio), podem modificar a estrutura das nanopartículas, gerando novos estados eletrônicos que absorvem luz em comprimentos de onda diferentes. Em paralelo, a presença de contaminantes ou a formação de subprodutos também pode contribuir para o comportamento observado.

O alargamento contínuo do segundo pico ao longo do tempo, combinado com a redução da intensidade do pico inicial, reforça a ideia de que a estrutura original das nanopartículas foi sendo gradualmente substituída por uma nova configuração. Esse fenômeno destaca a instabilidade das nanopartículas sob as condições testadas, evidenciando a importância de condições controladas, como refrigeração e ausência de luz, para preservar suas propriedades originais.

Esses comportamentos são relatados na literatura como efeitos adversos causados pela interação da luz e da temperatura com nanopartículas metálicas. Krutiakov *et al.* (2008) destacam que a exposição à luz pode catalisar a oxidação das nanopartículas, favorecendo a formação de íons de prata (Ag^+) e a perda de propriedades funcionais. Além disso, estudos de Zhu *et al.* (2010) demonstram que as temperaturas ambientes aumentam a cinética de agregação das nanopartículas devido ao aumento na energia térmica, que desestabiliza as interações estabilizadoras de superfície. Isso resulta em partículas maiores e menos uniformes, comprometendo a eficácia em aplicações como sensores colorimétricos.

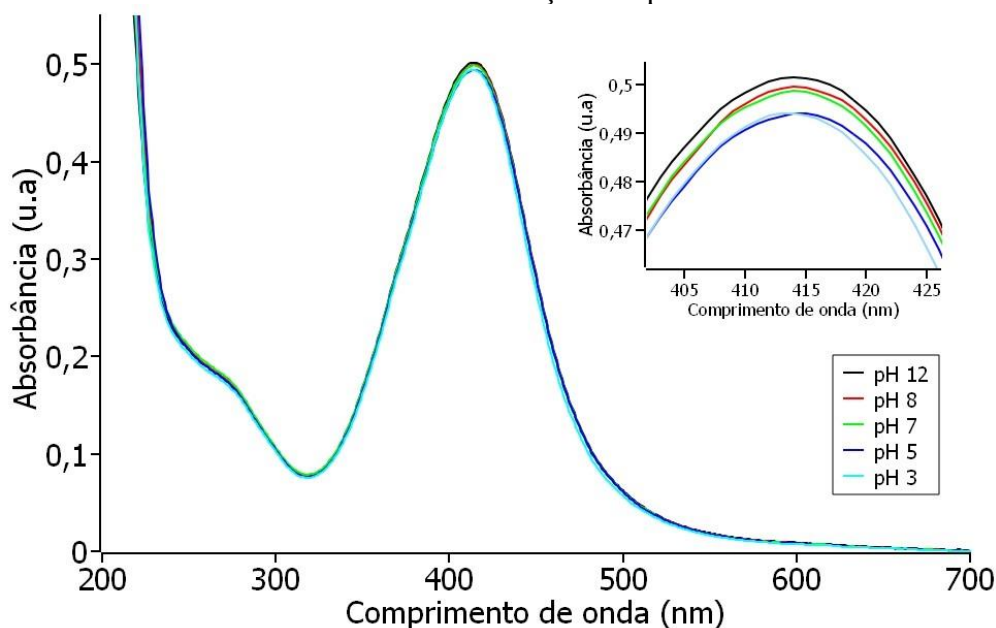
Esses resultados indicam que a luz, aliada à temperatura, desempenha um papel crucial na aceleração dos processos de degradação das nanopartículas, resultando na perda de suas propriedades ópticas características. Trabalhos recentes, como os

publicados por Medina *et al.* (2020), confirmam que a integridade dos AgNPs é mantida por períodos significativamente maiores quando armazenados em condições refrigeradas e longe da exposição direta à luz, reforçando a importância de práticas rigorosas de conservação. Portanto, os dados obtidos corroboram com as observações dos estudos anteriores e destacam a necessidade de considerar os fatores ambientais na estabilidade das nanopartículas.

5.1.4.2. Em diferentes concentrações de pH

A análise da estabilidade das TS-AgNPs frente a soluções com diferentes valores de pH revelou uma estabilidade relativa com pequenas variações na intensidade e largura do pico de absorbância, indicando sua resistência a mudanças no ambiente ácido ou alcalino. Essa manutenção sugere que as nanopartículas apresentam boa estabilidade em uma ampla faixa de pH, o que é desejável para diversas aplicações analíticas e ambientais. Esse comportamento pode ser observado na Figura 11 a seguir.

Figura 11 - Estabilidade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) expostas a diferentes concentrações de pH's.



Fonte: autoria própria (2024).

Apesar da estabilidade geral, é possível observar que entre os pHs extremos (12 e 3), houve uma maior diferença entre as intensidades dos picos, indicando possíveis alterações estruturais ou início de processos de agregação. Em pH ácido, isso pode estar relacionado à protonação de moléculas na superfície da nanopartícula, enquanto em pH

básico, reações de oxidação ou desestabilização devido à alta concentração de íons hidroxila podem ocorrer. Em suma, o comportamento estável observado é consistente com as interações favoráveis das biomoléculas estabilizadoras das TS-AgNPs, que atuam para prevenir a agregação.

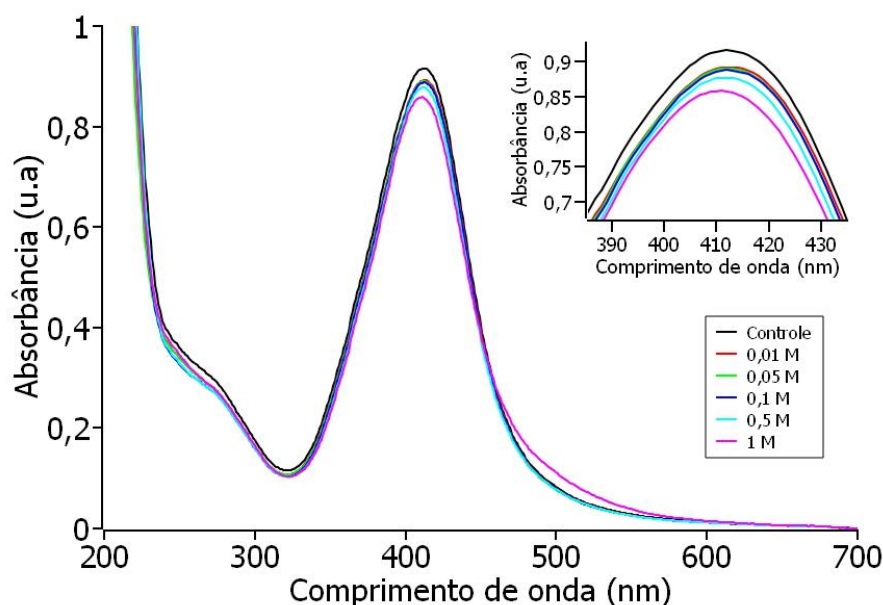
Trabalhos como o de Dauthal e Mukhopadhyay (2016) indicam que nanopartículas estabilizadas por compostos bioativos extraídos de plantas apresentam melhor estabilidade devido à formação de uma camada protetora de biomoléculas na superfície das partículas. Essas camadas evitam a agregação e oferecem resistência a mudanças em pH. Segundo Chatterjee *et al.* (2018), nanopartículas de prata frequentemente perdem estabilidade em pHs muito ácidos ou básicos devido à solubilização parcial ou ao início de processos de coalescência. A leve redução na intensidade do pico entre o pH 12 e pH 3 no gráfico é consistente com essas observações.

O estudo de Gecer e Erenler (2023) destaca que os compostos bioativos presentes no extrato vegetal, como flavonoides e taninos, são essenciais para conferir estabilidade às nanopartículas, mesmo sob condições adversas, como variações de pH.

5.1.4.3. Em diferentes concentrações de salinidade

Com base no gráfico analisado, disposto na Figura 12, observou-se que, com o aumento da concentração salina, há uma ligeira redução na intensidade do pico de absorbância, especialmente em concentrações de 0,5 M e 1 M. Essa redução sugere que as nanopartículas sofreram agregação ou perderam parte de sua estabilidade devido à interação dos íons salinos com a superfície das partículas.

Figura 12 - Estabilidade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) expostas a diferentes concentrações de salinidade.



Fonte: autoria própria (2024).

Nas concentrações mais elevadas, como 1 M, notou-se um comportamento mais divergente em relação as demais concentrações, essa reação pode ser justificada pela capacidade dos íons presentes na solução de neutralizar ou reduzir a carga superficial das nanopartículas, provocando, assim, a diminuição da repulsão eletrostática entre elas, facilitando sua aproximação e levando a possíveis processos de agregação e desestabilização. Estudos prévios como o de Leersnyder *et al.* (2019) destacaram que nanopartículas de prata frequentemente perdem estabilidade em concentrações salinas elevadas, exibindo comportamento semelhante de agregação. Em suma, os resultados obtidos demonstram a capacidade das TS-AgNPs de serem aplicadas em sistemas de detecção em amostras de água com diferentes níveis de salinidade.

5.2. Nanosensor colorimétrico

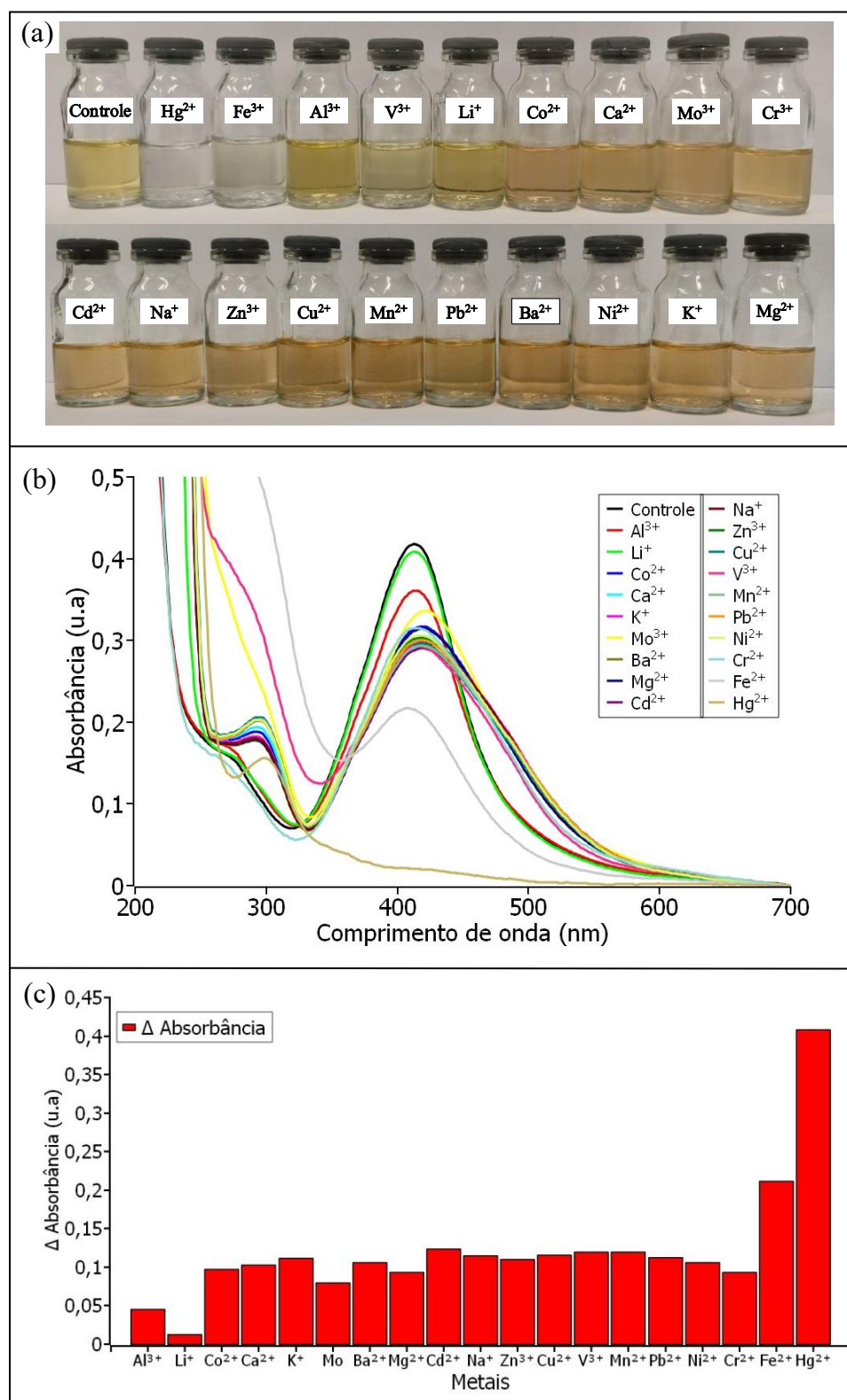
5.2.1. Estudos de sensibilidade e seletividade

O visível desaparecimento da cor amarela e significativa mudança na intensidade do SPR não foram observados quando metais alcalinos como Li^+ , Na^+ , K^+ , metais alcalino-terrosos como Mg^{2+} , Ca^{2+} , Ba^{2+} , metais de transição como Zn^{3+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} , Pb^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+} , Mo^{3+} e metal representativo como o Al^{3+} reagiram com solução de TS-AgNPs. No entanto, quando Hg^{2+} foi adicionado, uma notável mudança de cor visível de amarelo para incolor e mudança na intensidade do SPR em relação ao branco foi observada (Figura 13 a,b). A espectroscopia mostrou deslocamentos

espectrais específicos e leves diminuições nas intensidades de SPR para todos os cátions metálicos testados, contudo, no caso dos íons Hg^{2+} , a intensidade apresentou uma redução significativa, aproximando-se de zero.

A Figura 13c evidencia o nível de interação entre o nanosensor e os metais, indicando que quanto maior a variação na absorbância (Δ Absorbância) em relação à amostra de referência no comprimento de onda máximo, maior é a interação. Nesse contexto, o íon Hg^{2+} se destaca por apresentar a maior variação de absorbância, confirmando a alta seletividade e interação das TS-AgNPs com este metal.

Figura 13- Avaliação da seletividade das nanopartículas biossintetizadas (TS-AgNPs) para diferentes íons metálicos.

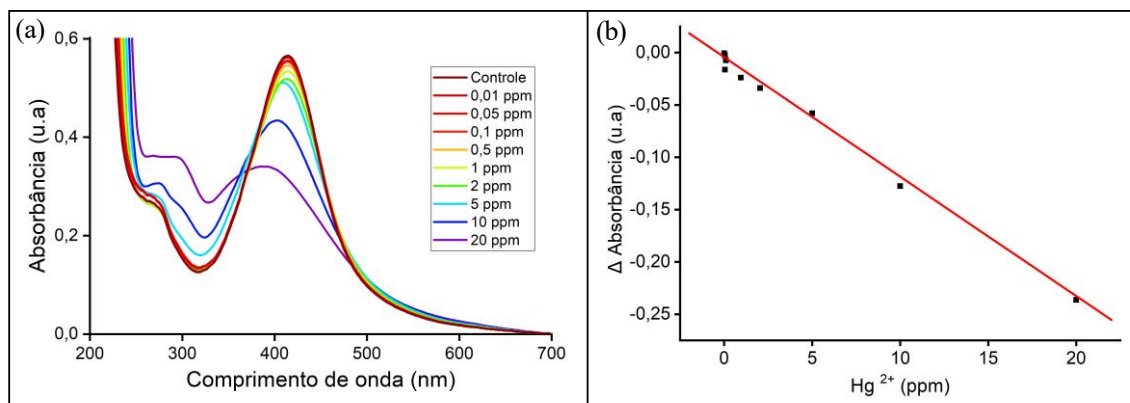


(a) Mudança colorimétrica observada nas soluções contendo diferentes metais em concentração de 20 ppm na presença das TS-AgNPs; (b) Espectro de absorção da solução de TS-AgNPs e íons metálicos adicionados; (c) Histograma da variação da absorbância (Δ Absorbância) em relação ao branco, destacando a interação seletiva das AgNPs com o íon Hg²⁺. Fonte: autoria própria (2024).

Ressalta-se que comportamento diferencial entre os vários cátions metálicos e a TS- AgNPs é reflexo de propriedades específicas, como a afinidade de ligação entre os elementos, o potencial redox, a carga, o tamanho, a capacidade de agregação e a cinética de reação, os quais são todos determinantes críticos para o grau de influência que um metal pode ter em comparação a outro (Lee; Kim; Park, 2023). Como em nosso estudo, nenhuma mudança significativa na cor, máximos de extinção e intensidades de SPR foi observada nas interações de TS-AgNPs com os demais cátions testados, exceto Hg^{2+} , a abordagem do ensaio mostrou seletividade muito alta em relação à detecção colorimétrica de Hg^{2+} .

O desempenho das TS-AgNPs para a detecção de íons de mercúrio foi avaliado por espectroscopia UV-Vis utilizando soluções padrão de Hg^{2+} na faixa de 20 a 0,01 ppm. Essa faixa de trabalho foi alcançada com o aumento da densidade das TS-AgNPs, pela concentração da solução por aquecimento. A análise espectral resultante (Figura 14a) demonstrou uma excelente linearidade no gráfico de calibração com coeficiente de correlação $R^2 = 0,98$, o que indica uma forte relação entre a concentração de Hg^{2+} e a resposta ótica das TS-AgNPs (Figura 14b).

Figura 14 - Análise espectrofotométrica da interação entre TS-AgNPs e íons Hg^{2+} em diferentes concentrações.



(a) Espectros de absorvância de TS-AgNPs na presença de diferentes concentrações de íons Hg^{2+} ; (b) Gráfico da variação de absorvância (Δ absorvância) em função da concentração de Hg^{2+} (ppm). Fonte: autoria própria (2024).

A equação da curva de calibração obtida foi dada por $Y = 0,00118 + 0,01143x$. O limite de detecção (LOD) foi calculado em 0,31 ppm e o limite de quantificação (LOQ) em 1,03 ppm, em conformidade com os critérios estabelecidos pela IUPAC. Esses resultados se mostraram superiores quando comparados ao trabalho de Sangaonkar *et al.*

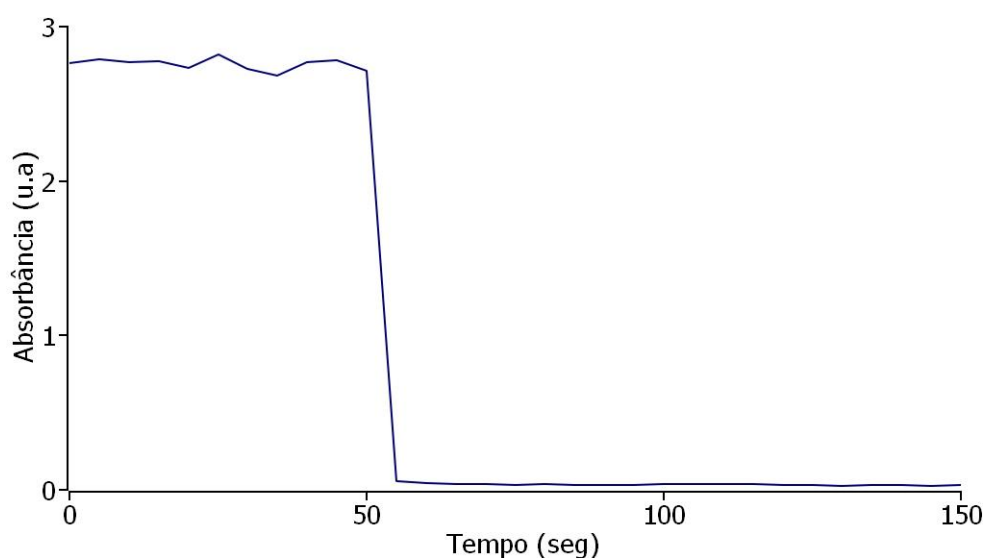
(2020), os quais relataram um LOD de 43,37 ppm e LOQ de 131,43 ppm utilizando AgNPs sintetizadas com o extrato vegetal da fruta de *Kokum* (Sangaonkar *et al.*, 2020).

Em comparação com outros trabalhos, Ahmed *et al.* (2020) reportaram um LOD de 0,8 μM (aproximadamente 0,16 ppm) usando AgNPs sintetizadas com extrato da raiz de *Bistorta amplexicaulis* (Ahmed; Kabir; Xiong, 2020), valor ligeiramente superior ao estudo atual, mas ainda próximo. As diferenças observadas entre os resultados podem ser atribuídas às variações nas metodologias de síntese das nanopartículas, incluindo fatores como temperatura e tempo de reação, proporção entre a solução de nitrato de prata e o extrato vegetal, molaridade, modo de preparo do extrato, entre outros. Esses parâmetros influenciam diretamente as características físico-químicas das nanopartículas, impactando significativamente a sensibilidade e a seletividade do sensor.

5.2.2. Estudo cinético da reação

A análise cinética apresentada na Figura 15 descreve a interação do nanosensor com íons mercúrio, ao longo do tempo. Observa-se uma elevada intensidade de absorção nos primeiros 50 segundos do experimento, antes da adição do analito alvo. Após a adição do Hg^{2+} a 20 ppm, ocorre uma queda abrupta na absorção, sugerindo a saturação ou o consumo dos sítios ativos disponíveis no nanosensor para interação com os íons Hg^{2+} .

Figura 15 - Cinética da interação do nanosensor colorimétrico com íon Hg^{2+} .



Fonte: autoria própria (2024).

Após a queda abrupta, a absorbância se estabiliza em valores próximos a zero com apenas 5 segundos após adição do analito alvo, indicando que o sistema atingiu um estado

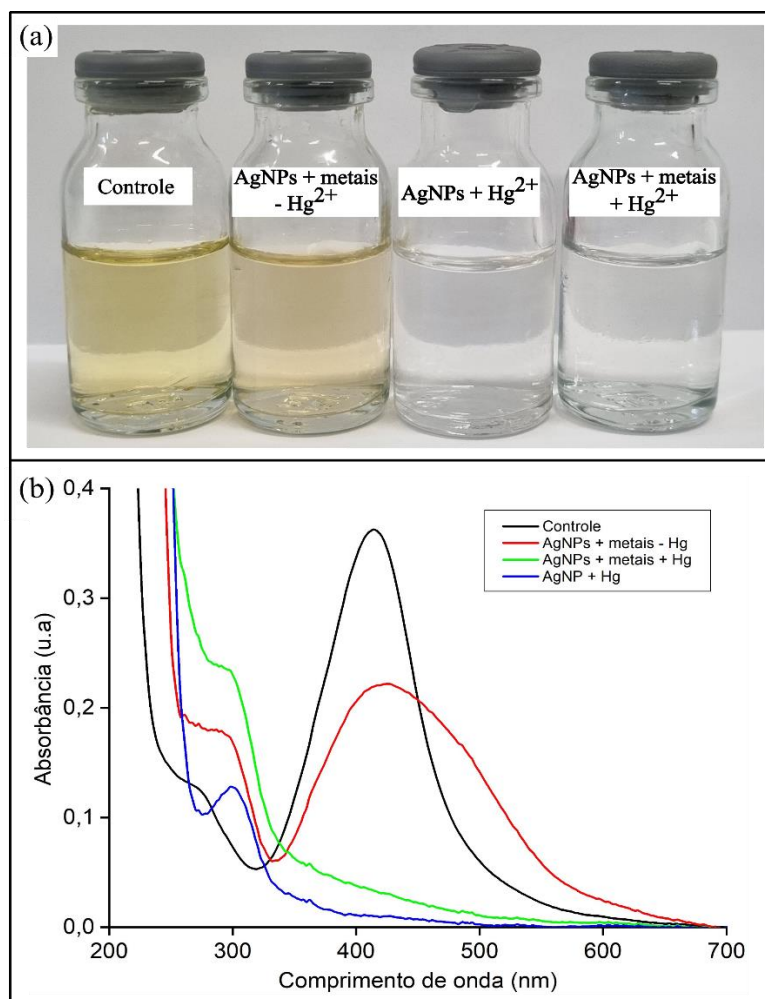
de equilíbrio, possivelmente devido à completa complexação ou agregação das nanopartículas na presença do Hg^{2+} . Portanto, de forma prática, podemos afirmar que as leituras podem ser realizadas com confiabilidade a partir de 1,5 minutos, garantindo consistência e precisão nos resultados. Esse tempo de estabilização é crucial para garantir que o comportamento represente a condição final da interação química entre o nanosensor e o íon Hg^{2+} .

Ainda, ressalta-se que a rapidez com que a reação ocorre (em menos de um minuto) destaca a alta eficiência cinética do nanosensor, reforçando a sua aplicabilidade para detecções ambientais rápidas.

5.2.3. Teste de interação com matriz complexa

Para testar a robustez do nanosensor em condições reais, foi simulada uma matriz complexa contendo múltiplos íons metálicos (Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Ba^{2+} , Zn^{3+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} , Pb^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+} , Mo^{3+} , Al^{3+} e Hg^{2+}) a 20 ppm. O experimento foi conduzido em várias condições: matriz sem Hg^{2+} , solução contendo apenas Hg^{2+} , matriz complexa com Hg^{2+} e um controle branco com apenas TS-AgNPs e água deionizada. A Figura 16a ilustra as mudanças de cor resultantes da interação das TS-AgNPs com as diferentes condições da matriz complexa, enquanto a Figura 16b exibe os espectros UV-Vis correspondentes.

Figura 16 - Resposta do nanosensor às diferentes condições de interferência.



Fonte: autoria própria (2024).

Os resultados indicaram que a presença de outros metais na solução pouco interferiu na seletividade do nanosensor para Hg²⁺. A matriz complexa sem Hg²⁺ apresentou características semelhantes às da amostra de referência, o que demonstra que os íons metálicos testados não influenciaram de maneira significativa o comportamento ótico do nanosensor. Em contraste, a matriz contendo Hg²⁺ apresentou uma clara mudança de cor e variações nos picos de absorção, comprovando a alta seletividade do método, mesmo na presença de uma mistura complexa de íons metálicos. Essas observações sugerem que o nanosensor é promissor para aplicações em ambientes aquosos com múltiplos contaminantes.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo comprovou a viabilidade da síntese verde de nanopartículas de prata (TS-AgNPs) a partir do extrato aquoso das folhas de *Turnera subulata* Sm.,

evidenciando seu potencial como nanosensor colorimétrico seletivo para detecção de íons Hg^{2+} em água. A caracterização físico-química confirmou a formação de nanopartículas predominantemente esféricas, com diâmetro médio entre 10 e 20 nm, elevada estabilidade coloidal e propriedades ópticas típicas de nanopartículas metálicas de prata.

Ensaio de estabilidade realizados sob diferentes condições — incluindo variações de pH, salinidade e armazenamento prolongado — demonstraram a robustez das TS-AgNPs frente a fatores ambientais. O sensor revelou significativa seletividade e sensibilidade para o íon Hg^{2+} , com alterações colorimétricas visíveis a olho nu e rápida resposta, com detecção efetiva em menos de 1,5 minuto.

Adicionalmente, a eficiência do nanosensor foi mantida mesmo em matrizes complexas, indicando sua especificidade e aplicabilidade em ambientes reais. Tais resultados não apenas confirmam o desempenho promissor das TS-AgNPs para o monitoramento de metais pesados, como também reforçam o potencial de utilização de nanopartículas biossintetizadas em estratégias de monitoramento ambiental sustentável.

Como continuidade deste trabalho, propõe-se a aplicação do nanosensor em amostras ambientais reais, com o objetivo de validar os resultados obtidos em laboratório frente às complexidades presentes em sistemas naturais.

7. REFERÊNCIAS

- ADIO, S. O. et al. Biogenic synthesis of silver nanoparticles; study of the effect of physicochemical parameters and application as nanosensor in the colorimetric detection of Hg^{2+} in water. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 96, n. 8, p. 776–788, 20 jun. 2016.
- AHMAD, A. et al. The effects of bacteria-nanoparticles interface on the antibacterial activity of green synthesized silver nanoparticles. **Microbial Pathogenesis**, v. 102, p. 133–142, 1 jan. 2017.
- AHMED, F.; KABIR, H.; XIONG, H. Dual Colorimetric Sensor for $\text{Hg}^{2+}/\text{Pb}^{2+}$ and an Efficient Catalyst Based on Silver Nanoparticles Mediating by the Root Extract of *Bistorta amplexicaulis*. **Frontiers in Chemistry**, v. 8, p. 591958, 22 out. 2020.
- AHMED, S. et al. Green synthesis of silver nanoparticles using *Azadirachta indica* aqueous leaf extract. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, v. 9, n. 1, p. 1–7, 1 jan. 2016.
- ALBERTI, G. et al. Disposable and Low-Cost Colorimetric Sensors for Environmental Analysis. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 2020, Vol. 17, Page 8331, v. 17, n. 22, p. 8331, 11 nov. 2020.
- ALI, H.; KHAN, E.; SAJAD, M. A. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. **Chemosphere**, v. 91, n. 7, p. 869–881, 1 maio 2013a.
- ALI, H.; KHAN, E.; SAJAD, M. A. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. **Chemosphere**, v. 91, n. 7, p. 869–881, 1 maio 2013b.
- ALI, M. et al. Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Artemisia absinthium* aqueous extract — A comprehensive study. **Materials Science and Engineering: C**, v. 58, p. 359–365, 1 jan. 2016.
- ALMEIDA, A. C. S. et al. Aplicação de nanotecnologia em embalagens de alimentos. **Polímeros**, v. 25, n. spe, p. 89–97, 1 dez. 2015.
- ALORABI, A. Q.; ABDELBASET, M.; ZABIN, S. A. Colorimetric Detection of Multiple Metal Ions Using Schiff Base 1-(2-Thiophenylimino)-4-(N-dimethyl)benzene. **Chemosensors** 2020, Vol. 8, Page 1, v. 8, n. 1, p. 1, 18 dez. 2019.
- ALTAMMAR, K. A. A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1155622, 17 abr. 2023.
- AMAI, R. S.; ROCHA, F. R. P.; NÓBREGA, J. A. SINAIS DE FUNDO EM ANÁLISE INSTRUMENTAL: UMA DISCUSSÃO ESSENCIAL EM CURSOS DE GRADUAÇÃO. **Quim. Nova**, v. 40, n. 2, p. 228–237, 2017.
- ANASTAS, P.; EGHBALI, N. Green Chemistry: Principles and Practice. **Chemical Society Reviews**, v. 39, n. 1, p. 301–312, 14 dez. 2009.

ANDRADE, T. DE. Inovação tecnológica e meio ambiente: a construção de novos enfoques. **Ambiente & Sociedade**, v. 7, n. 1, p. 89–105, jun. 2004.

ANKER, J. N. et al. Biosensing with plasmonic nanosensors. **Nature Materials** 2008 7:6, v. 7, n. 6, p. 442–453, jun. 2008.

ARBO, M. M. ESTUDIOS SISTEMÁTICOS EN TURNERA (TURNERACEAE). III. SERIES ANOMALAE Y TURNERA. **Bonplandia**, v. 14, n. 3–4, p. 115–318, 1 jul. 2005.

A, T. et al. Evaluation of Turnera subulata extract induced AgNPs for antimicrobial, antioxidant, cytotoxic, and anticancer properties against PANC-1. v. 1, p. 3, 2023.

BAIG, N. et al. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. **Materials Advances**, v. 2, n. 6, p. 1821–1871, 29 mar. 2021.

BARBOSA, V. T. Síntese biogênica de nanopartículas de prata usando própolis vermelha de Alagoas. 2018.

BATISTA, F. A. **Composição de filmes de alginato de sódio contendo nanopartículas de óxido de cobre (CuONPs) sintetizadas usando extrato da espécie Turnera Subulata (Chanana) e avaliação do potencial cicatrizante in vivo.** Disponível em: <https://www.sipac.ufpi.br/sigaa/public/programa/noticias_desc.jsf?lc=lc=en_US&id=146¬icia=534452071>. Acesso em: 17 nov. 2024.

BAYDA, S. et al. The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chemical–Physical Applications to Nanomedicine. **Molecules**, v. 25, n. 1, p. 112, 27 dez. 2019.

BHAGAT, S. et al. Trace Level Colorimetric Hg²⁺ Sensor Driven by Citrus japonica Leaf Extract Derived Silver Nanoparticles: Green Synthesis and Application. **Journal of Cluster Science**, v. 33, n. 5, p. 1865–1875, 16 set. 2022.

BHATTACHARJEE, S. DLS and zeta potential – What they are and what they are not? **Journal of Controlled Release**, v. 235, p. 337–351, 10 ago. 2016.

BINNIG, G.; QUATE, C. F.; GERBER, C. Atomic force microscope. **Physical Review Letters**, v. 56, n. 9, p. 930–933, 3 mar. 1986.

BINNING, G. et al. Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy. **Physical Review Letters**, v. 49, n. 1, p. 57, 5 jul. 1982.

BISWAS, A. et al. Advances in top–down and bottom–up surface nanofabrication: Techniques, applications & future prospects. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 170, n. 1–2, p. 2–27, 15 jan. 2012.

BOCZKOWSKI, J.; HOET, P. What's new in nanotoxicology? Implications for public health from a brief review of the 2008 literature. **Nanotoxicology**, v. 4, n. 1, p. 1–14, mar. 2010.

BROSKA, C. Z. et al. Chumbo em solos às margens de estradas na região metropolitana de Curitiba. 2010.

CAMPOS, É. DE A.; SILVA, I. F. DA; WARDEN, C. F. Exposição a metais em população adulta residente em áreas industriais: revisão sistemática da literatura. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 26, n. 6, p. 2253–2270, jun. 2021.

CANCINO, J.; MARANGONI, V. S.; ZUCOLOTTO, V. Nanotecnologia em medicina: aspectos fundamentais e principais preocupações. **Química Nova**, v. 37, n. 3, p. 521–526, 2014a.

CANCINO, J.; MARANGONI, V. S.; ZUCOLOTTO, V. Nanotechnology in medicine: concepts and concerns. **Química Nova**, v. 37, n. 3, 2014b.

CANCINO, J.; MARANGONI, V. S.; ZUCOLOTTO, V. Nanotecnologia em medicina: aspectos fundamentais e principais preocupações. **Química Nova**, v. 37, n. 3, p. 521–526, 2014c.

CÂNDIDO, M. A. et al. Synthesis of iron oxide nanoparticles stabilized with sodium citrate and TMAOH. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, p. e139111637698, 2 dez. 2022.

CAO, G. Nanostructures and Nanomaterials. **Nanostructures and Nanomaterials**, abr. 2004.

CARIOCA, L. J. **SENSOR COLORIMÉTRICO À BASE DE POLIDIACETILENO PARA DETECÇÃO DE AGROTÓXICOS EM ÁGUA**. [s.l: s.n.].

CHUNG, T. et al. Plasmonic Nanostructures for Nano-Scale Bio-Sensing. **Sensors** 2011, Vol. 11, Pages 10907-10929, v. 11, n. 11, p. 10907–10929, 21 nov. 2011.

COSTA. **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO PERFIL FITOQUÍMICO E ATIVIDADES BIOLÓGICAS DA Turnera subulata SM** Revista Biodiversidade-v. [s.l: s.n.].

CRESCENTINO, D. B. et al. Biogenic silver nanoparticles obtention from *Aspergillus terreus* fungi. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 7, n. 2, p. e68722, 8 abr. 2024.

DA COSTA, M. A. F.; DA COSTA, M. DE F. B. BIOSSEGURANÇA, BIOTECNOLOGIA E NANOTECNOLOGIA: CONTRIBUIÇÕES PARA OS PROCESSOS DE ENSINO. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 43939–43954, 7 jun. 2021.

DALLA, T. C.; PORTANOVA, R. S. **JUSTIÇA AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE: FUNDAMENTOS PARA A GOVERNANÇA DA ÁGUA** **ENVIRONMENTAL JUSTICE AND SUSTAINABILITY: GROUNDS FOR THE WATER GOVERNANCE**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/1766320644833496>.<http://lattes.cnpq.br/7704114415519816>>.

DAUTHAL, P.; MUKHOPADHYAY, M. Noble Metal Nanoparticles: Plant-Mediated Synthesis, Mechanistic Aspects of Synthesis, and Applications. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 55, n. 36, p. 9557–9577, 14 set. 2016.

DE FREITAS, P. C. et al. EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM PARA DETERMINAÇÃO COLORIMÉTRICA DE FERRO EM SOLO: UMA COMPARAÇÃO COM ESPECTROMETRIA DE MASSA COM PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO. **Química Nova**, v. 38, n. 4, p. 570–574, 1 maio 2015.

DE MEDEIROS, C. G. et al. SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS ANTIOXIDANTES FEITAS COM PRATA E POLISSACARÍDEOS SULFATADOS DA ALGA *Gracilaria birdiae*. **HOLOS**, v. 5, p. 1–19, 30 set. 2021.

DE OLIVEIRA, P. F. M. et al. Challenges and opportunities in the bottom-up mechanochemical synthesis of noble metal nanoparticles. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 8, n. 32, p. 16114–16141, 18 ago. 2020.

DOS SANTOS, D. P.; GRASSESCHI, D. NANOMATERIAIS PLASMÔNICOS: PARTE II. QUÍMICA DE COORDENAÇÃO DE SUPERFÍCIE E SUA APLICAÇÃO EM SENSORES E CATALISADORES. **Química Nova**, v. 43, n. 10, p. 1482–1499, 22 fev. 2021a.

DOS SANTOS, D. P.; GRASSESCHI, D. NANOMATERIAIS PLASMÔNICOS: PARTE II. QUÍMICA DE COORDENAÇÃO DE SUPERFÍCIE E SUA APLICAÇÃO EM SENSORES E CATALISADORES. **Química Nova**, v. 43, n. 10, p. 1482–1499, 22 fev. 2021b.

DRUMM, F. C. et al. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA PROVENIENTE DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DO PETRÓLEO EM VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, 7 abr. 2014.

DUARTE, L. G. et al. **PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS E SUAS FUNCIONALIDADES**. [s.l.: s.n.].

DUMAN, H. et al. Silver Nanoparticles: A Comprehensive Review of Synthesis Methods and Chemical and Physical Properties. **Nanomaterials 2024, Vol. 14, Page 1527**, v. 14, n. 18, p. 1527, 20 set. 2024.

EBRAHIMINEZHAD, A. et al. **Chemical and Biological Approaches for the Synthesis of Silver Nanoparticles; A mini Review** **Trends in Pharmaceutical Sciences**. [s.l.: s.n.].

EL-SAYED, M. A. Some interesting properties of metals confined in time and nanometer space of different shapes. **Accounts of Chemical Research**, v. 34, n. 4, p. 257–264, 2001.

ERDEMIR, D.; LEE, A. Y.; MYERSON, A. S. Nucleation of crystals from solution: Classical and two-step models. **Accounts of Chemical Research**, v. 42, n. 5, p. 621–629, 19 maio 2009.

ERJAE, H.; RAJAIAN, H.; NAZIFI, S. Synthesis and characterization of novel silver nanoparticles using Chamaemelum nobile extract for antibacterial application. **Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology**, v. 8, n. 2, p. 025004, 5 maio 2017.

EVANS, E. H. ATOMIC MASS SPECTROMETRY | Inductively Coupled Plasma. **Encyclopedia of Analytical Science: Second Edition**, p. 229–237, 1 jan. 2005.

FAKAYODE, S. O. et al. Electrochemical and Colorimetric Nanosensors for Detection of Heavy Metal Ions: A Review. **Sensors** **2023**, Vol. 23, Page 9080, v. 23, n. 22, p. 9080, 9 nov. 2023.

FERREIRA, H. S.; RANGEL, C. M. NANOTECNOLOGIA: ASPECTOS GERAIS E POTENCIAL DE APLICAÇÃO EM CATÁLISE. **Quim. Nova**. [s.l: s.n.].

FERREIRA, H. S.; RANGEL, M. D. C. Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise. **Química Nova**, v. 32, n. 7, p. 1860–1870, 2009b.

FERREIRA, M. D. AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIMICROBIANA DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA BIOSINTETIZADAS A PARTIR DA *Schinus terebinthifolius* Raddi. [s.l: s.n.].

FU, X. et al. Top-down fabrication of shape-controlled, monodisperse nanoparticles for biomedical applications. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 132, p. 169–187, 1 jul. 2018.

GANESHKUMAR, V. et al. Use of mixed wastewaters from piggery and winery for nutrient removal and lipid production by *Chlorella* sp. MM3. **Bioresource Technology**, v. 256, p. 254–258, 1 maio 2018.

GEBAUER, D.; CÖLFEN, H. Prenucleation clusters and non-classical nucleation. **Nano Today**, v. 6, n. 6, p. 564–584, 1 dez. 2011.

GEGER, E. N.; ERENLER, R. Biogenic synthesis of silver nanoparticles using *Echium vulgare*: Characterisation, quantitative analysis of bioactive compounds, antioxidant activity and catalytic degradation. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 100, n. 5, p. 101003, 1 maio 2023.

GOMES, D. M. D. et al. Síntese verde de nanopartículas de prata intermediada por fungo anamórfico e eficácia antibacteriana e antifúngica. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais**, v. 15, n. 2, p. 433–443, 26 ago. 2020.

GOVINDARAJULU, B. et al. MOSQUITO LARVICIDAL EFFICACY OF LEAF EXTRACTS OF TURNERA SUBULATA AND GREEN SYNTHESIZED SILVER NANOPARTICLES ON CULEX QUINQUEFASCIATUS. **World Journal of Pharmaceutical Research**, v. 6, p. 777–788, 2017.

GRASSESCHI, D.; DOS SANTOS, D. P. NANOMATERIAIS PLASMÔNICOS: PARTE I. FUNDAMENTOS DA ESPECTROSCOPIA DE NANOPARTÍCULAS E SUA RELAÇÃO COM O EFEITO SERS. **Química Nova**, v. 43, n. 10, p. 1463–1481, 22 fev. 2021.

GUISBIERS, G.; MEJÍA-ROSALES, S.; LEONARD DEEPAK, F. Nanomaterial Properties: Size and Shape Dependencies. **Journal of Nanomaterials**, v. 2012, n. 1, 30 jan. 2012.

HALDAR, S.; GHOSH, A. Microbial and plant-assisted heavy metal remediation in aquatic ecosystems: a comprehensive review. **3 Biotech** 2020 **10:5**, v. 10, n. 5, p. 1–13, 20 abr. 2020.

HAO, X. et al. Simple method for visual detection of nitrite using fluorescence and colorimetry by poly (tannic acid) nanoparticles. **Analytica Chimica Acta**, v. 1263, p. 341280, 4 jul. 2023.

HELTAI, G. et al. Application of flexible multi-elemental ICP-OES detection in fractionation of potentially toxic element content of solid environmental samples by a sequential extraction procedure. **Microchemical Journal**, v. 149, 1 set. 2019.

HOMOLA, J.; YEE, S. S.; GAUGLITZ, G. Surface plasmon resonance sensors: review. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 54, n. 1–2, p. 3–15, 25 jan. 1999.

HOVE, M. A. V. Atomic-scale structure: From surfaces to nanomaterials. **Surface Science**, v. 603, n. 10–12, p. 1301–1305, 1 jun. 2009.

HYEON, T. Chemical synthesis of magnetic nanoparticles. **Chemical Communications**, v. 3, n. 8, p. 927–934, 3 abr. 2003.

INDIARTO, R. et al. Bottom-up nanoparticle synthesis: a review of techniques, polyphenol-based core materials, and their properties. **European Food Research and Technology** 2021 **248:1**, v. 248, n. 1, p. 1–24, 29 set. 2021.

JEURISSEN, R. John Elkington, Cannibals With Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. **Journal of Business Ethics** 2000 **23:2**, v. 23, n. 2, p. 229–231, 2000.

JIN, H. et al. An electrochemical aptasensor for lead ion detection based on catalytic hairpin assembly and porous carbon supported platinum as signal amplification †. 2020.

JOUDEH, N.; LINKE, D. Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. **Journal of Nanobiotechnology** 2022 **20:1**, v. 20, n. 1, p. 1–29, 7 jun. 2022.

KELLY, K. L. et al. The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment. 2003.

KHAN, I.; SAEED, K.; KHAN, I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 12, n. 7, p. 908–931, 1 nov. 2019.

KINUPP, V. F. et al. Plantas alimentícias não convencionais (PANC) no Brasil: guia de identificação, aspectos nutricionais e receitas ilustradas. 2021.

KROTO, H. W. et al. C60: Buckminsterfullerene. **Nature** **1985 318:6042**, v. 318, n. 6042, p. 162–163, 1 nov. 1985.

KUMARI, S. et al. A comprehensive review on various techniques used for synthesizing nanoparticles. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 27, p. 1739–1763, 1 nov. 2023.

KUSUMA, S. A. F. et al. Gold Nanoparticle-Based Colorimetric Sensors: Properties and Application in Detection of Heavy Metals and Biological Molecules. **Sensors** **2023, Vol. 23, Page 8172**, v. 23, n. 19, p. 8172, 29 set. 2023.

KVASNIČKA, P.; HOMOLA, J. Optical sensors based on spectroscopy of localized surface plasmons on metallic nanoparticles: Sensitivity considerations. **Biointerphases**, v. 3, n. 3, p. FD4–FD11, 1 set. 2008.

LEERSNYDER, I. DE et al. Revealing the Importance of Aging, Environment, Size and Stabilization Mechanisms on the Stability of Metal Nanoparticles: A Case Study for Silver Nanoparticles in a Minimally Defined and Complex Undefined Bacterial Growth Medium. **Nanomaterials** **2019, Vol. 9, Page 1684**, v. 9, n. 12, p. 1684, 25 nov. 2019.

LEE, Y. M.; KIM, S. E.; PARK, J. E. Strong coupling in plasmonic metal nanoparticles. **Nano Convergence** **2023 10:1**, v. 10, n. 1, p. 1–28, 20 jul. 2023.

LEMO, T. A. B. et al. A utilização da síntese verde para obtenção de nanopartículas de prata a partir de extratos de girassol (*Helianthus annuus*). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e41810716795, 27 jun. 2021.

LENARDÃO, E. J. et al. “Green chemistry”: os 12 princípios da química verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. **Química Nova**, v. 26, n. 1, p. 123–129, 2003.

LEONG, S. X. et al. Emerging nanosensor platforms and machine learning strategies toward rapid, point-of-need small-molecule metabolite detection and monitoring. **Chemical Science**, v. 13, n. 37, p. 11009–11029, 28 set. 2022.

LIBERATO, P. DA S.; LIMA, D. V. T. DE; SILVA, G. M. B. DA. PANCs - PLANTAS ALIMENTÍCIAS NÃO CONVENCIONAIS E SEUS BENEFÍCIOS NUTRICIONAIS. **Environmental Smoke**, v. 2, n. 2, p. 102–111, 1 jul. 2019.

LINK, S.; EL-SAYED, M. A. Size and Temperature Dependence of the Plasmon Absorption of Colloidal Gold Nanoparticles. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 103, n. 21, p. 4212–4217, 27 maio 1999.

LUCHESI, B. R. Desenvolvimento de sensores colorimétricos baseados em compostos amido/cera de abelha e antocianinas por casting contínuo para embalagens inteligentes. 19 dez. 2023.

LU, F. Silver nanomaterials sensing of mercury ions in aqueous medium. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 456, p. 214363, 1 abr. 2022.

LURDES, M. D. R. **Caracterização e aplicação de nanopartículas de prata preparadas a partir do extrato de Schinus terebinthifolius como sensor colorimétrico para determinação de Hg²⁺ em amostras de interesse ambiental.** [s.l: s.n.].

MAGUIRE, C. M. et al. Characterisation of particles in solution – a perspective on light scattering and comparative technologies. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 19, n. 1, p. 732, 31 dez. 2018.

MAKAROV, V. V et al. “Green” Nanotechnologies: Synthesis of Metal Nanoparticles Using Plants. **Acta Naturae**, v. 6, n. 1, p. 35–44, 15 mar. 2014.

MANZINI, F. F.; SÁ, K. B.; PLICAS, L. M. DE A. METAIS PESADOS: FONTE E AÇÃO TOXICOLÓGICA. 2010.

MARELLA, T. K.; SAXENA, A.; TIWARI, A. Diatom mediated heavy metal remediation: A review. **Bioresource Technology**, v. 305, p. 123068, 1 jun. 2020.

MELO, B. G. Síntese verde e caracterização de nanopartículas de prata usando extrato aquoso de erva mate (*Ilex paraguariensis*). **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.**, 2015.

MEMON, R. et al. Ultrasensitive colorimetric detection of Hg²⁺ in aqueous media via green synthesis by *Ziziphus mauritiana* Leaf extract-based silver nanoparticles. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 102, n. 18, p. 7046–7061, 2022.

MITTAL, A. K.; CHISTI, Y.; BANERJEE, U. C. Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. **Biotechnology Advances**, v. 31, n. 2, p. 346–356, 1 mar. 2013a.

MITTAL, A. K.; CHISTI, Y.; BANERJEE, U. C. Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. **Biotechnology Advances**, v. 31, n. 2, p. 346–356, 1 mar. 2013b.

MOOND, M. et al. Biosynthesis of Silver Nanoparticles Utilizing Leaf Extract of *Trigonella foenum-graecum* L. for Catalytic Dyes Degradation and Colorimetric Sensing of Fe³⁺/Hg²⁺. **Molecules**, v. 28, n. 3, 1 fev. 2023.

MOREIRA, M. E. DA C. **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO PERFIL FITOQUÍMICO E ATIVIDADES BIOLÓGICAS DA *Turnera subulata* SM** *Revista Biodiversidade-v.* [s.l: s.n.].

MOSCHEM, J. DA C.; GONÇALVES, P. R. **Impacto Toxicológico de Metais Pesados: Uma Análise de Efeitos Bioquímicos e Celulares.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://periodicos.ufes.br/healthandbiosciences>>. Acesso em: 18 nov. 2024a.

MOSCHEM, J. DA C.; GONÇALVES, P. R. Impacto Toxicológico de Metais Pesados: Uma Análise de Efeitos Bioquímicos e Celulares. **Health and Biosciences**, v. 1, n. 2, p. 88–100, 31 ago. 2020b.

MUSADIS, C. A. METAIS PESADOS E SEUS EFEITOS NA SAÚDE HUMANA: REVISÃO DE LITERATURA. **Revista ft**, v. 29, n. 140, p. 35–36, 11 nov. 2024.

MUSCHNER, V. C. et al. Phylogeny, biogeography and divergence times in *Passiflora* (Passifloraceae). **Genetics and Molecular Biology**, v. 35, n. 4 SUPPL., p. 1036–1043, 2012.

NEGRÃO, G. N.; OLIVEIRA, B. H. M.; BUTIK, M. Monitoramento ambiental de metais pesados em macrófita aquática pela análise de Espectrometria de Absorção Atômica – AAS na Bacia do Rio Cascavel, Guarapuava, PR. **Revista Geoaraguaia, ISSN-e 2236-9716, Vol. 11, Nº. 1, 2021, págs. 338-354**, v. 11, n. 1, p. 338–354, 2021.

NOGUEZ, C. Surface Plasmons on Metal Nanoparticles: The Influence of Shape and Physical Environment. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 111, n. 10, p. 3606–3619, 15 mar. 2007.

OLIVEIRA, J. Â. M. DE et al. NÍVEIS DE CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS NA ÁREA DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO MUNICÍPIO DE JANUÁRIA-MG. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 629–640, 4 abr. 2019a.

OLIVEIRA, J. A. DOS S. et al. **SÍNTESE BIOLÓGICA DE NANOPARTÍCULAS MEDIADA POR MICRO-ORGANISMOS ENDOFÍTICOS.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.scopus.com>>.

PANIGRAHI, S. et al. General method of synthesis for metal nanoparticles. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 6, n. 4, p. 411–414, ago. 2004.

PARRA-NARANJO, A. et al. Bioactivity of the Genus *Turnera*: A Review of the Last 10 Years. **Pharmaceuticals 2023, Vol. 16, Page 1573**, v. 16, n. 11, p. 1573, 7 nov. 2023.

PASSOS, M. Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC) ocorrentes em Roraima. **Revista Eletrônica Científica Ensino Interdisciplinar**, v. 5, n. 14, p. 388–404, 28 out. 2019.

PATEL, M. R. et al. Synthesis of multicolor silver nanostructures for colorimetric sensing of metal ions (Cr^{3+} , Hg^{2+} and K^{+}) in industrial water and urine samples with different spectral characteristics. **Environmental Research**, v. 232, p. 116318, 1 set. 2023.

PATRA, R. C. et al. Tail hair as an indicator of environmental exposure of cows to lead and cadmium in different industrial areas. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 66, n. 1, p. 127–131, 1 jan. 2007.

PIRIYA, A. V. S. et al. Colorimetric sensors for rapid detection of various analytes. **Materials Science and Engineering: C**, v. 78, p. 1231–1245, 1 set. 2017.

RAI, M. Nanobiotecnologia verde: biossínteses de nanopartículas metálicas e suas aplicações como nanoantimicrobianos. **Ciência e Cultura**, v. 65, n. 3, p. 44–48, jul. 2013.

RAOTA, C. S. **SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA A PARTIR DO EXTRATO DO BAGAÇO DE *Vitis labrusca* (CULTIVAR Ives), CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO NA DESINFECÇÃO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS**. [s.l: s.n.].

REDDY, N. V. et al. Phytosynthesis of Silver Nanoparticles Using *Perilla frutescens* Leaf Extract: Characterization and Evaluation of Antibacterial, Antioxidant, and Anticancer Activities. **International Journal of Nanomedicine**, v. 16, p. 15, 2021.

REHMAN, K. et al. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. 2017.

RESTREPO, C. V.; VILLA, C. C. Synthesis of silver nanoparticles, influence of capping agents, and dependence on size and shape: A review. **Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management**, v. 15, 1 maio 2021.

RIBEIRO, P. A. et al. NANOPARTÍCULA DE OURO PARA DETECÇÃO DO ÁCIDO PALMÍTICO. **Pesquisas e avanços em Segurança de Alimentos**, 4 set. 2023.

RISANA, M. Z. et al. Sensitive and selective colorimetric sensor detection of Sn (II): An aqueous, paper, and gel-based method by green biomimetic silver nanoparticles. **Talanta Open**, v. 10, p. 100340, 1 dez. 2024.

RODRIGUES, J. F. B. et al. Aplicação de método estatístico no estudo da influência do peróxido de hidrogênio e do borohidreto de sódio na síntese de nanopartículas de prata (AGNPS). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 3, p. e12395, 16 set. 2019.

ROMEIRO, A. R. Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-ecológica. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 65–92, 2012.

SAKTHIVEL, P.; SEKAR, K. A Sensitive Isoniazid Capped Silver Nanoparticles - Selective Colorimetric Fluorescent Sensor for Hg^{2+} Ions in Aqueous Medium. **Journal of Fluorescence**, v. 30, n. 1, p. 91–101, 1 jan. 2020.

SALEH, T. A. Trends in the sample preparation and analysis of nanomaterials as environmental contaminants. **Trends in Environmental Analytical Chemistry**, v. 28, p. e00101, 1 dez. 2020.

SANGAONKAR, G. M. et al. Selective interaction between phytomediated anionic silver nanoparticles and mercury leading to amalgam formation enables highly sensitive, colorimetric and memristor-based detection of mercury. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 2037, 6 fev. 2020.

SANTOS, A. P. **Síntese verde de nanopartículas de prata com extrato aquoso de Calendula officinalis e diodos emissores de luz (LED)**. Ponta Grossa: [s.n.]. Disponível em: <<http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/3041>>. Acesso em: 27 fev. 2024.

SANTOS, C. I. L. et al. SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE PONTOS QUÂNTICOS AMBIENTALMENTE AMIGÁVEIS, UM MEIO SIMPLES DE EXEMPLIFICAR E EXPLORAR ASPECTOS DA NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA EM CURSOS DE GRADUAÇÃO. **Química Nova**, v. 43, n. 6, p. 813–822, 22 jul. 2020.

SANTOS, S. S. DOS. **Síntese de nanopartículas de prata mediada por extratos vegetais de Astrocaryum aculeatum (tucumã)**. [s.l: s.n.].

SAPYEN, W. et al. Selective colorimetric detection of Cr(VI) using starch-stabilized silver nanoparticles and application for chromium speciation. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 274, 5 jun. 2022.

SERVICE, R. F. Nanotoxicology. Nanotechnology grows up. **Science (New York, N.Y.)**, v. 304, n. 5678, p. 1732–1734, 18 jun. 2004.

SHAN, Y. et al. On-site quantitative Hg²⁺ measurements based on selective and sensitive fluorescence biosensor and miniaturized smartphone fluorescence microscope. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 132, p. 238–247, 1 maio 2019.

SHARMA, V. K.; YNGARD, R. A.; LIN, Y. Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 145, n. 1–2, p. 83–96, 30 jan. 2009a.

SHARMA, V. K.; YNGARD, R. A.; LIN, Y. Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 145, n. 1–2, p. 83–96, 30 jan. 2009b.

SINGH, D. K. et al. Mycosynthesis of Bactericidal Silver and Polymorphic Gold Nanoparticles: Physicochemical Variation Effects and Mechanism. **Nanomedicine**, v. 13, n. 2, p. 191–207, 2018.

SINGH, R. et al. Heavy metals and living systems: An overview. **Indian Journal of Pharmacology**, v. 43, n. 3, p. 246–253, jun. 2011.

SOARES, E. A.; FLORÊNCIO, N.; SILVA, D. A. **ASPECTOS DA BIOLOGIA FLORAL DE *Turnera subulata* Sm. EM CAPITÃO POÇO - PA.** [s.l: s.n.].

SOUZA, N. C. **PROPRIEDADES ANTI-INFLAMATÓRIAS E ANTIOXIDANTES DOS EXTRATOS AQUOSOS DAS FOLHAS DE *Turnera subulata* Sm. E *Anacardium occidentale* L.** [s.l: s.n.].

SOUZA, P. G. CONCEITOS E ADOÇÃO DE QUÍMICA VERDE: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 248, 4 abr. 2019.

SREEBAMOL, K. S.; DEVIKA, J.; ANU, G. Biofabrication of Silver Nanoparticles for Selective and Sensitive Colorimetric Detection of Hg(II) Ions. **Asian Journal of Chemistry**, v. 35, n. 1, p. 153–158, 1 jan. 2023.

STARK, A. A. P. Metais pesados: prejuízos causados e répteis como bioindicadores de monitoramento. 4 mar. 2022.

TALAPIN, D. V.; SHEVCHENKO, E. V. Introduction: Nanoparticle chemistry. **Chemical Reviews**, v. 116, n. 18, p. 10343–10345, 28 set. 2016.

TEIXEIRA, S. C.; SOARES, N. DE F. F.; STRINGHETA, P. C. **Development of colorimetric altered intelligent packaging incorporated with anthocyanins: A critical review. Brazilian Journal of Food Technology** Instituto de Tecnologia de Alimentos - ITAL, , 2021.

TEIXEIRA, V. B. **Síntese biogênica de nanopartículas de prata usando própolis vermelha de Alagoas.** [s.l: s.n.].

THULIN, M. et al. Phylogeny of the Turneraceae clade (Passifloraceae s.l.): Trans–Atlantic disjunctions and two new genera in Africa. **TAXON**, v. 61, n. 2, p. 308–323, 1 abr. 2012.

TORRESI, S. I. C. DE; PARDINI, V. L.; FERREIRA, V. F. O que é sustentabilidade? **Química Nova**, v. 33, n. 1, p. 1–1, 2010.

TUNDO, P. et al. Synthetic pathways and processes in green chemistry. Introductory overview. **Pure and Applied Chemistry**, v. 72, n. 7, p. 1207–1228, 1 jan. 2000.

VARANDA, L. C. et al. **Biossíntese de nanopartículas de ouro pela bactéria endofítica *Bacillus* sp. da flor de lavandin e aplicação em reações de Knoevenagel.** [s.l: s.n.].

VASHIST, A. et al. Recent advances in nanogels for drug delivery and biomedical applications. **Biomaterials Science**, 2024.

VIEIRA, R. et al. Decomposição catalítica da hidrazina sobre irídio suportado em compósitos à base de nanofibras de carbono para propulsão espacial: testes em condições reais. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 42–45, 2005.

VIVEKRAJ, P.; GIDEON, A. V. Enhanced Photocatalytic Degradation Properties of Zinc Oxide Nanoparticles Synthesized by using *Turnera subulata* Sm. **International Journal for Pharmaceutical Research Scholars**, v. 7, n. 3, p. 30–40, 2018.

WENDLING, M. **Sensores**. [s.l: s.n.].

WHITESIDES, G. M. The “right” size in nanobiotechnology. **Nature Biotechnology** **2003 21:10**, v. 21, n. 10, p. 1161–1165, 30 set. 2003.

WILLETS, K. A.; VAN DUYNE, R. P. Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing. **Annual Review of Physical Chemistry**, v. 58, n. Volume 58, 2007, p. 267–297, 5 maio 2007.

YANG, F.-Q.; GE, L. Colorimetric Sensors: Methods and Applications. **Sensors**, v. 23, n. 24, p. 9887, 18 dez. 2023.

ZHAO, Y.; XIE, X. A Novel Electrochemical Aptamer Biosensor Based on DNzyme Decorated Au@Ag Core-Shell Nanoparticles for Hg²⁺ Determination. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 29, n. 2, p. 232–239, 1 fev. 2018.