

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

AFONSO EDUARDO MAGALHÃES MUZITANO

**USO EXPERIMENTAL DE PONTOS QUÂNTICOS DE GRAFENO PARA REMOÇÃO DE
MATERIAL NUCLEAR DE SUPERFÍCIES METÁLICAS E PLÁSTICAS**

Rio de Janeiro 2024

AFONSO EDUARDO MAGALHÃES MUZITANO

**USO EXPERIMENTAL DE PONTOS QUÂNTICOS DE GRAFENO PARA REMOÇÃO DE
MATERIAL NUCLEAR DE SUPERFÍCIES METÁLICAS E PLÁSTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Nucleares

Orientador: Prof. Drº. Ralph Santos-Oliveira

Rio de Janeiro 2024

MUZI Muzitano, Afonso Eduardo Magalhães.

Uso experimental de pontos quânticos de grafeno para remoção de material nuclear de superfícies metálicas e plásticas / Afonso Eduardo Magalhães Muzitano. Rio de Janeiro: CNEN/IEN 2024

xii, 64 fl.: il.

Orientador: Prof. Drº. Ralph Santos-Oliveira

Dissertação (Mestrado em Aplicações de Técnicas Nucleares na Indústria, Saúde, Segurança e Meio Ambiente) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2024.

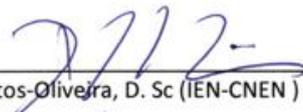
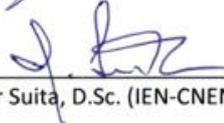
1. Pontos quânticos de grafeno. 2. Descontaminação radiológica.
3. Superfícies metálicas e plásticas. 4. Isótopos radioativos

USO EXPERIMENTAL DE PONTOS QUÂNTICOS DE GRAFENO PARA REMOÇÃO DE MATERIAL NUCLEAR DE SUPERFÍCIES METÁLICAS E PLÁSTICAS

Afonso Eduardo Magalhães Muzitano

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES

Aprovada por:

 Ralph Santos-Oliveira, D. Sc (IEN-CNEN) - Orientador	CPF: 076.894.927-03
 Julio Cezar Suita, D.Sc. (IEN-CNEN) - Membro Interno	CPF: 535.218.627-04
 Marília Amável Gomes Soares, D.Sc. (IEN-CNEN) - Membro Interno	CPF: 098.837.267-32
 Marta de Souza Albernaz, D.Sc. (UFRJ) - Membro Externo	CPF: 632.837.437-20
 Natália Cristina Gomes da Silva, D.Sc. (IEN-CNEN) - Membro Interno	CPF: 151.712.447-66

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2024

AGRADECIMENTOS

Ao alcançar a conclusão deste mestrado, sinto-me profundamente grato a todos que estiveram ao meu lado ao longo dessa jornada. Primeiramente, agradeço à minha amada esposa, *Gabrielle de Carvalho Fernandes Muzitano*, cujo apoio constante, paciência e compreensão foram fundamentais para que eu pudesse me dedicar aos estudos. Gabrielle, suas palavras de encorajamento e o carinho que você me ofereceu nos momentos mais desafiadores foram essenciais para que eu continuasse firme no caminho até aqui.

Aos meus queridos filhos, *Eduardo Fernandes Muzitano* e *Laura Fernandes Muzitano*, agradeço por compreenderem as ausências e por serem minha maior motivação. Cada conquista minha é, na verdade, um reflexo do amor que sinto por vocês e do desejo de ser um exemplo para suas vidas.

Aos meus pais, *Afonso Galvão Muzitano* e *Iracema Almeida Magalhães Muzitano*, minha gratidão é imensurável. Vocês me ensinaram os valores de dedicação, perseverança e integridade, que me guiaram em cada etapa dessa caminhada. Este título é também um tributo ao que vocês construíram em mim desde a infância.

Não posso deixar de expressar meu profundo agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. *Ralph Santos-Oliveira*. Sua orientação precisa, seu conhecimento e, principalmente, seu apoio constante foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios acadêmicos e pessoais ao longo desse processo.

Aos meus colegas de trabalho do HCE (Hospital Central do Exército), meu sincero agradecimento por todo o suporte e camaradagem. O equilíbrio entre a vida profissional e acadêmica só foi possível graças à colaboração de todos vocês.

Por fim, aos meus colegas do mestrado PPGIEN, turma de 2022, agradeço pela troca de experiências, pelo apoio mútuo e pelas amizades construídas ao longo dessa trajetória. Juntos, compartilhamos desafios e vitórias, e cada um de vocês contribuiu de forma especial para este momento.

Este título, portanto, é uma conquista coletiva, fruto do esforço, apoio e carinho de todos vocês.
De coração, muito obrigado!

Porque está escrito: Por minha vida, diz o Senhor, diante de mim se dobrará todo joelho, e toda língua dará glória a Deus.

Romanos 14:11 (Is 45,23)

RESUMO

O uso experimental de Pontos Quânticos de Grafeno (GQDs) para a remoção de material radioativo de superfícies metálicas e plásticas representa uma abordagem inovadora e promissora no campo da descontaminação radiológica. Este estudo explorou a eficácia dos GQDs na adsorção de isótopos radioativos, como Tecnécio-99m e Iodo-131, utilizando uma combinação de revisão bibliográfica e experimentação prática. Os GQDs foram sintetizados por meio de oxidação eletroquímica e caracterizados utilizando técnicas avançadas, incluindo Espectroscopia Raman, Microscopia de Força Atômica (AFM) e Difração de Raios-X em Pó (PXRD). A revisão da literatura, abrangendo artigos dos últimos dez anos, revelou que os GQDs possuem propriedades únicas, como alta estabilidade química, grande área superficial e versatilidade eletrônica, que os tornam ideais para a descontaminação. Estudos indicam que a funcionalização dos GQDs pode aumentar significativamente sua afinidade por isótopos específicos, melhorando a eficiência da descontaminação. Os experimentos demonstraram que os GQDs foram altamente eficazes na remoção de Iodo-131 de superfícies de Zinco, e variaram em eficácia na remoção de Tecnécio-99m, com melhor desempenho no PVC. A análise estatística indicou que a interação entre GQDs e radioisótopos foi mais crucial do que o tipo de material da superfície contaminada. Os resultados sugerem que os GQDs são uma ferramenta promissora para mitigar contaminações radioativas, oferecendo um método rápido e eficaz para descontaminação. As implicações deste estudo são significativas para a saúde pública e segurança ambiental, destacando a necessidade de continuar a pesquisa e desenvolvimento para otimizar a produção e aplicação dos GQDs. Este estudo não só valida a eficácia dos GQDs, mas também abre novas possibilidades para sua aplicação em outras áreas, como o tratamento de resíduos radioativos e a purificação de água contaminada, contribuindo para um futuro mais seguro e sustentável.

Palavras-chaves: Pontos quânticos de grafeno, descontaminação radiológica, superfícies metálicas e plásticas, isótopos radioativos.

ABSTRACT

The experimental use of Graphene Quantum Dots (GQDs) for the removal of nuclear material from metallic and plastic surfaces represents an innovative and promising approach in the field of radiological decontamination. This study explored the effectiveness of GQDs in adsorbing radioactive isotopes such as technetium-99m and iodine-131, using a combination of literature review and practical experimentation. The GQDs were synthesized through electrochemical oxidation and characterized using advanced techniques, including Raman spectroscopy, Atomic Force Microscopy (AFM) and Powder X-Ray Diffraction (PXRD). The literature review, covering articles from the last ten years, revealed that GQDs have unique properties, such as high chemical stability, large surface area and electronic versatility, which make them ideal for decontamination. Studies indicate that the functionalization of GQDs can significantly increase their affinity for specific isotopes, improving decontamination efficiency. The experiments showed that GQDs were highly effective in removing iodine-131 from zinc surfaces, and varied in effectiveness in removing technetium-99m, with better performance on PVC. Statistical analysis indicated that the interaction between GQDs and radioisotopes was more crucial than the type of contaminated surface material. The results suggest that GQDs are a promising tool for mitigating radioactive contamination, offering a fast and effective method for decontamination. The implications of this study are significant for public health and environmental safety, highlighting the need for continued research and development to optimize the production and application of GQDs. This study not only validates the effectiveness of GQDs, but also opens up new possibilities for their application in other areas, such as the treatment of radioactive waste and the purification of contaminated water, contributing to a safer and more sustainable future.

Keywords: Graphene Quantum Dots; Radiological decontamination; Metallic and plastic surfaces; Radioactive isotopes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Análise Micrográfica Eletrônica do Pó de Zircônia (ZrO).	19
Figura 2: Representações Esquemáticas de Nanotubos de Grafeno.....	19
Figura 3: Imagem de um filme fino de grafeno.....	20
Figura 4: Variedade de Nanopartículas Empregadas como Agentes Antimicrobianos.....	21
Figura 5: Representação esquemática do procedimento experimental realizado nas superfícies selecionadas.	44
Figura 6: Análise por espalhamento de luz dinâmico dos GQDs ultradiluídos.....	46
Figura 7: Análise espectroscópica por Raman dos GQDs ultradiluídos.	47
Figura 8: Análise de difração de raio-x em pó dos GQDs ultradiluídos.	48
Figura 9: Análises das propriedades óticas (absorbância e fluorescência) dos GQDs ultradiluídos.	49
Figura 10: Análise de microscopia de força atômica dos GQDs ultradiluídos.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFM – *Atomic Force Microscopy*

AOPs – *Advanced Oxidation Processes*

CDC – *Centers for Disease Control and Prevention*

CDots – Pontos de Carbono

CVD – *Chemical Vapor Deposition*

DASD(NM) – *Deputy Assistant Secretary of Defense for Nuclear Matters*

DLS – *Dynamic Light Scattering*

EDTA - *Ethylenediaminetetraacetic Acid*

EUA – Estados Unidos da América

FBI – Federal Bureau of Investigation

GO – Óxido de Grafeno

GQDs – *Graphene Quantum Dots*

H₂ – Molécula de Hidrogênio

H₂S – Sulfeto de Hidrogênio

HIDEX – Fabricante de contadores gama e outros instrumentos de medição nuclear

HYDRUS-1D – Software para modelagem de fluxo de água e transporte de solutos em meios porosos

IAEA – *International Atomic Energy Agency*

ICEL – Instrumentos e Componentes Eletronicos LTDA

keV – quiloelétrons-volts

ONU – Organização das Nações Unidas

PDI – *Polydispersity Index*

PLGA – Poli (ácido láctico-co- ácido glicólico)

PXRD – *Powder X-ray Diffraction*

PVC – Policloreto de Vinila

RDD – *Radiological Dispersal Device*

SpringerLink – Base de dados da editora *Springer Nature*

UV – Luz Ultravioleta

UV-Vis – Espectroscopia no Ultravioleta Visível

XPS – *X-ray photoelectron spectroscopy*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	16
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA.....	17
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 NANOTECNOLOGIA E NANOMATERIAIS: UMA EXPLORAÇÃO AVANÇADA EM ESCALA ATÔMICA E MOLECULAR.....	18
2.1.1 AS NANOPARTÍCULAS.....	20
2.1.2 O GRAFENO.....	22
2.2 OS PONTOS QUÂNTICOS DE GRAFENO.....	25
2.3 AUMENTO DA AFINIDADE POR ISÓTOPOS ESPECÍFICOS.....	26
2.4 DESCONTAMINAÇÃO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS E PLÁSTICAS.....	28
2.5 PANORAMA GERAL SOBRE O TERRORISMO: UMA ANÁLISE CONTEMPORÂNEA ...	29
2.6 FUNDAMENTOS HISTÓRICOS E ARQUEOLÓGICOS DO TERRORISMO.....	30
2.6.1 AMEAÇAS DE TERRORISMO NUCLEAR E RADIOATIVO: IMPLICAÇÕES E DESAFIOS GLOBAIS.....	32
2.6.2 BIOTERRORISMO: DINÂMICAS E IMPLICAÇÕES DAS AMEAÇAS BIOLÓGICAS CONTEMPORÂNEAS.....	34
2.6.3 ESTRATÉGIAS DE DEFESA: ABORDAGENS DE ANTITERRORISMO E CONTRATERRORISMO.....	35
2.7 PRODUTOS UTILIZADOS NA DESCONTAMINAÇÃO RADIOLÓGICA E NUCLEAR: EDTA E AZUL DA PRÚSSIA.....	36
2.7.1 O EDTA.....	36
2.7.2. O AZUL DA PRÚSSIA.....	37
2.7.3. PERSPECTIVAS FUTURAS E NOVAS TECNOLOGIAS.....	38
2.8 RADIOTRAÇADORES TECNECIO-99M E IODO-131: PROPRIEDADES, USO NA MEDICINA NUCLEAR E DESAFIOS NA DESCONTAMINAÇÃO.....	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	41
3.2 DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DOS GQDs.....	41
3.3 EXPERIMENTOS DE DESCONTAMINAÇÃO.....	42

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	44
4. RESULTADOS	45
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS GQDs	45
4.2. ENSAIO DE DESCONTAMINAÇÃO.....	50
5 DISCUSSÃO.....	52
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS GQDs	52
5.2. EFICÁCIA DOS GQDS NA REMOÇÃO DE ISÓTOPOS RADIOATIVOS	53
5.3 COMPARAÇÃO COM TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS DE DESCONTAMINAÇÃO	54
5.4 IMPLICAÇÕES PARA A SAÚDE PÚBLICA E SEGURANÇA AMBIENTAL	54
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
6.1 CONCLUSÃO	56
6.2 DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	57
7 REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de desenvolver métodos eficazes para lidar com ameaças radiológicas, como o terrorismo nuclear e o uso de dispositivos de dispersão radiológica (conhecidos como "bombas sujas"), tem destacado a importância de soluções práticas para mitigar os impactos da contaminação ambiental por materiais radioativos (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), 2014). Nesse contexto, os Pontos Quânticos de Grafeno (GQDs) emergem como uma abordagem inovadora e promissora no campo da nanotecnologia aplicada à descontaminação radiológica. Este estudo visa explorar o potencial dos GQDs na remoção de material radioativo de superfícies metálicas e plásticas, contribuindo para o avanço de técnicas eficientes de descontaminação.

O terrorismo nuclear, definido como a utilização ou ameaça de utilização de materiais nucleares e radioativos por atores não estatais, muitas vezes motivados por objetivos políticos ou ideológicos, representa uma preocupação global crescente. Essas ameaças incluem o uso de dispositivos nucleares, a sabotagem de instalações nucleares e a dispersão de materiais radioativos em áreas habitadas (IAEA, 2008; DEPUTY ASSISTANT SECRETARY OF DEFENSE FOR NUCLEAR MATTERS (DASD(NM)), 2020). Com a proliferação de conhecimento e materiais nucleares, o risco de que grupos terroristas possam fabricar ou utilizar tais dispositivos tornou-se uma realidade alarmante (COMMITTEE ON FOREIGN RELATIONS, 2020; DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY, 2020).

Dentre as ameaças mais críticas, destaca-se a bomba suja, ou dispositivo de dispersão radiológica (RDD), que combina explosivos convencionais com materiais radioativos, como césio-137, cobalto-60, estrôncio-90 e irídio-192. Embora a construção de um dispositivo nuclear funcional seja tecnicamente complexa, a criação de uma bomba suja é consideravelmente mais acessível, uma vez que requer apenas a dispersão de materiais radioativos com o uso de explosivos (RUMP et al., 2021; SUBBARAO E JAMES, 2011). A detonação de uma bomba suja pode resultar em contaminação significativa, afetando amplas áreas e provocando danos ambientais e de saúde pública de longo prazo.

A liberação de material radioativo por meio de bombas sujas contamina o ar, a água e o solo. As partículas radioativas, dispersas na forma de poeira e fumaça, podem persistir no ambiente por longos períodos, gerando riscos graves, como o aumento de casos de câncer, além de impactos econômicos e sociais, incluindo a evacuação de grandes áreas urbanas (BOUVILLE, 2020;

OHTSURU et al., 2015). Diante desse cenário, o desenvolvimento de tecnologias eficazes para a descontaminação radiológica torna-se essencial.

Nesse sentido, os GQDs destacam-se como uma solução tecnológica inovadora. Esses nanomateriais possuem propriedades físico-químicas únicas, como alta estabilidade química, ampla área superficial e capacidade de confinamento quântico, que os tornam altamente eficazes na adsorção de isótopos radioativos (YANG, ZHU E WANG, 2021). Além disso, os GQDs podem ser funcionalizados para aumentar a seletividade na adsorção de isótopos específicos, ampliando sua eficácia na descontaminação (YOON E KIM, 2020).

A literatura recente sobre o uso de GQDs na descontaminação radiológica tem evidenciado avanços significativos, bem como desafios a serem superados. Estudos como o de Sarkar e Chakrabarti (2020) exploram inovações nos métodos de síntese de nanomateriais e seu potencial para remediar ambientes contaminados. O uso de GQDs em dispositivos de descontaminação tem sido amplamente investigado, com resultados que comprovam sua funcionalidade em diversos cenários.

Neste trabalho, os GQDs foram sintetizados por meio de oxidação eletroquímica, um método eficiente e sustentável. Sua caracterização foi realizada utilizando técnicas avançadas, como Espalhamento de Luz Dinâmica (DLS), Espectroscopia Raman, Espectroscopia de Absorção e Fluorescência, Microscopia de Força Atômica (AFM) e Difração de Raios-X em Pó (PXRD), confirmando suas propriedades estruturais e óticas, essenciais para o desempenho na adsorção de isótopos radioativos. Os experimentos de descontaminação focaram na remoção de isótopos como tecnécio-99m e iodo-131 de superfícies de Policloreto de Vinila rígido (PVC), monel, zinco e alumínio. A análise estatística dos dados demonstrou a eficácia dos GQDs na remoção desses isótopos, com destaque para a alta taxa de remoção de iodo-131 em superfícies plásticas.

Os resultados obtidos até o momento indicam que os GQDs têm potencial para desempenhar um papel relevante na mitigação das consequências de contaminações radioativas, apresentando-se como uma solução prática e eficiente para a descontaminação de superfícies. A possibilidade de funcionalização dos GQDs, visando aumentar sua afinidade por isótopos específicos, amplia sua aplicabilidade em cenários de respostas emergenciais e situações de crise radiológica. Além disso, os achados sugerem que os GQDs podem ser explorados não apenas na descontaminação de ambientes expostos a materiais radioativos, mas também em outras áreas, como no tratamento de resíduos nucleares e na purificação de água contaminada.

Esses avanços abrem caminho para investigações adicionais, que poderão focar no aprimoramento dos métodos de síntese e funcionalização dos GQDs, bem como na otimização de sua

eficiência em diferentes contextos de aplicação. A integração desses nanomateriais em protocolos de resposta a emergências radiológicas representa uma frente promissora, com potencial para melhorar significativamente a capacidade de descontaminação em cenários críticos. A continuidade deste estudo permitirá explorar ainda mais as implicações práticas e teóricas dessa tecnologia, contribuindo para o desenvolvimento de soluções inovadoras no campo da segurança nuclear e da proteção ambiental.

1.1 JUSTIFICATIVA

A crescente ameaça de contaminação radioativa, resultante de acidentes nucleares, ataques terroristas com dispositivos de dispersão radiológica ou negligências industriais, representa um risco significativo para a saúde pública e a segurança ambiental. Nesse contexto, a pesquisa sobre o uso de GQDs para a remoção de material radioativo surge como uma abordagem inovadora e necessária.

A radiação liberada por alguns isótopos é extremamente prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana. Os impactos incluem o aumento de doenças graves, como câncer, e a contaminação duradoura de áreas urbanas e rurais. Assim, desenvolver soluções tecnológicas que possam minimizar esses riscos é crucial.

Os GQDs apresentam uma série de características físico-químicas que os tornam promissores para aplicações em descontaminação. Sua alta área superficial, estabilidade química e a capacidade de serem funcionalizados para adsorção seletiva de isótopos radioativos representam um avanço significativo no campo de materiais de descontaminação. A eficácia comprovada dos GQDs não só contribuirá para a proteção da saúde humana e do meio ambiente, mas também poderá reduzir significativamente os impactos econômicos e sociais de longo prazo, permitindo a reocupação rápida de áreas afetadas.

Além disso, esta pesquisa avançará o conhecimento científico sobre a aplicação de nanomateriais em emergências radiológicas, promovendo colaborações interdisciplinares que envolvem químicos, físicos, engenheiros e especialistas em saúde pública. Os resultados deste estudo podem fornecer a base para o desenvolvimento de novas tecnologias e protocolos de segurança que beneficiem diretamente a sociedade e a preservação ambiental.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Com base na literatura investigada e nas colocações precedentes, foi proposto o seguinte problema de pesquisa:

- Como os Pontos Quânticos de Grafeno podem ser eficazmente utilizados para a remoção de material radioativo de superfícies metálicas e plásticas, contribuindo para a mitigação dos impactos radiológicos e ambientais em cenários de contaminação radioativa?

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a eficácia dos Pontos Quânticos de Grafeno na remoção de materiais nucleares de superfícies metálicas e plásticas, visando a mitigação dos impactos radiológicos e ambientais.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as propriedades físico-químicas dos Pontos Quânticos de Grafeno por intermédio de técnicas espectroscópicas como Espectroscopia no Raman, Microscopia de Força Atômica e Difração de Raios-X em Pó. Outros ensaios, como mensuração da estabilidade química, área superficial e efeitos de confinamento quântico, foram elencados para compreender seu potencial de adsorção de isótopos radioativos.
- Avaliar a eficiência dos Pontos Quânticos de Grafeno na adsorção dos isótopos iodo-131 e tecnécio-99m, presentes em superfícies metálicas e plásticas contaminadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 NANOTECNOLOGIA E NANOMATERIAIS: UMA EXPLORAÇÃO AVANÇADA EM ESCALA ATÔMICA E MOLECULAR

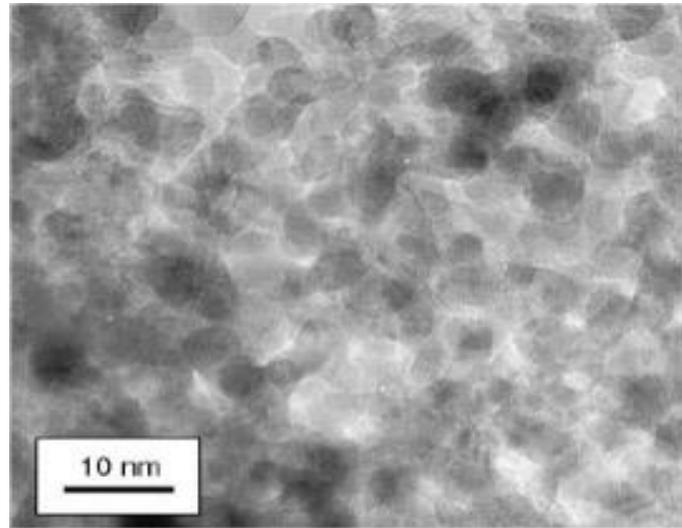
A nanotecnologia representa uma área revolucionária que manipula a matéria em uma escala tão diminuta quanto átomos e moléculas, configurando um alicerce tecnológico crucial para o desenvolvimento de inovações materiais e tecnológicas. A origem do termo "nano" vem do idioma grego, significando "pequeno", e define-se nanômetro como sendo uma medida de 10^{-9} metros (LOURO, 2013). Os nanomateriais, em particular, são caracterizados por terem ao menos uma de suas dimensões – seja comprimento, largura ou altura – dentro do espectro de 1 a 100 nanômetros (SCHULZ, 2013).

Esses materiais sofrem influência significativa de suas partículas diminutas, o que lhes confere propriedades físicas, químicas e biológicas particulares (ALENCAR, 2015). Por exemplo, a manipulação de tais materiais permite o aumento de capacidade de armazenamento e processamento em dispositivos eletrônicos, desenvolvimento de novos fármacos, melhorias em eficiência energética e contribuições significativas para a proteção ambiental (CADIOLI; SALLA, 2006). Além disso, as aplicabilidades da nanotecnologia estendem-se por setores variados como biotecnologia, medicina, cosméticos e até aeronáutica (LUGANI et al., 2018). A Figura 1 exibe a análise micrográfica do pó de Zircônia (ZrO).

A nanotecnologia utiliza predominantemente a abordagem metodológica "*bottom-up*", em contraste com as abordagens "*top-down*" mais comuns em tecnologias convencionais. Enquanto a técnica "*bottom-up*" envolve a assemblagem de dispositivos a partir da manipulação atômica e molecular, gerando substratos customizados para funções específicas, a técnica "*top-down*" refere-se à redução de matérias em escalas volumosas para o nano espectro, comumente observada em processos como a nano eletrônica (DURÁN; MATTOSO; MORAIS, 2006; BASSET, 2006).

Quanto à classificação, os nanomateriais são agrupados de acordo com suas dimensões em: zero dimensional como as nanopartículas, unidimensional representado por nanorods ou nanotubos, e bidimensional exemplificado por filmes finos, incluindo filmes de grafeno. Na visualização por meio de micrografias eletrônicas, na Figura 1 é possível observar a estrutura compacta do pó de zircônia, na Figura 2 a complexidade estrutural dos nanotubos de carbono de paredes simples e múltiplas e, por fim, na Figura 3 a delicada composição de filmes finos de grafeno (VOLLATH, 2008).

Figura 1: Análise Micrográfica Eletrônica do Pó de Zircônia (ZrO).

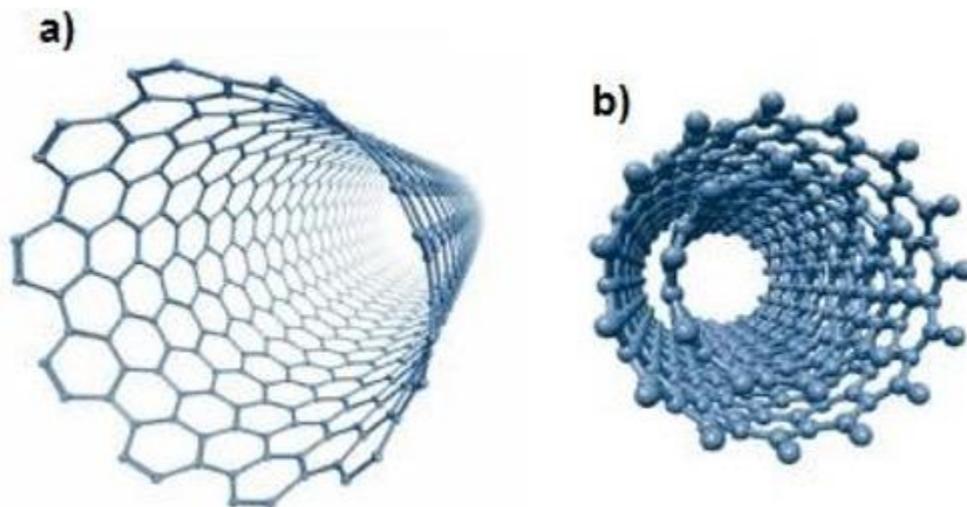


Legenda: Micrografia eletrônica de transmissão (TEM) do pó de zircônia (ZrO) mostrando a morfologia granular com distribuição relativamente uniforme dos tamanhos de grão, com dimensões na faixa nanométrica (escala de 10 nm), o que evidencia as características estruturais dos nanomateriais. A homogeneidade dos grãos e o controle preciso de tamanho são fatores críticos que influenciam as propriedades mecânicas e térmicas desse material.

Fonte: VOLLATH, 2008.

A seguir, na Figura 2 apresenta-se duas representações ilustrativas para a estrutura de nanotubos de Grafeno (ZARBIN; OLIVEIRA, 2013).

Figura 2: Representações Esquemáticas de Nanotubos de Grafeno.

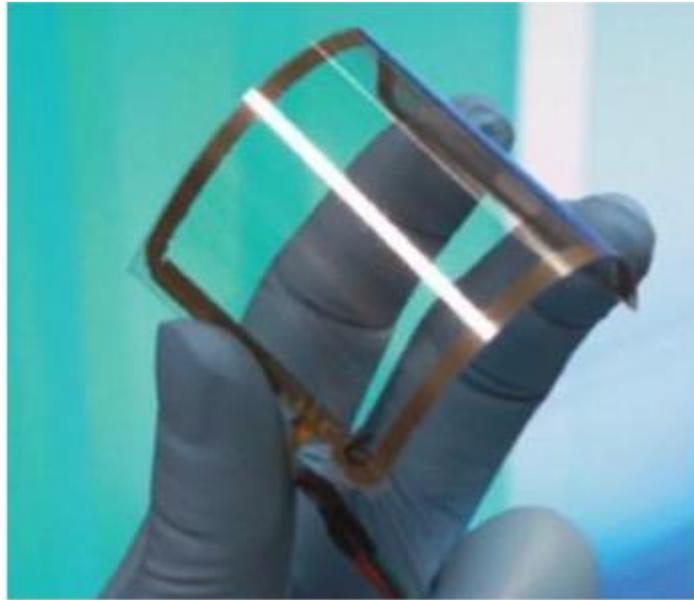


Legenda: a) Nanotubo de carbono de parede simples demonstrando a estrutura cilíndrica formada por uma única camada de grafeno enrolada; b) Nanotubo de carbono de parede múltipla composto por várias camadas concêntricas de grafeno, formando uma estrutura tubular mais complexa. Essas estruturas possuem propriedades eletrônicas, mecânicas e térmicas únicas, amplamente aplicadas em nanociência e tecnologia.

Fonte: ZARBIN; OLIVEIRA, 2013.

Prosseguindo, a imagem de um filme fino de grafeno é apresentada na Figura 3 com a finalidade de expor suas propriedades físico-químicas (KUILA *et al.*, 2012).

Figura 3: Imagem de um filme fino de grafeno.



Legenda: Filme fino de grafeno destacando suas propriedades de transparência e flexibilidade. O material possui grande potencial de aplicação em dispositivos eletrônicos flexíveis, sensores transparentes e telas dobráveis, combinando alta condutividade elétrica e ótica com leveza e maleabilidade.

Fonte: Kuila *et al.*, 2012

Portanto, o impacto potencial da nanotecnologia na evolução futura de diversas indústrias é imenso, prometendo transformações profundas no panorama tecnológico e material global.

2.1.1 AS NANOPARTÍCULAS

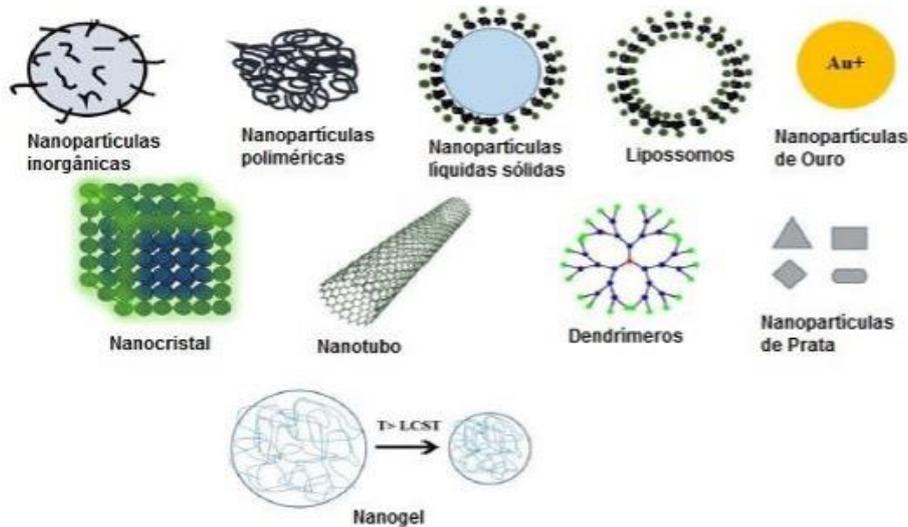
As nanopartículas, entidades cuja escala não ultrapassa os 100 nanômetros em pelo menos uma de suas dimensões (ALTAMMAR, 2023), encontram aplicação em uma variedade de disciplinas, incluindo química, biologia, ciência dos materiais e biomedicina (CHRISTIAN, 2008).

Essas partículas diminutas são extremamente versáteis, apresentando-se sob diversas formas, como pontos quânticos (QDs), nanopartículas de prata (AgNPs), nanopartículas de ouro (AuNPs), pontos de carbono (CDots), óxido de grafeno (GO), materiais à base de silício, lipossomos, dendrímeros e polímeros diversos, de acordo com estudos recentes (GURUNATHAN *et al.*, 2020).

Além disso, as nanopartículas podem se apresentar de diversas formas (e.g. nanotubos, esferas, bastões, estruturas pseudomicelares etc.) e composições, de maneira que elas podem ser customizadas para uma pluralidade de aplicações, o que aumenta seu valor e relevância em diferentes campos de

pesquisa e desenvolvimento. Na Figura 4 algumas variedades de nanopartículas empregadas como agentes antimicrobianos são ilustradas.

Figura 4: Variedade de Nanopartículas Empregadas como Agentes Antimicrobianos.



Legenda: Imagem mostrando diferentes tipos de nanopartículas, incluindo inorgânicas, poliméricas, líquidas sólidas, lipossomos, nanopartículas de ouro, nanocristais, nanotubos, dendrímeros, nanopartículas de prata e nanogel. Cada tipo apresenta propriedades específicas que podem ser exploradas para combate a microrganismos, com aplicações em diversas áreas da biomedicina e ciência dos materiais.

Fonte: Gurunathan et al., 2020.

As nanopartículas, de acordo com Lugani e colaboradores (2018) em função de suas propriedades físico-químicas – alta relação superfície/volume, atividade fotocatalítica, solubilidade em água, e outras características como tamanho cristalino e forças de parede vaga – findam por exibir uma larga gama de aplicações. Alguns exemplos de tais aplicações são: remoção de poluentes da água ou contaminantes orgânicos do solo; administração de medicamentos com elevada seletividade regional; melhoramento do desempenho e durabilidade de armazenadores de energia elétrica como baterias e supercapacitores, dentre outras (ALTAMMAR, K. A., 2023).

Adicionalmente, as nanopartículas, devido ao seu tamanho nanométrico, mostram-se adequadas para aprimorar a eficiência da interface deslizante e permitem a síntese de partículas compostas, que integram múltiplas funcionalidades como redução de atrito e ações anti-desgaste e anticorrosão (MANSOT et al., 2009). Contudo, é importante notar que no ambiente, além das nanopartículas naturais e aquelas oriundas da combustão de combustíveis fósseis, as nanopartículas sintéticas derivadas de materiais manufaturados podem atingir humanos e animais aquáticos, seja por inalação, ingestão ou de forma indireta através da cadeia alimentar (MARCONE et al., 2011).

Em vista dessas características e impactos, o uso de nanopartículas tem experimentado uma evolução notável, particularmente em sua função como agentes antivirais, onde as nanopartículas poliméricas têm mostrado resultados promissores. Assim, evidencia-se a crescente relevância e variedade de aplicações de nanopartículas selecionadas em ciência e tecnologia (CHARELLI et al., 2022).

2.1.2 O GRAFENO

O grafeno é um alótropo do átomo de carbono, com uma estrutura significativamente distinta dos outros alótropos. No caso, a estrutura do grafeno é composta por uma monocamada de átomos de carbono em uma rede hexagonal. O ineditismo do grafeno é acompanhado sobretudo pela larga gama de propriedades físico-químicas de elevado interesse. Por exemplo, o grafeno possui uma elevada superfície específica (da ordem de $2600\text{m}^2/\text{g}$). O material também apresenta uma condutividade térmica significativamente elevada ($\sim 4500\text{ W/mK}$) a qual pode ser modulada com o número de monocamadas ou o tamanho da monocamada. Outra característica extremamente impactante é a espessura da monocamada; com um valor mensurado de $0,334\text{ nm}$, o grafeno atualmente ocupa o posto de material mais fino do mundo (URADE; LAHIRI, SURESH, 2022). Tais propriedades, além de várias outras não comentadas aqui fazem o grafeno ser um material com enorme potencial para estudo na ciência de materiais e grandes possibilidades de aplicações em diversas áreas de elevado interesse, como a nanoeletrônica (RADSAR; KHALESİ; GHODS, 2021) revestimentos para prevenção da corrosão metálica (ZHANG et al, 2021) e sensores (LIU; BAO; WANG, 2022).

Além disso, o grafeno tem grande potencial catalítico, facilitando reações químicas complexas, como a conversão de sulfeto de hidrogênio (H_2S) em hidrogênio (H_2). Suas propriedades eletrônicas e térmicas otimizam a eficiência catalítica em processos importantes para a produção de energia (CHAN et al., 2023). O uso de grafeno em revestimentos também se destaca, especialmente para melhorar a resistência à corrosão e as propriedades térmicas de materiais, aumentando sua durabilidade em condições extremas (CHEN et al., 2021).

Abordagens utilizando precursores biológicos ou resíduos agrícolas como fontes de carbono vem sendo desenvolvidas para tornar a produção mais ecológica e econômica. Esses métodos minimizam o impacto ambiental e possibilitam a produção em larga escala de grafeno de alta qualidade (MOHAMMADI e ASHKARRAN, 2024). Além disso, a caracterização detalhada das propriedades do grafeno é essencial para compreender seu comportamento e otimizar seu desempenho em várias aplicações. Técnicas avançadas de microscopia eletrônica e espectroscopia

são frequentemente usadas para investigar a estrutura atômica e as propriedades eletrônicas do grafeno (BANSZERUS, 2023).

Na área da nanotecnologia, a funcionalização do grafeno tem ganhado destaque para aplicações em sensores e dispositivos eletrônicos. Modificar a superfície do grafeno com grupos químicos específicos melhora suas propriedades, tornando-o mais eficiente na detecção de íons, como iodeto, em soluções aquosas (MANSHA et al., 2024). Além disso, avanços recentes têm explorado métodos mais ecológicos e sustentáveis, como a síntese de nanodots de carbono e grafeno usando fontes renováveis e processos de baixo impacto ambiental, destacando-se tanto pela viabilidade econômica quanto pela redução do impacto ambiental (BANGER et al., 2023).

A transferência de grafeno sintetizado por deposição química em fase de vapor (CVD) para diferentes substratos é um passo crucial para sua integração em dispositivos práticos, preservando a qualidade do material e garantindo sua funcionalidade. Esse é um desafio essencial para o desenvolvimento de novas aplicações tecnológicas (BANSZERUS, 2023). Técnicas avançadas de síntese e manipulação, com a caracterização detalhada das propriedades estruturais e eletrônicas, são fundamentais para otimizar o desempenho do grafeno em aplicações específicas (MOLLE, 2022).

Além das aplicações eletrônicas, o grafeno impacta a indústria de materiais compostos. Suas propriedades mecânicas excepcionais têm sido aproveitadas para reforçar materiais compósitos, resultando em produtos mais leves, resistentes e duráveis. A incorporação de grafeno em matrizes poliméricas pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas e térmicas desses materiais, com aplicações promissoras nas indústrias aeroespacial, automobilística e de construção civil (GALIOTIS, 2020). A contínua inovação na funcionalização do grafeno amplia ainda mais suas possibilidades, como em sensores biológicos e dispositivos de armazenamento de energia, onde a adsorção seletiva de moléculas específicas é essencial para o desenvolvimento de tecnologias de detecção e remediação ambiental (MANSHA et al., 2024; BAIRY; MAITY; BASKEY, 2024).

A integração do grafeno com outros materiais bidimensionais, como os dicalcogenetos de metais de transição (TMDs), tem recebido crescente atenção. A criação de heteroestruturas com propriedades otimizadas pode resultar em novos fenômenos físicos, como supercondutividade e o efeito *Hall* quântico, relevantes tanto para pesquisa fundamental quanto para o desenvolvimento de novas tecnologias quânticas (WANG et al., 2024).

Em resumo, o grafeno tem um impacto profundo em diversos setores da ciência e tecnologia, desde aplicações eletrônicas até o desenvolvimento de novos materiais. Sua versatilidade e propriedades excepcionais fazem dele um dos materiais mais promissores para a nanotecnologia

moderna. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de novas técnicas de síntese, funcionalização e caracterização são essenciais para explorar plenamente o potencial do grafeno, abrindo caminho para inovações que podem transformar indústrias inteiras e melhorar a qualidade de vida (WANG et al., 2024; MOHAMMADI e ASHKARRAN, 2024).

Os métodos de produção de grafeno são geralmente divididos em técnicas *top-down* e *bottom-up*. A abordagem *top-down* envolve a desagregação de materiais grafiticos maiores para obter grafeno, como a esfoliação mecânica e a oxidação-redução. A esfoliação mecânica foi a primeira técnica usada para isolar grafeno, proporcionando material de alta qualidade, embora com limitações de escalabilidade. Já a técnica de oxidação-redução envolve a oxidação do grafite para gerar óxido de grafeno, que é posteriormente reduzido (MOHAMMADI e ASHKARRAN, 2024). Por outro lado, as técnicas *bottom-up* constroem o grafeno a partir de átomos ou moléculas menores, permitindo maior controle sobre o número de camadas e a estrutura do material. Uma das técnicas mais empregadas neste caso é a já comentada CVD, mas outras técnicas também são bastante interessantes, como por exemplo a Síntese Molecular (CAI et al., 2010), Síntese em Carbetos de Silício (LIU et al., 2020) e a CVD melhorada em Plasma (SAHOO et al., 2022).

A síntese biogênica de óxido de grafeno reduzido é uma abordagem sustentável e promissora. Essa técnica utiliza precursores naturais, como plantas e resíduos agrícolas, para produzir óxido de grafeno, que é posteriormente reduzido para grafeno. Embora ofereça vantagens significativas em termos de custo e impacto ambiental, pode introduzir defeitos que afetam as propriedades do material (BAIRY, MAITY e BASKEY, 2024).

Estudos recentes sobre o grafeno e sua interação com sistemas biológicos são de grande importância para seus potenciais aplicações biomédicas e ambientais. Por exemplo, o uso do zebrafish (*Danio Rerio*) como organismo modelo tem sido fundamental para avaliar os impactos toxicológicos e a biocompatibilidade de nanomateriais, como o óxido de grafeno, em sistemas biológicos (BRUN et al., 2014). A estabilidade coloidal do grafeno em soluções aquosas também é um fator crucial para seu desempenho em nanocompósitos e sensores. Pesquisas indicam que a estabilidade pode ser significativamente afetada pela presença de íons, o que deve ser considerado no desenvolvimento de novas aplicações (CAO e ELIMELECH, 2021).

A possibilidade de modelagem multiescala do grafeno é essencial para otimizar seu uso em sistemas de purificação de água, maximizando sua capacidade de capturar e remover contaminantes (CARDELLINI et al., 2019). Fatores ambientais, como a exposição à luz solar, podem afetar

significativamente a estabilidade e dispersão do grafeno em ambientes aquáticos, impactando sua eficácia em aplicações de remediação de poluentes (CHOWDHURY et al., 2015).

Concluindo, o grafeno se estabelece como um material de incrível impacto, com um escopo de aplicações muito promissor em diversas áreas da tecnologia. O entendimento melhor do comportamento deste material, englobando propriedades como a estabilidade coloidal e as interações com íons metálicos e fatores ambientais é essencial para melhorar o seu desempenho e funcionalidade. Estudos futuros devem se direcionar para o desenvolvimento de estratégias mais sofisticadas de funcionalização e a integração do grafeno em sistemas mais complexos, a fim de potencializar melhor o seu desenvolvimento em tecnologias inovativas e sustentáveis (BRUN et al., 2014; CAO e ELIMELEC, 2021; CHAN et al., 2023; CHEN et al., 2021; CARDELLINI et al., 2019; CHOWDHURY et al., 2015).

2.2 OS PONTOS QUÂNTICOS DE GRAFENO

Os GQDs têm despertado um interesse crescente na comunidade científica, devido às suas aplicações promissoras em áreas como bioimagem, biossensores, fotocatalise e dispositivos optoeletrônicos. Diversas técnicas foram desenvolvidas e aprimoradas ao longo dos anos para otimizar a produção de GQDs com propriedades específicas e desejadas. Entre as abordagens mais comuns para a síntese de nanodots de carbono, incluindo os GQDs, destacam-se a esfoliação química, esfoliação eletroquímica, síntese hidrotérmica e síntese solvotérmica. Cada método permite a produção de GQDs com diferentes tamanhos, formas e funcionalidades, adaptando-os a uma ampla gama de aplicações tecnológicas e biomédicas (BANGER et al., 2023).

O crescimento do mercado de pontos quânticos, especialmente em dispositivos optoeletrônicos e biossensores, evidencia a importância econômica e tecnológica desses materiais. A demanda crescente impulsiona a pesquisa e o desenvolvimento de métodos de síntese mais eficientes e sustentáveis para GQDs, refletindo o aumento significativo no mercado global (MARKETSANDMARKETS, 2023). Inovações e colaborações entre universidades, institutos de pesquisa e indústrias têm acelerado a descoberta de novas técnicas de produção, melhorando a qualidade e eficiência dos GQDs em aplicações de dispositivos optoeletrônicos, sensores e outras tecnologias emergentes (GRAPHENE FLAGSHIP, 2023).

Um exemplo de método inovador para a produção de GQDs é o uso da descarga elétrica de eletroerosão em afundamento, que permite o controle preciso das propriedades dos nanomateriais, essencial para aplicações industriais que exigem alta performance (NANOMATERIALS, 2022).

Métodos como oxidação química, redução térmica e síntese a partir de precursores de carbono também são amplamente utilizados na produção de GQDs. Esses métodos permitem ajustes nas propriedades estruturais e eletrônicas dos GQDs, tornando-os ideais para aplicações em bioimagem e biossensores, onde alta sensibilidade e precisão são necessárias (GAO; SINGH, 2021).

A fotoluminescência dos GQDs é uma propriedade crucial para suas aplicações biomédicas. Técnicas de síntese que preservam ou melhoram a eficiência luminosa desses nanomateriais são essenciais para o desenvolvimento de tecnologias avançadas de diagnóstico, como bioimagem e biossensores (LI, ZHAO e TAN, 2020). Além disso, a alta fotoluminescência dos GQDs permite sua aplicação em dispositivos optoeletrônicos, incluindo tecnologias de iluminação e displays (ZHU et al., 2019). Estratégias como a dopagem e funcionalização dos GQDs são essenciais para ajustar suas propriedades ópticas, permitindo a emissão de luz em uma ampla faixa, do ultravioleta profundo ao infravermelho próximo, ampliando suas aplicações em fotônica e optoeletrônica (TANG, JI e LI, 2018).

A pesquisa em materiais bidimensionais e nanotecnologia também destaca a importância de métodos avançados de síntese para a produção de GQDs de alta qualidade. A manipulação precisa das propriedades desses nanomateriais é essencial para o desenvolvimento de dispositivos de próxima geração, como sensores altamente sensíveis e dispositivos optoeletrônicos (BOGGILD, 2023). No campo dos sensores, a incorporação eficiente de GQDs em plataformas de detecção tem sido um foco importante, especialmente em tecnologias de sensores rápidos e precisos, como os aptassensores para detecção de aflatoxina B1 (BIOSENSORS, 2024).

Os GQDs também emergem como uma solução promissora para a descontaminação radiológica, devido às suas propriedades excepcionais, como alta área superficial, capacidade de adsorção eficiente e facilidade de funcionalização. Diversas pesquisas exploraram o uso de GQDs na remoção de contaminantes radioativos de ambientes aquosos, destacando sua eficácia e potencial em aplicações ambientais e industriais. Os GQDs demonstram uma capacidade notável de adsorver íons radioativos, aproveitando sua alta área superficial para interagir com contaminantes e promover sua remoção de soluções aquosas (CHEN et al., 2022).

2.3 AUMENTO DA AFINIDADE POR ISÓTOPOS ESPECÍFICOS

O aumento da afinidade por isótopos específicos é um tópico de grande relevância em áreas como geoquímica, biogeoquímica e ciências ambientais, uma vez que compreender como certos

materiais interagem com isótopos específicos pode oferecer *insights* valiosos sobre processos naturais e artificiais. Isso auxilia tanto no desenvolvimento de novas tecnologias quanto na melhoria das já existentes. Estudos que utilizam medições isotópicas e modelagem, como o particionamento da evaporação, mostram como isótopos específicos podem ser empregados para diferenciar processos naturais, aprimorando a compreensão do ciclo da água e suas interações com o ambiente (SUTANTO et al., 2012).

Pesquisas que investigam o intemperismo de silicatos indicam que a presença de vegetação pode influenciar significativamente esses processos, que são essenciais para o fornecimento de nutrientes ao solo. A afinidade por isótopos específicos é, assim, um indicador relevante em estudos de ecossistemas terrestres (OESER; VON BLANCKENBURG, 2020). No campo das reconstruções paleoclimáticas, análises de isótopos estáveis em anéis de árvores também revelam como diferentes espécies apresentam afinidade por certos isótopos ao longo do tempo, permitindo uma melhor compreensão das mudanças ambientais registradas em suas estruturas (AROSIO et al., 2020).

Estudos sobre isótopos de carbono evidenciam que o comportamento deste elemento pode variar conforme sua distribuição isotópica, refletindo diferentes processos bioquímicos. Isso destaca a importância da afinidade isotópica em contextos ambientais e biogeoquímicos (HE et al., 2020). Além disso, pesquisas sobre a nutrição mineral das plantas apontam que a afinidade por isótopos pode afetar a eficiência de absorção de nutrientes, influenciando diretamente o crescimento vegetal e a saúde dos solos (MARSCHNER, 2011).

Em bacias hidrográficas de regiões dominadas por *permafrost*, a afinidade por isótopos de magnésio varia de acordo com as condições ambientais, fornecendo dados valiosos sobre os ciclos biogeoquímicos em ambientes frios (MAVROMATIS et al., 2014). Em florestas temperadas, a análise de isótopos de carbono e nitrogênio tem sido crucial para rastrear a origem da matéria orgânica erodida, permitindo uma melhor gestão de solos e conservação dos ecossistemas (MCCORKLE et al., 2016). Técnicas como a espectrometria de massa com ablação a laser possibilitam uma análise precisa das composições isotópicas, sendo aplicáveis em geologia e ciência dos materiais (DAI et al., 2016).

A medição precisa da afinidade por isótopos específicos, especialmente em estudos de referenciais de silicatos, é essencial para o desenvolvimento de materiais avançados (OESER et al., 2014). Pesquisas sobre o intemperismo de rochas em ecossistemas florestais indicam que a afinidade por isótopos de magnésio pode fornecer informações detalhadas sobre processos de ciclagem de nutrientes e intemperismo (OPFERGELT et al., 2020).

Esses estudos demonstram que a compreensão da afinidade por isótopos específicos tem ampla aplicabilidade, fornecendo uma base importante para o desenvolvimento de novas técnicas em diversas áreas, como a gestão ambiental e a ciência dos materiais. O uso de metodologias avançadas, como a espectrometria de massa com ablação a laser, tem revelado novos detalhes sobre a distribuição isotópica em amostras complexas, ampliando o conhecimento sobre a dinâmica isotópica em processos naturais e tecnológicos (YU et al., 2023).

2.4 DESCONTAMINAÇÃO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS E PLÁSTICAS

A descontaminação de superfícies metálicas e plásticas é de grande relevância devido à necessidade de remover poluentes de forma eficaz e sustentável. Diversas técnicas têm sido desenvolvidas, destacando-se os processos de oxidação avançada, métodos fotocatalíticos, uso de nanomateriais e estratégias sustentáveis. Os processos de oxidação avançada, como fotocatalise e ozonização, são eficazes na decomposição de poluentes complexos em compostos menos nocivos, aproveitando a alta reatividade dos radicais livres gerados durante a oxidação (SARKAR; CHAKRABARTI, 2020).

Os métodos fotocatalíticos utilizam fotocatalisadores como o dióxido de titânio (TiO_2) sob luz ultravioleta (UV), promovendo a degradação de contaminantes orgânicos e inorgânicos através da ativação do catalisador pela energia luminosa (YOON; KIM, 2020). Estratégias sustentáveis, como o uso de adsorventes de baixo custo e biodegradáveis, oferecem alternativas viáveis e ecologicamente corretas para a limpeza de superfícies contaminadas, minimizando o impacto ambiental (SANDHU; KUMAR, 2021). Técnicas de esterilização, como autoclaves e métodos químicos, podem ser adaptadas para ambientes industriais, garantindo a remoção de contaminantes biológicos e químicos (JAIN; JAIN; JAIN, 2020).

A importância de métodos eficientes, econômicos e sustentáveis é crucial para minimizar o impacto ambiental, em consonância com os objetivos globais de sustentabilidade (SADHUKHAN, 2020). O uso de sistemas CRISPR-Cas, tradicionalmente aplicados à edição genética, pode ser adaptado para a remoção seletiva de contaminantes através da modificação de microrganismos (WEI; TANG; WANG, 2020). Práticas de manejo de resíduos, como redução, reutilização e reciclagem, reforçam a sustentabilidade na descontaminação de superfícies (AGRONOMY, 2019).

Adsorventes de baixo custo para a remoção de metais pesados mostram grande potencial na descontaminação, oferecendo uma abordagem econômica e eficaz (HOSSAIN; ISLAM, 2021). O

biochar, material carbonáceo obtido por pirólise de biomassa, destaca-se pela alta capacidade de adsorção, sendo uma solução sustentável para a remoção de diversos contaminantes (ZHANG; LI; LI, 2021). Métodos fotocatalíticos, como o uso de dióxido de titânio sob luz UV, permitem uma descontaminação contínua e sustentável, especialmente em superfícies expostas à luz solar ou iluminação artificial (YOON; KIM, 2020).

Processos de oxidação avançada, como ozonização e fotocatalise, geram radicais livres altamente reativos, eficazes na decomposição de compostos tóxicos (SARKAR; CHAKRABARTI, 2020). O uso de adsorventes biodegradáveis, como biochar e resinas naturais, minimiza o impacto ambiental durante a descontaminação (SANDHU; KUMAR, 2021). A esterilização controlada com autoclaves e métodos químicos garante a remoção eficaz de contaminantes em superfícies industriais (JAIN; JAIN; JAIN, 2020).

O uso de sistemas CRISPR-Cas para modificar microrganismos oferece uma nova fronteira na remoção seletiva de contaminantes (WEI; TANG; WANG, 2020). A aplicação de práticas sustentáveis, como redução, reutilização e reciclagem, promove a sustentabilidade na descontaminação de superfícies (AGRONOMY, 2019). Adsorventes de baixo custo, como biochar, oferecem soluções acessíveis e eficazes na captura de contaminantes (HOSSAIN; ISLAM, 2021).

A inovação tecnológica na descontaminação de superfícies metálicas e plásticas é essencial para práticas industriais mais sustentáveis, promovendo a proteção ambiental e da saúde pública. A colaboração interdisciplinar é fundamental para enfrentar os desafios da descontaminação ambiental.

2.5 PANORAMA GERAL SOBRE O TERRORISMO: UMA ANÁLISE CONTEMPORÂNEA

A definição de terrorismo varia amplamente, não possuindo uma aceitação universal dentro da comunidade internacional. Essas definições comumente compartilham a característica do uso de violência com intenções políticas, diferenciando-se de atos criminosos comuns que são motivados por lucro ou por desvios comportamentais (RAMOS JR., 2003). A violência perpetrada em ações terroristas tem um forte componente psicológico e busca instigar o medo extremo, ou terror, nas vítimas.

No dia a dia, a etiqueta de "terrorismo" é frequentemente aplicada a atos violentos, sejam eles físicos ou psicológicos, e qualificados como radicais, fanáticos ou extremos. A atribuição dessa classificação pode variar conforme a perspectiva de quem a define ou sofre suas consequências. Terrorismo pode ser entendido, portanto, como a aplicação deliberada – ou a ameaça de – violência

por entidades políticas organizadas contra civis, com o intuito de atingir objetivos político-ideológicos (WOLOSZYN, 2006).

Os atos terroristas podem ser reconhecidos por características específicas, como o impacto indiscriminado, imprevisibilidade, efeitos graves e a falta de moralidade. Importante no entendimento do terrorismo é a identificação de suas vítimas, que podem ser agrupadas em três tipos: vítimas táticas, que são diretamente afetadas pelo atentado; vítimas estratégicas, que sobrevivem e consideram-se potenciais alvos futuros; e vítimas políticas, representadas pelo Estado, que apesar de responsável pela segurança, parece incapaz de prevenir esses atos (SAINT-PIERRE, 2005).

Dessa forma, o objetivo primordial do terrorismo não é necessariamente causar morte, mas perpetuar o medo e a sensação de desamparo entre os sobreviventes. As estratégias de combate ao terrorismo dividem-se em duas vertentes principais: antiterrorismo, que inclui táticas defensivas para reduzir vulnerabilidades; e contraterrorismo, que emprega medidas ofensivas contra grupos terroristas identificados, com o objetivo de prevenir, dissuadir ou responder diretamente aos ataques (PINHEIRO, 2004).

Essa dualidade de abordagens reflete a complexidade do enfrentamento ao terrorismo, exigindo uma combinação de estratégias defensivas e ofensivas para efetivamente reduzir o risco e mitigar os impactos desses violentos ataques.

No entanto, é fundamental que a resposta de um governo às ameaças contra suas instituições e população esteja em conformidade com os princípios e valores que esse governo se compromete a defender. Estes valores não devem ser comprometidos em prol de uma luta intransigente contra o terrorismo (PONTES, 1999).

2.6 FUNDAMENTOS HISTÓRICOS E ARQUEOLÓGICOS DO TERRORISMO

O terrorismo, longe de ser um fenômeno moderno, tem uma história milenar, variando em ideologia, escopo e intensidade ao longo dos séculos. Há cerca de 2.500 anos, Sun Tzu já destacava a essência do terrorismo em “A Arte da Guerra”, propondo: “Mate um; amedronte dez mil”. Registros indicam que o primeiro grupo terrorista conhecido surgiu no ano seis da era cristã, composto por radicais judeus denominados Sicarii, que lutavam contra a ocupação romana da Palestina, assassinando tanto romanos quanto colaboradores judeus. Séculos mais tarde, os Nizarins emergiram como um influente grupo terrorista no Oriente Médio (SOARES, 2001).

O termo "terrorismo" foi cunhado durante a Revolução Francesa, especificamente no período chamado “Reino do Terror” (1793-1794), quando Robespierre e os jacobinos utilizaram a violência

de forma sistematizada, inaugurando o conceito de "terrorismo de Estado". No século XIX, a invenção de armas de fogo e explosivos modernos aumentou a capacidade destrutiva dos ataques terroristas, que eram frequentemente dirigidos contra governos considerados opressores. A União Soviética, no século XX, foi apontada como uma grande fomentadora de organizações extremistas globalmente (PONTES, 1999).

Nas décadas de 1960 e 1970, formas contemporâneas de terrorismo, incluindo nacionalista, de extrema-esquerda, de Estado e de extrema-direita, alcançaram seu apogeu. Já nos anos 1980 e 1990, emergiram o terrorismo "doméstico", tipicamente norte-americano, e o terrorismo internacional, predominantemente de grupos islâmicos radicais, visando combater a expansão dos valores ocidentais (NAPOLEONI, 2004).

De acordo com Napoleoni (2004) com o fim da Guerra Fria, conflitos étnico-religiosos ressurgiram, levando a atos terroristas, insurgências e instabilidades que frequentemente ocupam as manchetes globais. Essas tensões são muitas vezes exacerbadas pela exploração do descontentamento decorrente das disparidades sociais, atribuídas ao "Imperialismo Ocidental". O início do século XXI foi marcado por grandes atentados terroristas, como os ataques ao World Trade Center em Nova York, em 2001, e os atentados a trens em Madri, em 2003, que chocaram o mundo e realçaram a ameaça do terrorismo como um perigo global.

A logística e o financiamento desses atentados envolvem uma complexa rede de "lavagem de dinheiro" que sustenta as operações terroristas. A economia do terror, uma faceta desenvolvida no pós-Segunda Guerra Mundial, tornou-se parte de um vasto sistema econômico que, na década de 1990, movimentava uma fração significativa dos recursos de organizações criminosas globais, estimados em aproximadamente US\$ 1,5 trilhão por ano (NAPOLEONI, 2004).

O terrorismo suicida, embora muitas vezes visto como uma manifestação de paixão e fanatismo extremo, também é um ato de racionalidade, premeditação e planejamento estratégico. Esses atos são projetados não só para causar destruição, mas também para capturar a atenção da mídia e, por extensão, do público, que é ávido por notícias (POST et al., 2009).

A natureza imprevisível e a capacidade de ocorrer a qualquer momento e lugar tornam o terrorismo suicida particularmente desafiador para as estratégias de segurança preventiva. Os homens-bomba são uma tática de escolha, pois são de baixo custo e produzem danos materiais significativos, além de um forte impacto psicológico sobre o adversário, geralmente mais preparado para confrontos convencionais. Em um episódio notável, as autoridades britânicas, através de trabalho de inteligência, impediram um ataque terrorista em 10 de agosto de 2006, quando extremistas

planejavam explodir cerca de dez aviões a caminho dos Estados Unidos. Os terroristas tentariam embarcar com substâncias líquidas não detectáveis por raios-X, que, quando combinadas, formariam explosivos (LIMA, 2005).

Dentro da doutrina do terrorismo suicida, grupos extremistas justificam ataques contra todos aqueles que consideram inimigos do Islã, começando por Israel – referido como "Pequeno Satã" – e os Estados Unidos – o "Grande Satã". Em seguida, estão todos os considerados "infiéis, corrompidos e decadentes" do mundo ocidental e seus aliados (PONTES, 1999). Entre os grupos que adotam tais táticas estão a Brigada dos Mártires de Al Aqsa, o Hamas e a Jihad Islâmica na Palestina; o Hezbollah no Líbano; o Gamaa Islamiyya no Egito; e a Al Qaeda (RAPOSO, 2007).

2.6.1 AMEAÇAS DE TERRORISMO NUCLEAR E RADIOATIVO: IMPLICAÇÕES E DESAFIOS GLOBAIS

Desde a década de 1970, a ameaça de terrorismo nuclear tem sido uma preocupação crescente, especialmente após o fim da Guerra Fria, que acentuou o medo de que armas de destruição em massa (ADM) pudessem ser obtidas por grupos não governamentais. Um dos cenários mais preocupantes envolve o uso de um Dispositivo de Dispersão Radiológica (RDD), conhecido como “bomba suja”. Esse artefato, de fabricação relativamente simples, tem o potencial de liberar radiação suficiente para contaminar vastas áreas, representando uma grave ameaça (BOLSHOV; ARUTYUNYAN; PAVLOVSKY, 2002).

Além dos RDDs, as usinas nucleares são vistas como alvos estratégicos para ataques terroristas. Ahmed Ressam, membro da Al Qaeda, revelou em 3 de julho de 2001 que essas instalações estavam na mira de terroristas. A gravidade dessa ameaça foi demonstrada em junho de 2003, quando o *Federal Bureau of Investigation* (FBI) desmontou um campo de treinamento próximo à usina de Three Mile Island, nos Estados Unidos. Caso uma instalação nuclear tivesse sido atingida durante os ataques de 11 de setembro de 2001, as consequências teriam sido catastróficas, com a liberação de produtos de fissão nuclear, como o Plutônio-239, contaminando o ambiente por milhares de anos (MARQUES, 2001).

Estima-se que existam cerca de 30 mil armas nucleares em todo o mundo. Embora seja improvável que qualquer Estado repasse intencionalmente essas armas a grupos terroristas, o risco persiste de que militares ou cientistas, movidos por ideologias extremistas ou incentivos financeiros, o façam. Os países da ex-União Soviética apresentam particular preocupação, devido ao grande volume de material radioativo armazenado sob condições de segurança precárias (BOLSHOV;

ARUTYUNYAN; PAVLOVSKY, 2002).

Outro ponto de vulnerabilidade são os materiais nucleares descartados, conhecidos como lixo atômico. Esses resíduos são utilizados em diversas aplicações civis e militares, como na medicina, onde a segurança é menos rígida, facilitando o acesso de grupos terroristas. Isso eleva a probabilidade de construção de "bombas sujas", combinando fontes radioterápicas com explosivos convencionais, tornando-se a arma nuclear mais acessível para terroristas (RAPOSO, 2007).

Em 28 de abril de 2004, o Conselho de Segurança da Organização das Nações Unidas (ONU), em sua 4956ª sessão, aprovou a Resolução 1540, que reconhece que "a proliferação de armas nucleares, químicas e biológicas, bem como seus sistemas vetores, constitui uma ameaça à paz e segurança internacionais". Diante da crescente ameaça de que agentes não estatais possam "adquirir, desenvolver ou utilizar armas nucleares, químicas e biológicas, ou seus sistemas vetores" (ARIAS, 2018; ONU, 2004), a ONU destacou a necessidade de uma coordenação internacional intensificada para enfrentar esse risco.

Desde então, a tática dos "lobos solitários" tem ganhado força, especialmente em grupos de extrema direita e no fundamentalismo islâmico, levantando questionamentos sobre o futuro do terrorismo nuclear realizado por esses atores individuais. A análise desse cenário sugere que o terrorismo nuclear pode se disseminar mais facilmente entre atores individuais, como os lobos solitários, do que entre grupos organizados. Os lobos solitários são indivíduos que se radicalizam por conta própria, atuam de forma independente e, ocasionalmente, recebem ajuda de terceiros. Eles operam fora de estruturas organizacionais e agem sem qualquer ligação formal com líderes ou grupos terroristas. Seus ataques são moldados por suas próprias agendas e ideologias, muitas vezes motivados por sentimentos de marginalização. Seu modus operandi inclui ameaças, violência e sabotagem (ARIAS, 2018).

Por outro lado, o terrorista individual, embora atue de maneira isolada, pode operar em pequenas células e alegar filiação a um grupo terrorista. Ele pode ser influenciado por líderes ocultos e, em certos casos, outra pessoa pode planejar seu atentado (GARRIGA, 2014). Apesar das semelhanças no modo de atuação, os lobos solitários diferem dos terroristas individuais principalmente no grau de independência ao planejar e executar seus ataques. O terrorismo individual é particularmente perigoso devido à dificuldade de detecção, menor preocupação com as consequências dos atos e maior propensão a ataques imprevisíveis e de grande magnitude (SIMÓN, 2017).

Até 2018 foram registrados cinco casos de tentativas de ataque com dispositivos radiológicos e

nucleares por atores individuais (ARIAS, 2018):

- Em 2002, nos Estados Unidos da América (EUA), José Padilla (Abdullah al-Muhajir) foi preso por planejar uma "bomba suja" que poderia causar mais vítimas que o ataque de 11 de setembro.
- Em 2004, nos EUA, Demetrius "Van" Crocker foi preso por tentar adquirir materiais para fabricar uma "bomba suja" e atacar o Congresso dos EUA.
- Em 2008, nos EUA, o neonazista James G. Cummings foi encontrado morto, com materiais para construir uma "bomba suja" em sua residência.
- Em 2009, na França, Adlène Hicheur, físico, foi preso por tentar adquirir material radiológico para um ataque em nome da Al Qaeda no Magrebe Islâmico.
- Em 2015, nos EUA, Glendon Scott Crawford foi preso por planejar um ataque com um dispositivo radiológico contra a comunidade muçulmana e o presidente Barack Obama.

Embora apenas cinco casos tenham sido registrados até 2018, a crescente ameaça do terrorismo nuclear por indivíduos é motivo de preocupação. O uso de "bombas sujas", que causam menos mortes diretas que armas nucleares convencionais, ainda gera grande pânico e ruptura social (ARIAS, 2018; GARRIDO, 2012).

O conceito de "terrorismo nuclear" inclui tanto o uso de materiais radioativos em ataques quanto a ameaça de tais ações. Envolve o uso de armas nucleares ou radiológicas e ataques a instalações nucleares, sendo uma questão debatida por especialistas como Vicente Garrido, Xavier Bohigas e Cristian Martín Corrales (GARRIDO, 2012; BOUHIGAS, 2013; MARTÍN CORRALES, 2007). O interesse de grupos terroristas em adquirir materiais nucleares para fins de destruição em massa é uma preocupação crescente, e o perfil dos atores individuais, com sua capacidade de inovar e surpreender, encaixa-se bem nesse cenário (ARIAS, 2018; GARRIDO, 2012).

2.6.2 BIOTERRORISMO: DINÂMICAS E IMPLICAÇÕES DAS AMEAÇAS BIOLÓGICAS CONTEMPORÂNEAS

O emprego de agentes infecciosos como ferramentas de guerra não é um fenômeno novo, mas o uso desses agentes como mecanismo de terror vem de longa data. Um exemplo marcante foi o incidente de 2001, quando o envio de cartas pelo serviço postal dos EUA contaminadas com esporos do *Bacillus anthracis* resultou em cinco mortes e outras 22 pessoas afetadas, mostrando a gravidade do bioterrorismo (HOWITT; PANGI, 2003).

Agentes patogênicos como o *Bacillus anthracis*, o vírus da varíola, *Yersinia pestis*, a toxina do *Clostridium botulinum*, *Francisella tularensis*, o vírus ebola e o vírus Marburg são categorizados como Categoria A – Alta Prioridade pelo Centers for Disease Control and Prevention (CDC) dos EUA, significando que são de alto risco e potencial uso terrorista. Sergey V. Netesov, da Academia Russa de Ciências, em 2002, sugeriu que o vírus da hepatite A também deveria ser incluído nessa lista devido à sua gravidade e facilidade de transmissão. No Brasil, a vacinação contra a hepatite A é opcional, o que amplia a vulnerabilidade. O cenário do bioterrorismo é complicado pela imprevisibilidade de um ataque. Um cenário preocupante seria a chegada ao Brasil de indivíduos infectados em aeroportos dos EUA ou Europa, potencialmente iniciando um surto antes mesmo de serem detectados, como aconteceu na Iugoslávia em 1972 (NETESOV, 2002).

Considerando os riscos envolvidos na manipulação de microorganismos de alta prioridade, que exigem laboratórios de alto nível de biossegurança, é provável que terroristas optem por patógenos mais comuns e de fácil manipulação, como salmonela, rotavírus, ou os causadores de doenças como difteria, cólera, influenza e hidrofobia (NETESOV, 2002).

Outra vertente preocupante é o “agroterrorismo”, onde o foco é ataques a plantações e rebanhos com o objetivo de dizimar plantas e animais ou causar embargos internacionais à sua exportação. No Brasil, doenças como a monília do cacaueteiro, besouro asiático, ácaro do arroz e cochonilha rosada na vegetação, além de febre aftosa, encefalopatia espongiforme bovina (“vaca louca”), e gripe aviária no setor animal, representam riscos significativos (RAPOSO, 2007).

2.6.3 ESTRATÉGIAS DE DEFESA: ABORDAGENS DE ANTITERRORISMO E CONTRATERRORISMO

O combate ao terrorismo envolve estratégias complexas e diversificadas, ultrapassando a simples aplicação de força armada. A estratégia de combate é multidimensional, abrangendo desde a política externa, colaboração intergovernamental, até ações de inteligência e financeiras para cortar o financiamento aos grupos terroristas (PILLAR, 2001). Uma integração efetiva e coordenação entre essas medidas são essenciais para o sucesso dessas operações.

Kofi Annan, então secretário-geral das Nações Unidas, propôs uma abordagem conhecida como "cinco Ds": Desencorajar a adoção do terrorismo, Denegar recursos aos terroristas, Dissuadir apoio estatal, Desenvolver capacidades de prevenção e Defender os direitos humanos e a lei (ANNAN, 2006).

No Brasil, há esforços contínuos para fortalecer as políticas de prevenção e combate ao terrorismo. O país participa ativamente do Comitê Interamericano Contra o Terrorismo, aderiu à maioria dos tratados antiterrorismo patrocinados pela ONU, e segue as recomendações do Grupo de Ação Financeira Internacional Contra a Lavagem de Dinheiro. O relatório "Country Reports on Terrorism 2005 - April 2006" do Departamento de Estado Norte-Americano destacou áreas de preocupação nas fronteiras do Brasil com Colômbia e na tríplice fronteira com Paraguai e Argentina, indicando falhas no controle de células terroristas nesses locais, embora o governo brasileiro negue a presença operacional de grupos extremistas islâmicos na região (ESTADOS UNIDOS, 2006).

A recolha e análise de informações de inteligência representam um pilar central na estratégia antiterrorista, embora seja uma das faces menos visíveis dessa luta. As agências de inteligência, consideradas a "primeira linha de defesa" nos EUA, enfrentam o desafio de obter dados precisos e confiáveis, muitas vezes trabalhando com informações fragmentadas e pouco claras. Apesar de certas limitações, como demonstrado nos ataques de 11 de setembro, a inteligência desempenha um papel crucial na previsão e prevenção de atos terroristas, orientando decisões estratégicas sobre possíveis ameaças e táticas terroristas (FRIEDMAN, 2005; PILLAR, 2001).

2.7 PRODUTOS UTILIZADOS NA DESCONTAMINAÇÃO RADIOLÓGICA E NUCLEAR: EDTA E AZUL DA PRÚSSIA

A descontaminação radiológica e nuclear é um campo de estudo que envolve diversas estratégias para mitigar os efeitos nocivos da exposição a materiais radioativos. Esses processos são essenciais tanto em situações de acidente quanto na rotina de indústrias e instituições de saúde que lidam com radionuclídeos (LOPES et al., 2015). Entre as substâncias mais estudadas e utilizadas para este fim, destacam-se o ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA) e o Azul da Prússia (ferrocianeto férrico) (DUARTE, 1992; ASSUNÇÃO, 2006). Ambos os produtos desempenham papéis importantes na remoção de radionuclídeos específicos do corpo humano ou de ambientes contaminados (SALGADO, 2020; OLIVEIRA, 2018).

2.7.1 O EDTA

O EDTA é um agente quelante amplamente utilizado na descontaminação interna de indivíduos expostos a elementos radioativos. Esse composto é capaz de formar complexos estáveis com diversos íons metálicos, o que facilita sua excreção do organismo. Tradicionalmente, o EDTA tem sido usado

no tratamento de contaminações por metais pesados, mas também tem mostrado eficácia na descontaminação de radionuclídeos, como o estrôncio e outros elementos divalentes, principalmente em casos de acidentes radiológicos (DUARTE, 1992).

Em relação à sua aplicação, o EDTA foi utilizado com sucesso em diversas situações de emergência nuclear. No entanto, estudos mais recentes indicam que seu uso apresenta limitações. Embora seja eficiente para certos metais, sua ação sobre outros elementos pode ser menos eficaz, exigindo o uso combinado com outros agentes (LOPES et al., 2015). Além disso, o uso prolongado de EDTA pode levar à depleção de íons essenciais no corpo, como cálcio e magnésio, o que exige monitoramento cuidadoso durante os tratamentos (DUARTE, 1992).

Na busca por aprimoramento na eficácia de descontaminação, novas abordagens envolvendo o EDTA têm sido investigadas. Oliveira (2018) realizou estudos sobre o uso do óxido de grafeno combinado com EDTA para a descontaminação de rejeitos radioativos líquidos, mostrando que essa combinação pode aumentar significativamente a capacidade de adsorção de radionuclídeos, como o céσιο-137. Essa descoberta abre novas possibilidades para o tratamento de grandes volumes de resíduos radioativos, especialmente em instalações nucleares, onde a geração de rejeitos é constante.

2.7.2. O AZUL DA PRÚSSIA

O Azul da Prússia é amplamente reconhecido por sua alta afinidade por céσιο e tálio, elementos radioativos comumente encontrados em situações de contaminação nuclear. O composto age formando complexos insolúveis com esses metais, o que impede sua reabsorção no trato gastrointestinal, promovendo sua eliminação fecal (ASSUNÇÃO, 2006). Isso faz com que o Azul da Prússia seja uma das substâncias de escolha no tratamento de pessoas expostas ao céσιο-137, como foi o caso no acidente radiológico de Goiânia, em 1987, quando muitas vítimas foram tratadas com essa substância (ASSUNÇÃO, 2006).

O uso do Azul da Prússia é eficaz, seguro e amplamente aceito em protocolos de descontaminação interna. Lopes et al. (2015) relataram que o Azul da Prússia foi eficaz na remoção de até 90% do céσιο-137 ingerido durante acidentes nucleares, destacando sua importância em situações de emergência. Este composto é considerado o tratamento de primeira linha em casos de contaminação por céσιο e tálio, devido à sua capacidade de acelerar significativamente a eliminação desses radionuclídeos, minimizando os efeitos da radiação no corpo humano (LOPES et al., 2015).

Estudos recentes, como o de Salgado (2020), exploraram novas abordagens para o uso do Azul da Prússia, incluindo a investigação de versões nacionais do composto para descontaminação em

áreas afetadas por radiação, como em Fukushima, no Japão. A pesquisa mostrou que a versão nacional do Azul da Prússia tem desempenho similar ao importado, o que indica uma possível expansão do uso em cenários globais de acidentes nucleares (SALGADO, 2020).

2.7.3. PERSPECTIVAS FUTURAS E NOVAS TECNOLOGIAS

Embora o EDTA e o Azul da Prússia sejam amplamente utilizados, novos produtos e abordagens continuam a ser desenvolvidos na busca por melhorar a eficácia da descontaminação radiológica e nuclear. A pesquisa de Oliveira (2018) sobre o uso de nanomateriais, como o óxido de grafeno, combinados com agentes quelantes, tem se mostrado promissora. Esses novos materiais podem não apenas aumentar a capacidade de adsorção de radionuclídeos, mas também melhorar a manipulação e o processamento de rejeitos radioativos líquidos, contribuindo para uma redução significativa na contaminação ambiental em instalações nucleares.

Adicionalmente, o desenvolvimento de novos agentes quelantes e a investigação contínua sobre combinações de produtos já existentes, como o EDTA, o Azul da Prússia e compostos à base de zeólitas, têm o potencial de melhorar significativamente os resultados da descontaminação interna e ambiental (OLIVEIRA, 2018; SALGADO, 2020). As zeólitas, por exemplo, têm sido utilizadas na descontaminação de áreas altamente radioativas devido à sua capacidade de adsorver grandes quantidades de radionuclídeos em um curto período de tempo (SALGADO, 2020).

Essas novas abordagens indicam que a descontaminação radiológica e nuclear está em constante evolução, com o objetivo de oferecer soluções mais eficazes e seguras em cenários de exposição a radiação. O contínuo desenvolvimento de produtos como o óxido de grafeno-EDTA e a melhoria na produção de Azul da Prússia nacional são exemplos de como a pesquisa científica pode proporcionar respostas mais rápidas e eficazes para emergências nucleares.

2.8 RADIOTRAÇADORES TECNECIO-99M E IODO-131: PROPRIEDADES, USO NA MEDICINA NUCLEAR E DESAFIOS NA DESCONTAMINAÇÃO

Os radionuclídeos desempenham um papel essencial na medicina nuclear, sendo amplamente utilizados para diagnóstico e terapia de diversas patologias. Dentre os mais empregados, destacam-se o tecnécio-99m e o iodo-131, cujas propriedades físicas e químicas os tornam ideais para exames de imagem e tratamentos específicos (FERREIRA et al., 2022). O uso desses radioisótopos permite a detecção precoce de doenças, além de possibilitar intervenções terapêuticas mais direcionadas e eficazes (SANTOS et al., 2021). Entretanto, a ausência de descontaminantes eficazes representa um grande desafio na manipulação segura dessas substâncias, tanto para profissionais da área quanto para a proteção ambiental, tornando necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para minimizar os riscos da exposição radioativa (MENDES et al., 2023).

O tecnécio-99m é um isômero metastável do tecnécio-99 e apresenta uma meia-vida de aproximadamente 6 horas, o que permite sua utilização em procedimentos diagnósticos sem que o paciente fique exposto à radiação por um período prolongado (SILVA et al., 2021). Sua emissão de radiação gama, com energia de 140 keV, é ideal para a detecção por câmeras gama, tornando-o amplamente utilizado na cintilografia de diversos órgãos, como coração, rins, ossos e cérebro (FERREIRA et al., 2022). Além disso, sua produção ocorre a partir do decaimento do molibdênio-99, o que possibilita a extração do radioisótopo em geradores portáteis, facilitando sua distribuição para hospitais e clínicas (SANTOS et al., 2021). Quimicamente, o tecnécio-99m pode ser facilmente incorporado a diversos compostos, permitindo a obtenção de diferentes radiofármacos utilizados em exames específicos, como o sestamibi para perfusão miocárdica e o metilenodifosfonato para estudos ósseos (OLIVEIRA et al., 2020).

Já o iodo-131, com meia-vida de aproximadamente 8 dias, é um emissor de radiação beta e gama, sendo amplamente utilizado tanto no diagnóstico quanto no tratamento de doenças da tireoide, especialmente no hipertireoidismo e no câncer diferenciado de tireoide (ALMEIDA et al., 2019). Sua captação pela glândula tireoide ocorre devido à afinidade natural do iodo pelos tecidos tireoidianos, tornando-o um radionuclídeo altamente específico para essas aplicações (OLIVEIRA et al., 2020). A radiação beta emitida pelo iodo-131 é eficaz na destruição de células tireoidianas doentes, enquanto a radiação gama permite a detecção do radiofármaco no organismo, sendo utilizada para monitoramento terapêutico (COSTA et al., 2022). Apesar de suas vantagens clínicas, o iodo-131 apresenta riscos à saúde ocupacional e ao meio ambiente devido à sua eliminação pelo organismo principalmente via urina e suor, tornando essencial a adoção de medidas de segurança para evitar contaminações (MENDES et al., 2023).

A principal preocupação no uso desses radionuclídeos está relacionada à dificuldade de descontaminação de áreas e materiais contaminados. Diferentes métodos de remoção de resíduos radioativos têm sido estudados, mas ainda não há um descontaminante universalmente eficaz para o tecnécio-99m e o iodo-131 (COSTA et al., 2022). No caso do tecnécio-99m, sua rápida conversão para tecnécio-99 após o decaimento reduz sua radioatividade, mas pode resultar na contaminação de superfícies hospitalares e equipamentos (SILVA et al., 2021). Já o iodo-131, devido à sua alta volatilidade e capacidade de se fixar em tecidos biológicos, apresenta um desafio ainda maior, especialmente em laboratórios e centros de medicina nuclear (MENDES et al., 2023). Atualmente, os procedimentos de descontaminação envolvem a utilização de agentes químicos complexantes e soluções detergentes específicas, mas sua eficiência é limitada e depende das características do material contaminado e do tempo de exposição ao radioisótopo (ALMEIDA et al., 2019). O desenvolvimento de novas abordagens para a remoção segura desses radionuclídeos é essencial para minimizar os riscos ambientais e ocupacionais (FERREIRA et al., 2022).

O impacto da contaminação radioativa pelo tecnécio-99m e pelo iodo-131 não se restringe apenas aos ambientes hospitalares, mas também afeta a gestão de resíduos radioativos. A eliminação inadequada desses radionuclídeos pode resultar na contaminação de sistemas hídricos e solos, tornando-se uma preocupação para órgãos reguladores e especialistas da área (COSTA et al., 2022). Pesquisas recentes indicam que a utilização de nanopartículas e materiais adsorventes pode representar uma solução promissora para a captura seletiva desses elementos, reduzindo sua dispersão no meio ambiente (MENDES et al., 2023).

Diante da importância do tecnécio-99m e do iodo-131 na medicina nuclear, torna-se essencial equilibrar os benefícios clínicos com os desafios de segurança e descontaminação. O avanço em tecnologias de descontaminação, o aprimoramento de protocolos de segurança e a conscientização sobre os riscos associados ao manuseio desses radionuclídeos são fundamentais para garantir seu uso seguro e sustentável (FERREIRA et al., 2022). O investimento em pesquisas voltadas para o desenvolvimento de descontaminantes eficazes pode contribuir significativamente para a redução dos impactos ambientais e ocupacionais, permitindo que a medicina nuclear continue a desempenhar um papel crucial no diagnóstico e tratamento de doenças (SANTOS et al., 2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A metodologia utilizada neste estudo combinou uma revisão bibliográfica abrangente com experimentos detalhados para explorar o potencial dos GQDs na descontaminação de superfícies metálicas e plásticas contaminadas com material radioativo. A síntese, caracterização e aplicação dos GQDs foram realizadas de maneira sistemática e rigorosa, fornecendo dados valiosos sobre a eficácia e potencial aplicabilidade desta tecnologia inovadora.

O objetivo do uso experimental de GQDs para a remoção de material radioativo de superfícies metálicas e plásticas. A metodologia aplicada foi meticulosa, incorporando a revisão bibliográfica e experimentação prática para garantir uma abordagem abrangente e cientificamente sólida.

3.2 DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DOS GQDs

O método de síntese empregado para preparar dispersões de GQDs seguiu um protocolo eletroquímico baseado em estudos anteriores, utilizando uma haste de grafite como ânodo e um fio de platina como cátodo. A solução eletrolítica, composta por 63,5 mL de ácido cítrico 0,2 M e 36,5 mL de citrato de sódio 0,2 M, foi cuidadosamente preparada para proporcionar um ambiente apropriado para a oxidação dos materiais. O processo foi conduzido a uma corrente constante de 190 mA durante 24 horas, utilizando uma fonte de alimentação ajustável (ICEL PS-1500). Após a eletrólise, a dispersão foi filtrada para remover partículas maiores e, em seguida, concentrada a 60°C até reduzir seu volume para 10 mL, com posterior adição de etanol para purificação adicional dos GQDs, conforme descrito em estudos sobre métodos de síntese para nanomateriais (MOUDRIKOU DIS et al., 2018; IRJHIS, 2024).

Para caracterizar os GQDs, utilizou-se a DLS com um Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments, Reino Unido), avaliando a distribuição de tamanho e o índice de polidispersidade (PDI). A análise foi realizada a 25 °C, utilizando uma cubeta de quartzo e um ângulo de incidência de laser de 173°, sendo a amostra diluída em uma proporção de 1:400.000 em água Milli-Q. Os resultados, relatados como média \pm desvio padrão, indicaram uma precisão satisfatória da técnica na caracterização do tamanho das partículas (MOUDRIKOU DIS et al., 2018).

A espectroscopia Raman, realizada com um espectrômetro Horiba-Jobin-Yvon T64000, utilizou um laser de 532 nm com potência de 14 mW para excitação. A lente objetiva Olympus MPLN 100× focalizou o laser na amostra, permitindo a análise detalhada das bandas características do grafeno e do óxido de grafeno, verificando a integridade estrutural do material (IRJHIS, 2024).

A AFM, realizada com um instrumento Bruker Multimode 8, permitiu a análise da topografia e composição de fase dos GQDs, com uma resolução de 256×256 linhas. As soluções de GQDs foram aplicadas em substratos de mica clivada e secas a vácuo, o que garantiu a alta qualidade das imagens morfológicas obtidas, essenciais para caracterizar com precisão o diâmetro e a rugosidade superficial dos nanomateriais (MOUDRIKOUUDIS et al., 2018; IRJHIS, 2024).

As propriedades ópticas dos GQDs foram investigadas usando espectrofotometria no Ultravioleta Visível (UV-Vis), (Cary 60, Agilent) e espectroscopia de fluorescência (Ocean Optics HR2000). A excitação foi realizada com um LED de 395 nm, confirmando a presença de transições eletrônicas típicas dos GQDs e suas características luminescentes específicas, importantes para aplicações futuras (MOUDRIKOUUDIS et al., 2018).

Por fim, a análise de PXRD foi realizada com um difratômetro Bruker AXS D8 Advance, usando radiação $\text{CuK}\alpha$ e operando em uma faixa de 2θ de 15 a 68° . O padrão de difração obtido validou a estrutura cristalina esperada para os GQDs, confirmando a eficácia do método de síntese empregado (IRJHIS, 2024).

3.3 EXPERIMENTOS DE DESCONTAMINAÇÃO

O estudo foi conduzido utilizando quatro superfícies distintas — PVC rígido, Monel, zinco e alumínio — com o objetivo de avaliar a eficiência dos Pontos Quânticos de Grafeno (GQDs) na remoção de Tc-99m e I-131, dois radioisótopos amplamente utilizados em medicina nuclear. A escolha do tecnécio-99m (Tc-99m) e do iodo-131 (I-131) como radioisótopos de estudo para este trabalho se deve ao amplo emprego deles em medicina nuclear. O Tc-99m é amplamente o radioisótopo mais utilizado em procedimentos da medicina nuclear, sendo responsável por um volume de 80% da rotina clínica de serviços radiológicos. O motivo para tal extenso uso se deve a suas características: meia-vida curta (cerca de 6 horas); radiação γ de baixa energia (o que permite a geração de imagens de alta qualidade) e exposição radiológica significativamente reduzida. O Tc-99m é obtido do Mb-99 por intermédio de fissão nuclear, em reatores nucleares e distribuído em

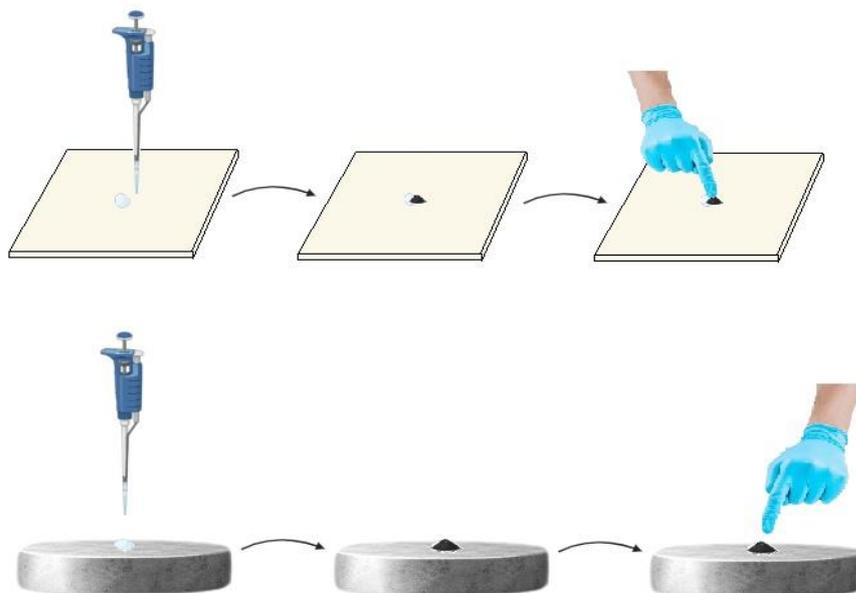
geradores que fazem a extração, em tempo real, do mesmo, para a consumação na clínica (MARQUES; OKAMOTO e BUCHPIGUEL, 2001).

O I-131, por sua vez, difere significativamente do Tc-99m em suas características e aplicações em medicina nuclear. Sendo amplamente absorvido pela tireoide (a qual o incorpora e utiliza em seus processos bioquímicos como o iodo não radioativo), o I-131 apresenta uma janela terapêutica significativamente reduzida para o tratamento de câncer tireoidal e metástases (BARRINGTON et al., 1996). O I-131 é primariamente produzido pela fissão nuclear do U-235 (OLIVEIRA et al., 2009), emite radiação β e γ e possui uma meia-vida de aproximadamente 8 dias. Tal elenco de características, aliada à volatilidade e facilidade de dispersão do radioisótopo, torna-o um substrato de alto risco em um hipotético cenário de terrorismo radiológico. A título de exemplo, no desastre de Chernobyl o I-131 foi identificado como um dos principais agentes responsáveis pelo alto número de casos de câncer de tireoide, em adultos e crianças expostas à radiação (CARDIS et al., 2005)

Para fins de reprodutibilidade, cada superfície utilizada foi delineada para uma área de 3 cm², e nelas soluções líquidas dos isótopos radioativos foram aplicadas com uma atividade específica de 100 microCi. Um minuto depois da deposição das soluções, 20 mg de GQDs em pó foram espalhados uniformemente na a área contaminada. O material foi então esfregado suavemente para garantir uma interação eficaz entre os GQDs e os contaminantes. Por fim, os GQDs foram coletados, pesados e tiveram sua radioatividade mensurada por intermédio de um contador gama (Hidex, Turku, Finlândia).

As superfícies selecionadas para o estudo foram escolhidas com base em suas características físico-químicas e relevância em aplicações práticas, priorizando a obtenção de um panorama da possibilidade de usos dos GQDs – por exemplo, em um cenário de contaminação radioativa. assim, quatro superfícies foram selecionadas: PVC (cloreto de polivinila); Monel, (liga metálica composta predominantemente por níquel e cobre com adições de ferro, manganês, silício e carbono); Zinco, um metal de baixo custo, e por fim, o alumínio. Na Figura 5 trazemos uma ilustração simplificada do procedimento experimental desenhado nesta pesquisa.

Figura 5: Representação esquemática do procedimento experimental realizado nas superfícies selecionadas.



Legenda: As áreas de 3 cm² foram previamente contaminadas com uma solução líquida radioativa de atividade específica de 100 microCi. Após um minuto, 20 mg de GQDs foram aplicados e esfregados uniformemente. A radioatividade residual foi quantificada utilizando um contador gama (Hidex, Turku, Finlândia), evidenciando a eficácia dos GQDs na descontaminação das superfícies testadas.

Fonte: Elaboração do autor.

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram analisados utilizando o teste t de Student (LANE, 2003), com um valor de $p < 0,05$ considerado estatisticamente significativo. Essa análise permitiu avaliar a eficácia dos GQDs na remoção dos isótopos radioativos de diferentes superfícies, fornecendo uma base quantitativa para comparar a eficiência dos GQDs em diferentes condições.

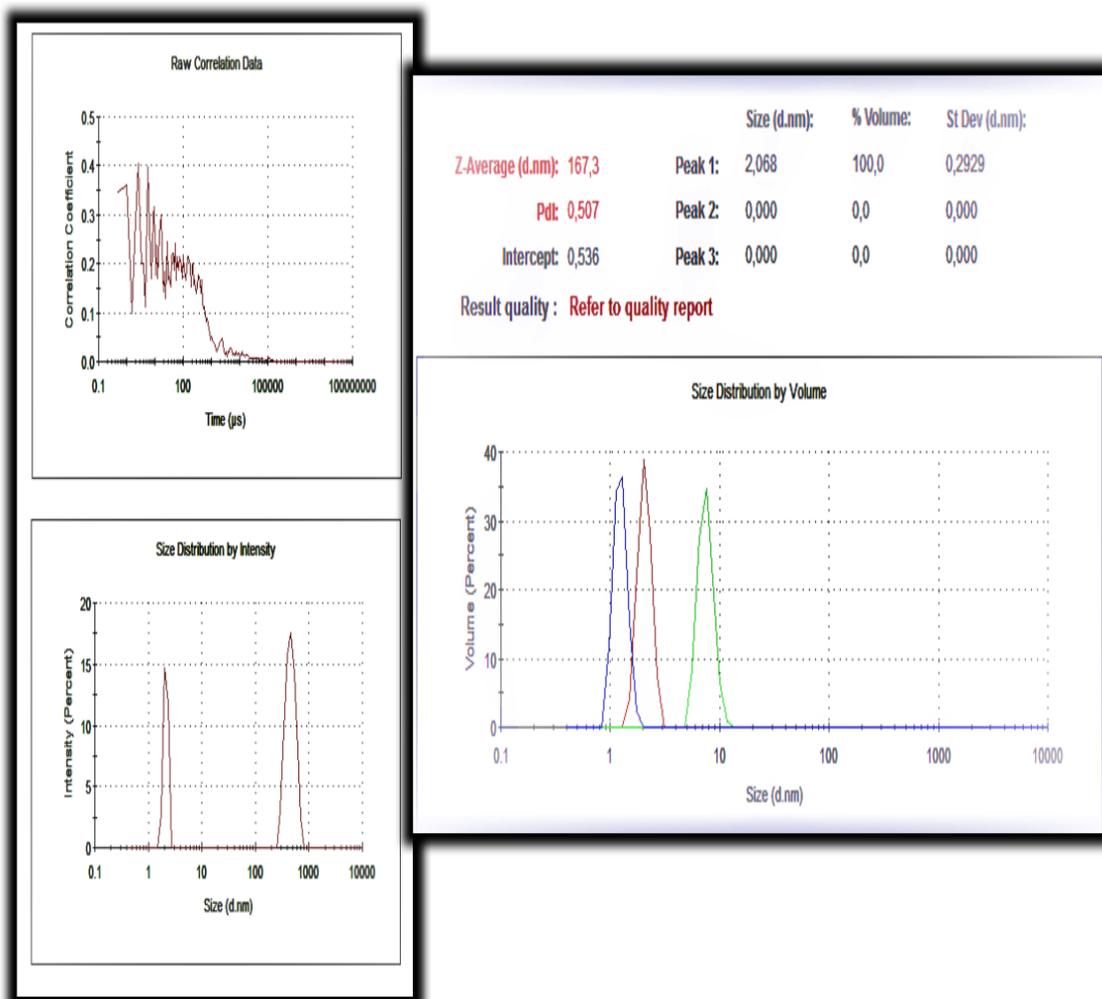
4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS GQDs

A caracterização dos GQDs ultra-diluídos foi realizada conforme a metodologia descrita, utilizando várias técnicas analíticas detalhadas nas figuras. Essas técnicas incluem DLS, Espalhamento Raman, PXRD e DLS, sendo essenciais para garantir uma caracterização abrangente e precisa dos GQDs. A seguir trazemos uma série de figuras com a caracterização dos GQDs, começando pela Figura 6, que traz os dados de DLS para os GQDs ultradiluídos.

O DLS foi utilizado para medir o tamanho médio das partículas em suspensão, revelando um tamanho médio de 167,3 nm. Essa técnica mede as flutuações na intensidade da luz dispersa pelas partículas e é amplamente utilizada para analisar a distribuição de tamanhos em soluções de nanomateriais, sendo crucial para garantir a uniformidade e a estabilidade dos GQDs (MOUDRIKOU DIS et al., 2018). Na Figura 6 trazemos a análise por espalhamento de luz dinâmico dos GQDs ultradiluídos.

Figura 6: Análise por espalhamento de luz dinâmico dos GQDs ultradiluídos.

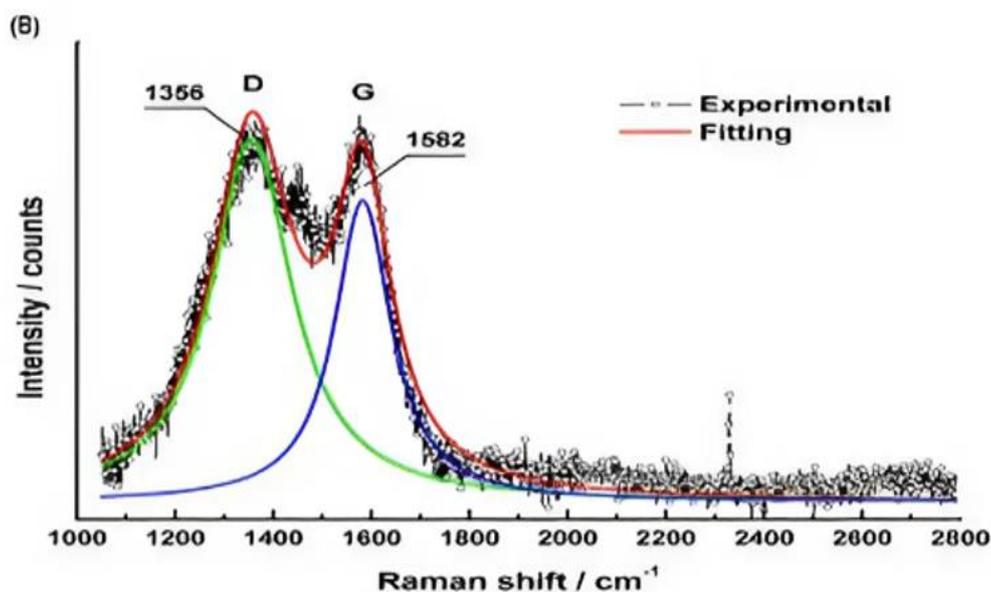


Legenda: Análise de espalhamento de luz dinâmico da amostra ultra-diluída (1:400.000) de pontos quânticos de grafeno (GQDs). O tamanho médio foi de 167,3 nm.

Fonte: Elaboração própria.

A espectroscopia Raman foi usada para investigar as vibrações moleculares do óxido de grafeno (GO). O espectro apresentou uma banda G ($\sim 1600\text{ cm}^{-1}$), associada às vibrações do carbono sp^2 , e uma banda D ($\sim 1360\text{ cm}^{-1}$), relacionada à desordem estrutural. A razão ID/IG ($\sim 1,2$) confirma a pureza do grafeno. A ausência de um pico em $\sim 2690\text{ cm}^{-1}$ indica que a estrutura bidimensional característica dos pontos quânticos foi preservada (MOUDRIKOU DIS et al., 2018). Na Figura 7 mostramos a análise espectroscópica por Raman dos GQDs ultradiluídos.

Figura 7: Análise espectroscópica por Raman dos GQDs ultradiluídos.

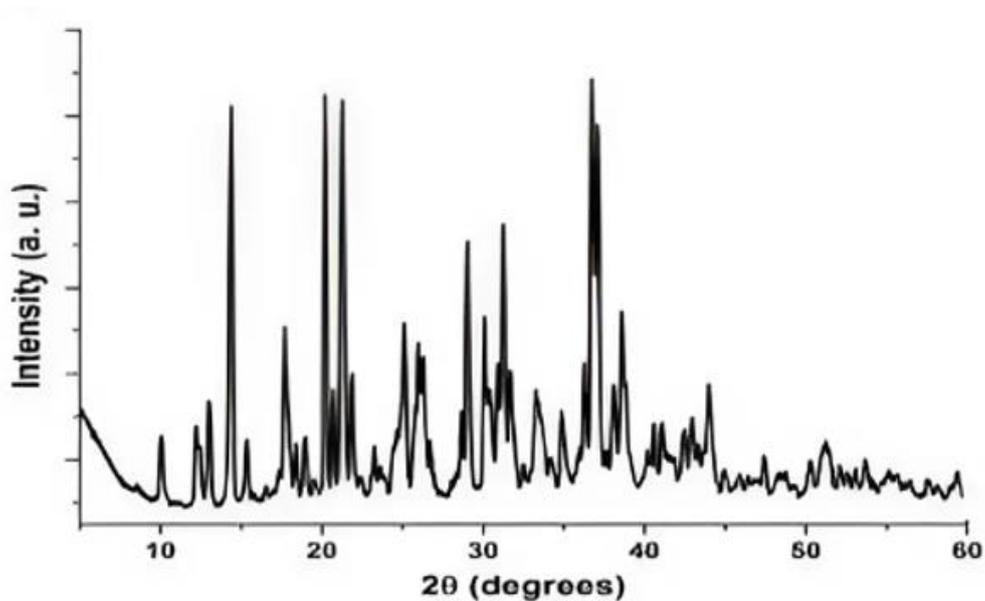


Legenda: Análise Raman mostrando o espectro de GO, onde a vibração em fase (banda G) de GO está em $\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ e a banda de desordem (banda D) de GO em $\sim 1360 \text{ cm}^{-1}$. É possível observar as intensas bandas D e G em 1356 e 1582 cm^{-1} , respectivamente, com a razão de intensidade entre ID/IG do pico D e G relativamente alta ($\sim 1,2$), corroborando a pureza do grafeno. Além disso, não se observa um pico em $\sim 2690 \text{ cm}^{-1}$, o que indica a formação da estrutura 2D, corroborando, neste caso, a formação dos GQDs.

Fonte: Elaboração própria.

A PXRD foi utilizada para avaliar a estrutura cristalina dos GQDs. O pico característico em $2\theta = 10^\circ$ confirma a presença de camadas de grafeno, enquanto a presença de citrato foi identificada como estabilizante, essencial para a integridade e dispersão uniforme dos GQDs em soluções aquosas (IRJHIS, 2024). A seguir, mostramos na Figura 8, a análise de difração de raio-x em pó dos GQDs ultradiluídos.

Figura 8: Análise de difração de raio-x em pó dos GQDs ultradiluídos.

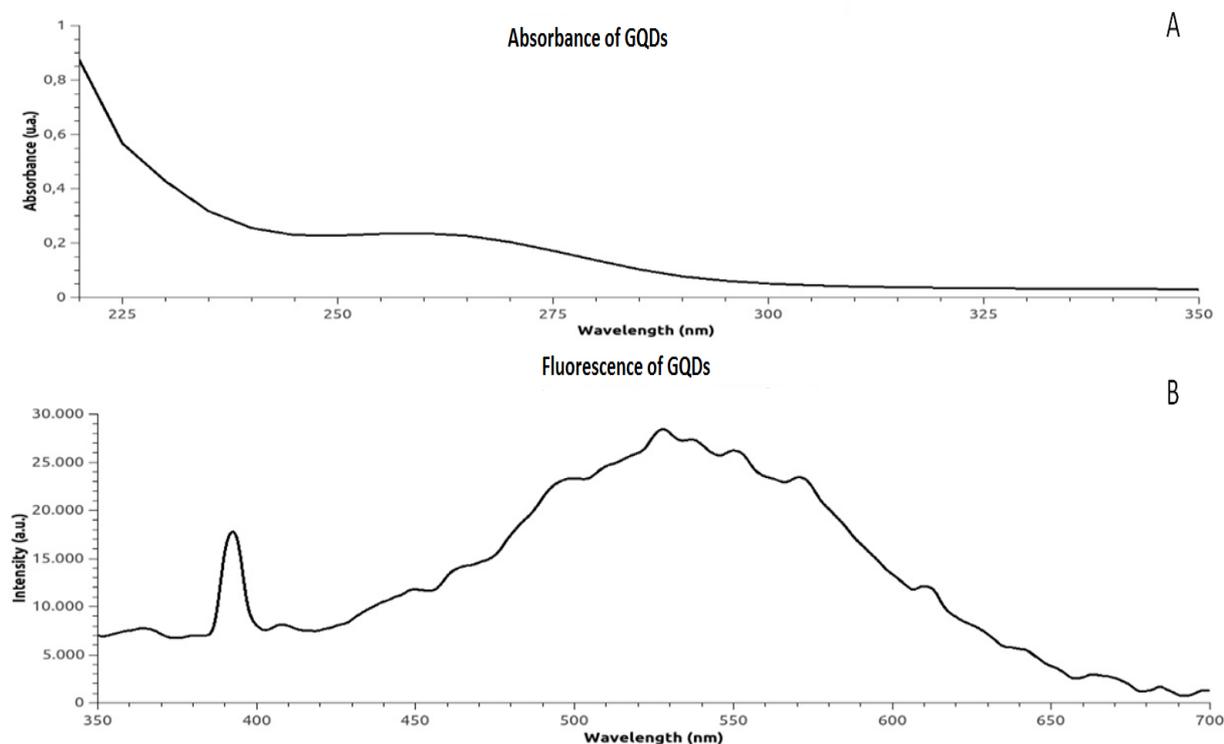


Legenda: A análise de PXRD da amostra mostra a formação do pico de grafeno em $2\theta = 10^\circ$, assim como a presença de citrato.

Fonte: Elaboração própria.

As propriedades ópticas dos GQDs foram investigadas usando espectroscopia de absorção e fluorescência. O espectro de absorção apresentou um pico em 265 nm, típico da transição $\pi-\pi^*$ dos anéis de carbono, e o espectro de fluorescência mostrou um máximo em torno de 530 nm, indicando a presença de grupos funcionais que contribuem para a luminescência, importante em aplicações em bioimagem e sensores (MOUDRIKOU DIS et al., 2018). Na Figura 9 a seguir, são apresentadas análises das propriedades ópticas, incluindo absorvância e fluorescência, de GQDs em condições de ultradiluição.

Figura 9: Análises das propriedades óticas (absorbância e fluorescência) dos GQDs ultradiluídos.

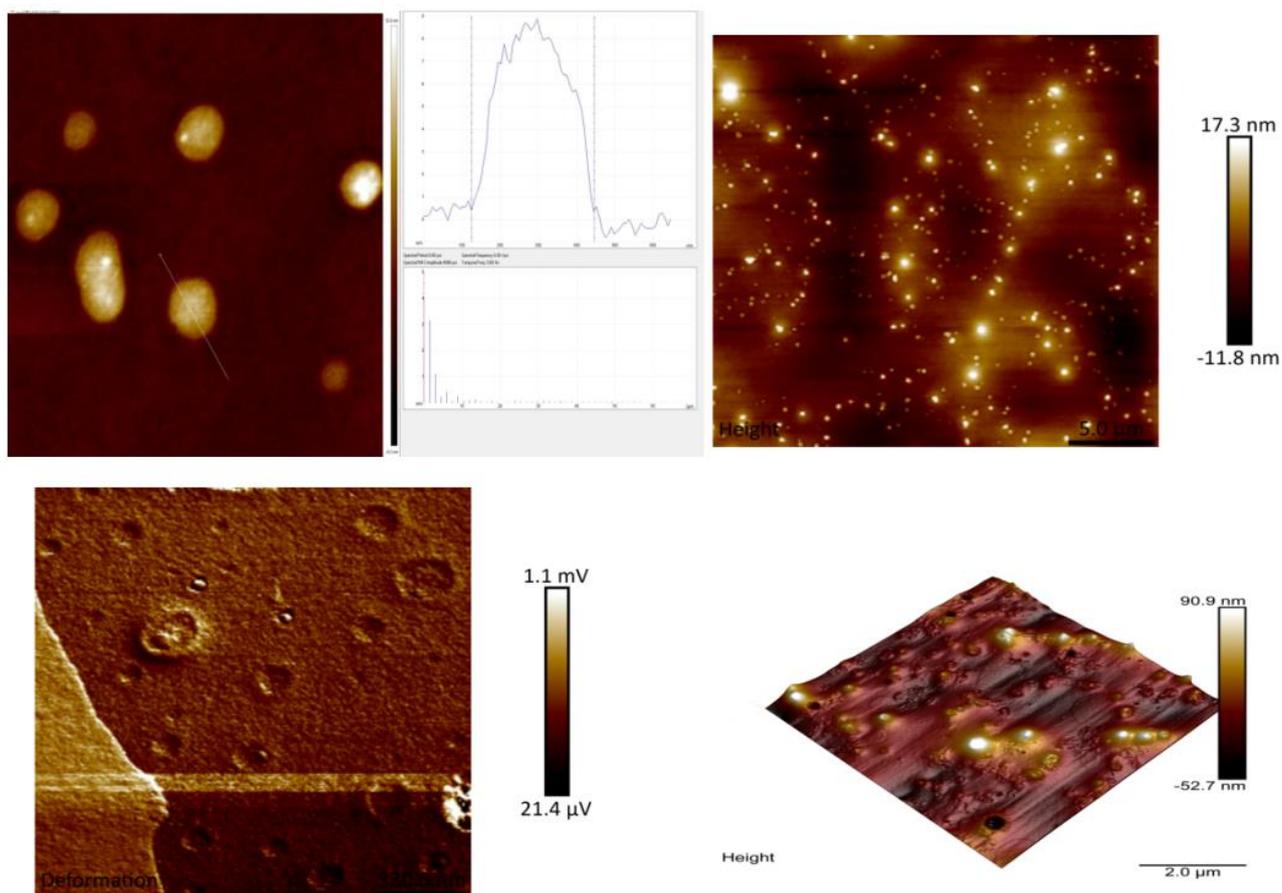


Legenda: As propriedades óticas dos GQDs. O painel A mostra o espectro de absorção dos GQDs com um máximo em 265 nm e o painel B mostra o espectro de fluorescência com o máximo em torno de 530 nm.

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, a AFM foi empregada para caracterizar a morfologia dos GQDs. As imagens mostraram uma distribuição de tamanho entre 160 e 280 nm, com baixa rugosidade superficial, confirmando a boa homogeneidade das partículas. A técnica de AFM é amplamente utilizada para avaliar a topografia de nanomateriais, proporcionando detalhes em escala nanométrica (IRJHIS, 2024). Na próxima página, a Figura 10 apresenta a análise por microscopia de força atômica (AFM) dos GQDs em condições de ultradiluição.

Figura 10: Análise de microscopia de força atômica dos GQDs ultradiluídos.



Legenda: Os dados de AFM revelam a distribuição de tamanho dos GQDs (160-280 nm). Observa-se uma boa homogeneidade e a altura das nanopartículas indica baixa rugosidade, além da presença de lamínulas.

Fonte: Elaboração própria.

4.2. ENSAIO DE DESCONTAMINAÇÃO

A análise estatística dos dados, utilizando o teste t de Student, indicou que a interação entre os GQDs e os radioisótopos foi mais crucial do que o tipo de material da superfície contaminada, conforme mostrado na Tabela 1. Este resultado sugere que os GQDs podem ser uma solução versátil e eficaz para uma ampla gama de aplicações de descontaminação.

Tabela 1: Eficácia dos GQDs na Remoção de Radioisótopos.

Radioisótopo	Material	Eficácia Média (%)	Desvio Padrão
131-I	Alumínio	91.27	1.04
131-I	Monel	96.40	0.56
131-I	Zinco	98.67	0.06
131-I	PVC (Plástico)	97.84	2.01
99mTc	Alumínio	55.11	5.34
99mTc	Monel	64.93	1.04
99mTc	Zinco	41.80	1.71
99mTc	PVC (Plástico)	65.30	15.02

Legenda: Eficácia média de diferentes materiais na remoção de radioisótopos 131-I e 99mTc: A tabela mostra a eficácia média (%) e o desvio padrão de materiais como alumínio, Monel, zinco e PVC na remoção dos radioisótopos 131-I e 99mTc. Os resultados indicam uma alta eficácia para o 131-I, especialmente com o uso de zinco (98,67%), enquanto a remoção do 99mTc apresenta variações significativas, com a menor eficácia observada no zinco (41,80%) e a maior no PVC (65,30%) com um desvio padrão elevado, sugerindo variações nos resultados.

Fonte: Elaboração do autor.

5 DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS GQDs

A caracterização dos GQDs seguiu uma metodologia abrangente, utilizando técnicas analíticas que garantem uma avaliação detalhada e precisa das propriedades dos nanomateriais. A utilização de técnicas como DLS, Espectroscopia Raman, PXR, espectroscopia de absorção e fluorescência, e AFM foram essenciais para validar a uniformidade, estrutura e estabilidade dos GQDs.

No caso do DLS, o resultado apontou um tamanho médio de 167,3 nm para as partículas em suspensão, corroborando o que Moudrikoudis et al. (2018) destacam sobre a importância dessa técnica na análise de nanomateriais. O DLS mede o tamanho hidrodinâmico das partículas, um parâmetro crucial para garantir a uniformidade e estabilidade das suspensões coloidais. No entanto, a literatura também ressalta que o tamanho medido em suspensão pode ser ligeiramente superior ao tamanho das partículas em estado seco, um ponto relevante a ser considerado quando comparado com técnicas como AFM, que mede o tamanho diretamente em uma superfície sólida.

A espectroscopia Raman revelou bandas características (D e G) que indicam a pureza do grafeno e a preservação de sua estrutura bidimensional. No presente estudo, a razão ID/IG de ~1,2 sugere uma pureza satisfatória com um certo nível de desordem, o que é comum em materiais que passam por processos de funcionalização para aplicações específicas. A ausência do pico em ~2690 cm^{-1} , correspondente ao modo 2D do grafeno, indica que a estrutura original foi mantida, sendo um fator crucial para a preservação das propriedades ópticas dos GQDs.

A PXR confirmou a presença das camadas de grafeno com um pico em $2\theta = 10^\circ$. Segundo o artigo do IRJHIS (2024), este pico é característico de materiais derivados de grafeno e indica uma organização lamelar, essencial para a integridade e funcionalidade dos nanomateriais. Além disso, a presença de citrato como estabilizante, detectada pelo PXR, é consistente com práticas comuns descritas na literatura para melhorar a dispersão coloidal e a estabilidade dos GQDs em solução aquosa. O uso de agentes estabilizantes é fundamental para evitar a agregação, que comprometeria a eficiência dos GQDs em aplicações ópticas e biomédicas.

As análises ópticas dos GQDs, por meio de espectroscopia de absorção e fluorescência, apresentaram resultados coerentes com as transições $\pi-\pi^*$ dos anéis de carbono, com um pico de absorção em 265 nm e um máximo de fluorescência em torno de 530 nm. Esses resultados são consistentes com Moudrikoudis et al. (2018), que descrevem que a luminescência dos GQDs é

amplamente influenciada pelos grupos funcionais presentes. Tais propriedades são essenciais para aplicações em bioimagem, onde a emissão de luz em comprimentos de onda específicos permite a detecção e visualização precisa de processos biológicos.

Por fim, a análise de AFM demonstrou que os GQDs possuem uma distribuição de tamanho entre 160 e 280 nm, com baixa rugosidade superficial, indicando boa homogeneidade e uniformidade das partículas. A baixa rugosidade observada é indicativa de uma superfície homogênea, o que é fundamental para garantir a estabilidade e eficácia dos GQDs em aplicações tecnológicas.

Em resumo, os resultados da caracterização dos GQDs estão alinhados com a literatura científica e confirmam a eficácia das técnicas utilizadas. O uso combinado de diferentes métodos analíticos permite uma avaliação detalhada e precisa das propriedades dos nanomateriais, assegurando que os GQDs desenvolvidos possuem as características necessárias para aplicações em bioimagem e sensores ópticos. A comparação com os estudos de Moudrikoudis et al. (2018) e o IRJHIS (2024) reforça a importância de uma caracterização multifacetada e criteriosa para a validação das propriedades dos nanomateriais, destacando a complementação entre as técnicas para uma análise abrangente.

5.2. EFICÁCIA DOS GQDS NA REMOÇÃO DE ISÓTOPOS RADIOATIVOS

Conforme os resultados apresentados na Tabela 1, o experimento avaliou a eficácia dos GQDs na remoção dos radioisótopos tecnécio-99m (^{99m}Tc) e iodo-131 (^{131}I) em superfícies de alumínio, Monel, zinco e PVC rígido. Os GQDs demonstraram alta eficácia na remoção do iodo-131 em todos os materiais, destacando-se o zinco, que alcançou a maior eficácia, com 98,67% e um desvio padrão de 0,06%, indicando consistência nos resultados. O PVC também mostrou uma eficácia elevada (97,84%), mas com um desvio padrão maior (2,01%), sugerindo alguma variação nos resultados.

Em contrapartida, a remoção do tecnécio-99m apresentou variações mais significativas entre os materiais. O PVC obteve a maior eficácia média (65,30%), porém com um desvio padrão elevado de 15,02%, indicando uma variação substancial nos dados. O Monel também apresentou uma eficácia relativamente alta (64,93%) com um desvio padrão mais baixo (1,04%), mostrando maior consistência. Já o alumínio e o zinco tiveram menores eficácias, com 55,11% e 41,80%, respectivamente, sendo o zinco o material menos eficaz para o tecnécio-99m. Esses resultados sugerem que, enquanto a remoção de ^{131}I é altamente eficaz e consistente nos diferentes materiais,

a remoção de ^{99m}Tc é mais suscetível a variações dependendo do material utilizado, com resultados insatisfatórios.

A análise estatística sugeriu que o tipo de material (metal vs. plástico) não impactou significativamente a eficácia dos GQDs, indicando que a interação entre os GQDs e os radioisótopos foi mais crucial.

Os resultados obtidos neste estudo estão em consonância com achados de pesquisas recentes que destacam a eficácia dos nanomateriais na remoção de contaminantes. A literatura aponta que materiais nanocompósitos são altamente eficientes, principalmente devido à sua grande área superficial e alta reatividade, como observado por Yang, Zhu e Wang (2021). Processos de oxidação avançada (AOPs) também são amplamente reconhecidos por sua capacidade de degradar compostos tóxicos, sendo um princípio aplicável aos mecanismos de ação dos GQDs (SARKAR E CHAKRABARTI, 2020). Esses resultados corroboram com as observações de processos de oxidação avançada descritos por Sarkar e Chakrabarti (2020), embora os GQDs apresentem uma abordagem mais direcionada e eficiente na adsorção de poluentes devido à sua alta área superficial e reatividade (YANG, ZHU E WANG, 2021).

5.3 COMPARAÇÃO COM TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS DE DESCONTAMINAÇÃO

A literatura revisada, como o estudo de Sandhu e Kumar (2021), destaca o uso de estratégias sustentáveis para a descontaminação, como *biochar* e resinas naturais. Embora os GQDs apresentem uma solução eficiente, seu custo e o uso de tecnologias avançadas para produção são fatores que ainda precisam ser considerados para uma aplicação sustentável e economicamente viável. As adaptações de técnicas laboratoriais para uso em escala industrial também se alinham com as recomendações de Jain, Jain e Jain (2020), que sugerem a necessidade de alta eficiência para garantir a descontaminação completa de superfícies industriais.

5.4 IMPLICAÇÕES PARA A SAÚDE PÚBLICA E SEGURANÇA AMBIENTAL

Os resultados do estudo têm implicações significativas para a saúde pública e segurança ambiental, especialmente em cenários de emergência radiológica. A capacidade dos GQDs de remover rapidamente isótopos radioativos de superfícies contaminadas poderia ser crucial em situações como a detonação de bombas sujas. Além disso, sua aplicabilidade pode se estender ao

tratamento de resíduos radioativos e à purificação de água contaminada, como descrito por Wei, Tang e Wang (2020). A descontaminação eficaz permite uma reutilização mais rápida das áreas afetadas e minimiza os impactos ambientais e à saúde.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÃO

A descontaminação de superfícies e materiais contaminados por radionuclídeos é um dos maiores desafios da segurança radiológica em laboratórios de medicina nuclear e radiofarmácias. O tecnécio-99m, apesar de sua meia-vida curta de aproximadamente seis horas, pode aderir a superfícies metálicas e plásticas frequentemente utilizadas em laboratórios, dificultando sua remoção eficiente. Durante a manipulação de radiofármacos, pequenos derramamentos e respingos podem resultar na deposição do radionuclídeo em bancadas, equipamentos e vidrarias, aumentando o risco de exposição ocupacional e prolongando a presença de radioatividade nesses ambientes (FARDID; HAGHANI, 2024).

Diferentemente do iodo-131, que é eliminado pelo paciente e pode gerar contaminação secundária em ambientes hospitalares, o tecnécio-99m representa um problema primário em laboratórios, onde é amplamente utilizado em processos de marcação de radiofármacos. Ensaios experimentais demonstraram que, apesar da eficácia dos pontos quânticos de grafeno na remoção de radionuclídeos, a interação entre esses nanomateriais e o tecnécio-99m não foi tão eficiente quanto esperado, especialmente em superfícies plásticas (RAZAB et al., 2022). Isso pode estar relacionado à menor afinidade química entre os grupos funcionais presentes nos GQDs e as espécies químicas do tecnécio-99m em solução, indicando que ajustes nos métodos de funcionalização desses nanomateriais podem ser necessários para otimizar sua eficácia.

Os métodos tradicionais de descontaminação, como a aplicação de agentes quelantes à base de EDTA e detergentes especializados, apresentam limitações na remoção completa do tecnécio-99m, especialmente em superfícies rugosas ou porosas (GERAKI, 2024). Em comparação, os pontos quânticos de grafeno mostraram-se mais eficazes na remoção de iodo-131, sugerindo que sua estrutura e propriedades eletroquímicas favorecem a adsorção desse radionuclídeo em detrimento do tecnécio-99m. No entanto, pesquisas futuras devem explorar modificações estruturais nos GQDs para aumentar sua afinidade pelo tecnécio-99m e, assim, viabilizar sua aplicação em larga escala para descontaminação laboratorial (SUNAIWI, 2023).

O iodo-131, por sua vez, demonstrou uma interação significativamente maior com os pontos quânticos de grafeno, o que reforça seu potencial para descontaminação em ambientes hospitalares, especialmente em áreas onde pacientes tratados eliminam resíduos radioativos através da urina, saliva

e suor (SHUKRI, 2020). A eficiência dos GQDs na adsorção do iodo-131 abre caminho para sua aplicação na purificação de efluentes líquidos e na descontaminação de superfícies expostas ao radionuclídeo, reduzindo os riscos de exposição secundária e contaminação ambiental (GERAKI, 2024).

Este estudo contribui significativamente para a compreensão das aplicações de nanomateriais na descontaminação radiológica, oferecendo uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimento tecnológico. A partir dos resultados observados, fica evidente que a otimização dos pontos quânticos de grafeno para a remoção do tecnécio-99m em superfícies plásticas ainda necessita de ajustes, enquanto sua eficácia na remoção do iodo-131 representa um avanço promissor para aplicações em hospitais e ambientes clínicos. Pesquisas futuras devem focar na modificação química dos GQDs para melhorar sua interação com o tecnécio-99m, além de explorar a escalabilidade dessa tecnologia e avaliar seu impacto ambiental a longo prazo (FARDID; HAGHANI, 2024).

A descontaminação radiológica não se limita apenas aos ambientes hospitalares e laboratórios de medicina nuclear. Com o aumento das preocupações globais sobre segurança nuclear, a aplicação de tecnologias avançadas na mitigação de cenários de terrorismo radiológico tem se tornado uma área de grande interesse. Ataques envolvendo materiais radiológicos, como dispositivos de dispersão radiológica (RDD), conhecidos como "bombas sujas", podem resultar na contaminação de grandes áreas urbanas, exigindo métodos eficazes e rápidos de descontaminação (FARDID; HAGHANI, 2024). Os pontos quânticos de grafeno, que já demonstraram alta eficiência na adsorção de radionuclídeos como iodo-131, poderiam ser integrados em protocolos de resposta a emergências radiológicas, permitindo a remoção eficiente de resíduos radioativos de superfícies urbanas, equipamentos de proteção e vestimentas contaminadas (SUNAIWI, 2023). Além disso, a mobilidade e aplicabilidade desses nanomateriais possibilitariam seu uso em operações de descontaminação em larga escala, reduzindo o impacto ambiental e protegendo a população e as forças de resposta contra os efeitos da radiação (ROGERS et al., 2020). O desenvolvimento contínuo de tecnologias baseadas em nanomateriais pode, portanto, desempenhar um papel crucial na segurança pública e na resposta a eventos envolvendo terrorismo radiológico.

6.2 DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar dos resultados promissores, ainda há questões importantes que precisam ser exploradas em pesquisas futuras. A escalabilidade do processo de síntese, a análise de custo-benefício em larga

escala e os possíveis impactos ambientais da liberação dos GQDs em cenários reais de contaminação radiológica merecem atenção. É necessário investigar a eficácia dos GQDs em diferentes tipos de isótopos, superfícies e condições ambientais adversas para garantir que eles mantenham sua eficiência em situações práticas de grande relevância (YANG, ZHU E WANG, 2021). No atual cenário global, onde a ameaça de dispositivos de dispersão radiológica (bombas sujas) é uma preocupação crescente, a capacidade dos GQDs de proporcionar uma descontaminação rápida e eficaz torna-se particularmente relevante. A funcionalização dos GQDs para aumentar a afinidade por isótopos específicos, conforme discutido por Yoon e Kim (2020), pode amplificar sua eficácia, posicionando-os como uma ferramenta crucial em respostas a emergências radiológicas.

Um ponto que deve ser considerado em estudos futuros é a possibilidade de interação dos GQDs com outros contaminantes, além dos radioativos. Desenvolver uma abordagem multifuncional, onde os GQDs possam ser usados tanto na remoção de isótopos radioativos quanto na adsorção de poluentes orgânicos e metais pesados, aumentaria significativamente a utilidade desses nanomateriais em áreas afetadas por múltiplos agentes contaminantes (SANDHU; KUMAR, 2021). Essa característica interdisciplinar reforça a importância do estudo e amplia o horizonte de aplicações da nanotecnologia.

7 REFERÊNCIAS

ABOU EL-NOUR, Kholoud MM et al. Synthesis and applications of silver nanoparticles. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 3, n. 3, p. 135-140, 2010.

ADEKOYA, J. A. et al. Band structure, morphology, functionality, and size-dependent properties of metal nanoparticles. In: SEEHRA, M.; BRISTOW, AD (Eds). **Noble and Precious Metals—Properties, Nanoscale Effects and Applications**. p. 15-42, 2018.

AGRONOMY. Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. **Agronomy**, v. 9, n. 6, p. 298, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>. Acesso em: 20 jun. 2024.

AJINKYA, K.; PRAKASH, K.; VISHAL, P. Scaffold based drug delivery system: A special emphasis on nanosponges. **International Journal of Pharmaceutics and Drug Analysis**, v. 3, n. 4, p. 98-104, 2015.

AKBARZADEH, A. et al. An overview application of silver nanoparticles in inhibition of herpes simplex virus. **Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology**, v. 46, n. 2, p. 263-267, 2018.

ALENCAR, M. S. M. et al. A pesquisa brasileira dedicada à nanotecnologia e riscos à saúde e ao meio ambiente. **Revista Eletrônica de Comunicação, Informação e Inovação em Saúde**. Inf. Inov. Saúde. 2015.

ALEXIS, F. et al. Factors affecting the clearance and biodistribution of polymeric nanoparticles. **Molecular Pharmaceutics**, v. 5, n. 4, p. 505-515, 2008.

ALKHOURI, N.; ZEIN, N. Protease inhibitors: silver bullets for chronic hepatitis C infection. **Cleveland Clinic Journal of Medicine**, v. 79, n. 3, p. 213-222, 2012.

ALMEIDA, P. R.; SOUZA, T. M.; FERREIRA, L. C. Contaminação ambiental por radionuclídeos utilizados na medicina nuclear: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Radioproteção e Dosimetria**, v. 5, n. 1, p. 45-58, 2019.

ALTAMMAR, Khadijah A. A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. **Frontiers in microbiology**, v. 14, p. 1155622, 2023.

AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R. **Biologia moderna**. São Paulo: Editora Moderna, 2016.

AMARAL, A. F. C.; FREITAS, G. M. D. A. R.; VAZ, C. D. **Resumos do III Congresso Digital de Nanobiotecnologia e Bioengenharia**. 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1153510/1/Doc382-4-05.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.

ANNAN, Kofi. Uma estratégia mundial de combate ao terrorismo. 2006.

ANNUAL Report 2023. **Graphene Flagship**, 2023. Disponível em: <https://graphene-flagship.eu>. Acesso em: 20 jun. 2024.

APPLICATION of Graphene Quantum Dots in Radiological Contamination Monitoring. **Advanced Materials**, v. 31, n. 30, p. 1906262, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adma.201906262>. Acesso em: 20 jun. 2024.

ARIAS, E. El futuro del terrorismo nuclear en la táctica de los actores individuales. **Revista del Instituto Español de Estudios Estratégicos**, n. 12, p. 49-76, 2018.

AROSIO, T. et al. Alpine Holocene tree-ring dataset: age-related trends in the stable isotopes of cellulose show species-specific patterns. **Biogeosciences**, v. 17, p. 4871-4882, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-17-4871-2020>. Acesso em: 20 jun. 2024.

ASTUTI, I. et al. Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2): An overview of viral structure and host response. **Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews**, 2020.

ASSUNÇÃO, J. A. **Avaliação imunológica dos indivíduos expostos à radiação ionizante do ¹³⁷Cs, no acidente radioativo de Goiânia (Brasil)**. 2006. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2006. Disponível em: <https://tede2.pucgoias.edu.br/handle/tede/3039>. Acesso em: 28 set. 2024.

BAIRY, B.; MAITY, S.; BASKEY, M. Biogenic synthesis of reduced graphene oxide and investigation of adsorption isotherm, kinetics, thermodynamics parameters for water pollution remediation. **Springer**, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00216-024-0150-0>. Acesso em: 20 jun. 2024.

BANACH, M.; PULIT-PROCIAK, J. Synthesis, characteristics, and biocidal activity of silver nanoparticles. In: **Fabrication and Self-Assembly of Nanobiomaterials**. William Andrew Publishing, p. 367-399, 2016.

BANGER et al. Synthetic Methods and Applications of Carbon Nanodots. **Catalysts**, v. 13, n. 5, p. 858, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/catal13050858>. Acesso em: 21 set. 2024.

BANIK, B. L.; FATTAHI, P.; BROWN, J. L. Polymeric nanoparticles: the future of nanomedicine. **WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology**, v. 8, p. 271-299, 2016.

BANSZERUS, L. Graphene Study 2023. **Graphene Flagship**, 2023. Disponível em: <https://graphene-flagship.eu>. Acesso em: 20 jun. 2024.

BARBOSA, V. T. et al. Biogenic synthesis of silver nanoparticles using Brazilian propolis. **Biotechnology Progress**, v. 35, n. 6, p. e2888, 2019.

BARRINGTON, S. F. et al. Radiation dose rates from patients receiving iodine-131 therapy for carcinoma of the thyroid. **European Journal of Nuclear Medicine**, v. 23, n. 2, p. 123–130, 1996.

BASSET, D. R. Nanoscience and nanotechnology: An overview. Washington, **University of Washington**, 2006.

BASSO, Al. et al. Development of smart nanomaterials for electrochemical sensing of environmental pollutants. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 150, p. 111924, 2020.

BATISTA, G. L. **Utilização de nanopartículas de poli (ácido láctico-co-glicólico) e de prata na neutralização de SARS-CoV-2: revisão.** 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40376>. Acesso em: 17 maio 2024.

BAZZICALUPO, L. et al. Synthesis of multifunctionalized 2D nanosheets for environmental applications. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 8, p. 774-785, 2020.

BEAUVAIS, A. et al. Impact of surfactants on the stability and performance of TiO₂ nanoparticles in sunscreen formulations. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 188, p. 110797, 2020.

BERTÉ, R. Síntese e caracterização de nanopartículas de prata conjugadas com peptídeos antimicrobianos. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada) – **Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo**, 2013.

BEZAWADA, S. et al. Nanosponges: A Concise Review For Emerging Trends, **International Journal of Pharmaceutical Research and Biomedical Analysis**, 2014.

BHATTACHARYAY, S.; HATI, S. Impact of Thiol-Disulfide Balance on the Binding of Covid-19 Spike Protein with Angiotensin Converting Enzyme 2 Receptor. **BioRxiv**, 2020.

BHOWMIK, H. et al. Nanosponges: A review. **International Journal of Applied Pharmaceutics**, v. 10, p. 0975-7058, 2018.

BOGGILD, P. Nanomanipulation and Synthesis of 2D Materials. DTU Technical **University of Denmark**, 2021.

BOHIGAS, X. "Una Ojeada ao terrorismo nuclear". **Revista Mientras Tanto**, n.º 120, Barcelona, 2013, p. 35.

BOLSHOV, L.; ARUTYUNYAN, R.; PAVLOVSKY, O. Radiological terrorism. In: Workshop on terrorism in a high-tech society and modern methods for prevention and response, 2001, Moscow, Russia. **High-impact terrorism: proceedings of a Russian-American workshop**. Washington, D.C.: National Academy Press, 2002. p. 135-148.

BOUVILLE, A. Fallout from nuclear weapons tests: environmental, health, political, and sociological considerations. **Health Physics**, v. 118, p. 360–381, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001237>.

BRUN, N. R. et al. Comparative effects of zinc oxide nanoparticles and dissolved zinc on zebrafish embryos and eleuthero-embryos: Importance of zinc ions. **Science of the Total Environment**, v. 476, p. 657-666, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1016/j.scitotenv.2015.10.137>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CADIOLI, L. P.; SALLA, L. D. Nanotecnologia: um estudo sobre seu histórico, definição e principais aplicações desta inovadora tecnologia. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 1, n. 1, p. 98-105, 2006.

Cai, J., et al. Atomically Precise Bottom-Up Fabrication of Graphene Nanoribbons. **Nature**, n. 466, v. 7305, p. 470-473, 2010.

CANEVAROLO JR, S. V. Ciência dos Polímeros 2ª Edição. **Editora Artliber**, 2006.

CAO, T.; ELIMELECH, M. Colloidal stability of cellulose nanocrystals in aqueous solutions containing monovalent, divalent, and trivalent inorganic salts. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 584, p. 456-463, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.10.087>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CARDELLINI, A. et al. Multi-scale approach for modeling stability, aggregation, and network formation of nanoparticles suspended in aqueous solutions. **Nanoscale**, v. 11, n. 9, p. 3979-3992, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C8NR10136F>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CARDIS, E. et al. Risk of Thyroid Cancer After Exposure to ¹³¹I in Childhood. **JNCI: Journal of the National Cancer Institute**, v. 97, n. 10, p. 724-732, 2005.

CERT.br. **Computer Emergency Response Team Brazil - Estatísticas de Incidentes de Segurança**. NIC.br, 2024. Disponível em: <https://www.cert.br/en/>. Acesso em: 23 set. 2024.

CHAMPION, J. A.; KATARE, Y. K.; MITRAGOTRI, S. Particle shape: a new design parameter for micro-and nanoscale drug delivery carriers. **Journal of controlled release**, v. 121, n. 1-2, p. 3-9, 2007.

CHAN, Y. H. et al. Hydrogen sulfide (H₂S) conversion to hydrogen (H₂) and value-added chemicals: Progress, challenges and outlook. **Chemical Engineering Journal**, v. 458, p. 141398, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141398>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CHARELLI, L. E. et al. Polymeric nanoparticles as therapeutic agents against coronavirus disease. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 24, n. 1, p. 12, 2022. DOI: 10.1007/s11051-022-05396-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11051-022-05396-5>. Acesso em: 26 set. 2024.

CHEN, Y. et al. Zinc phosphate coated modified hollow glass beads and their thermal insulation and anticorrosion performance in coatings. **Ceramics International**, v. 47, n. 16, p. 23507-23517, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.084>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CHOWDHURY, I. et al. Sunlight affects aggregation and deposition of graphene oxide in the aquatic environment. **Water Research**, v. 78, p. 37-46, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.024>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CHRISTIAN, P. et al. Nanoparticles: structure, properties, preparation and behaviour in environmental media. **Ecotoxicology**, v. 17, p. 326-343, 2008.

COLETTI, C. Synthesis of Highly-Crystalline 2D Materials via Chemical Vapour Deposition. **Istituto Italiano di Tecnologia (IIT)**, 2023. Disponível em: <https://graphene.iit.it>. Acesso em: 20 jun. 2024.

COMMITTEE ON FOREIGN RELATIONS, UNITED STATES SENATE. **Dirty Bombs and Basement Nukes: The Terrorist Nuclear Threat**. Washington, D.C.: U.S. Government Publishing Office, 2020.

CONSELHO DE SEGURANÇA DAS NAÇÕES UNIDAS. Resolução 1540 (2004), de 28 de abril de 2004. Disponível em: <https://disarmament.unoda.org/wmd/sc1540/>. Acesso em: 26 set. 2024.

CORDESMAN, A. H. (Org.). **Terrorism, asymmetric warfare, and weapons of mass destruction**. Westport, C.T.: Praeger Publishers, 2002.

COSTA, R. B.; MENDES, F. C.; OLIVEIRA, J. S. Nanotecnologia aplicada à descontaminação de resíduos radioativos na medicina nuclear. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 214, p. 112-124, 2022.

DAI, M.-N. et al. In situ Analysis of Mg Isotopic Compositions of Basalt Glasses by Femtosecond Laser Ablation Multi-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. **Chinese Journal of Analytical Chemistry**, v. 44, p. 173-178, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chja.2016.03.001>. Acesso em: 20 jun. 2024.

DE FREITAS, L. M. et al. Polymeric nanoparticle-based photodynamic therapy for chronic periodontitis in vivo. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 17, n. 5, p. 769, 2016.

DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY. **Department of Homeland Security Strategic Framework for Countering Terrorism and Targeted Violence**. Washington, D.C.: DHS, 2020.

DEPUTY ASSISTANT SECRETARY OF DEFENSE FOR NUCLEAR MATTERS (DASD(NM)). **The Nuclear Matters Handbook 2020** [Revised]. Washington, D.C.: Department of Defense, 2020.

DOMINGUEZ, B. C. **Polímeros de fontes renováveis e suas aplicações**. 2021. Disponível em: <http://precog.com.br/bc-texto/obras/2021pack0831.pdf>. Acesso em: 17 maio 2024.

DUARTE, C. L. **Estudo das medidas terapêuticas para redução da contaminação interna por radionuclídeos**. 1992. 182 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Saúde) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1992. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Celina%20Lopes%20Duarte M.pdf>. Acesso em: 28 set. 2024.

DUMITRU, A. C. et al. In situ nanomechanical characterization of the early stages of swelling and degradation of a biodegradable polymer. **Nanoscale**, v. 7, n. 12, p. 5403-5410, 2015.

DURÁN, N. et al. Nanotoxicologia de nanopartículas de prata: Toxicidade em animais e humanos. **Química Nova**, v. 42, n. 2, p. 206-213, 2019.

DURÁN, N.; MATTOSO, L. H. C.; MORAIS, P. C. Nanotecnologia: introdução, preparação e caracterização de nanomateriais e exemplos de aplicação. São Paulo: **Artliber**, 2006.

DWYER, J. J. et al. Design of helical, oligomeric HIV-1 fusion inhibitor peptides with potent activity against enfuvirtide-resistant virus. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 31, p. 12772-12777, 2007.

ELECHIGUERRA, J. L. et al. Interaction of silver nanoparticles with HIV-1. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 3, n. 1, p. 1-10, 2005.

ERBETTA, C. D. C. et al. Synthesis and characterization of poly (D,L-lactide-co-glycolide) copolymer. **Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology**, v. 3, p. 208-225, 2012.

ESSA, S.; RABANEL, J. M.; HILDGEN, P. Effect of polyethylene glycol (PEG) chain organization on the physicochemical properties of poly(D, L-lactide) (PLA) based nanoparticles. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, v. 75, p. 96-106, 2010.

FABREGA, J. et al. Silver nanoparticles: behaviour and effects in the aquatic environment. **Environment International**, v. 37, n. 2, p. 517-531, 2011.

FARDID, R.; HAGHANI, M. Waste produced per patient by radiopharmaceutical sources and measuring the radioactive contamination of surfaces and staff at the Bushehr nuclear medicine. **Journal of Biomedical Physics and Engineering**, v. 14, n. 3, p. 245-263, 2024.

FARKAS, Julia et al. Characterization of the effluent from a nanosilver producing washing machine. **Environment International**, v. 37, n. 6, p. 1057-1062, 2011.

FAYAZ, A. Mohammed et al. Inactivation of microbial infectiousness by silver nanoparticles-coated condom: a new approach to inhibit HIV-and HSV-transmitted infection. **International Journal of Nanomedicine**, v. 7, p. 5007, 2012.

FERNÁNDEZ, A. et al. Preservation of aseptic conditions in absorbent pads by using silver nanotechnology. **Food Research International**, v. 42, n. 8, p. 1105-1112, 2009.

FERREIRA, M. A.; LIMA, C. J.; OLIVEIRA, T. A. Características e aplicações do tecnécio-99m na medicina nuclear. **Revista de Pesquisa em Saúde e Tecnologia**, v. 9, n. 2, p. 78-92, 2022.

FIGUEIREDO, D. B. de. **Desenvolvimento e produção de uma nova vacina pneumocócica de nanopartículas formulada para administração em pó por via pulmonar**. 2019. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Biotecnologia, Universidade of São Paulo, São Paulo, 2019. doi:10.11606/T.87.2019.tde-05012021-132118. Acesso em: 17 maio 2024.

FLORINDO, H. F. et al. Immune-mediated approaches against COVID-19. **Nature Nanotechnology**, p. 1-16, 2020.

FORMULATION FORUM. **PLGA – A Versatile Copolymer for Design & Development of Nanoparticles for Drug Delivery**. Drug Development & Delivery, 2023. Disponível em:

<https://drug-dev.com/formulation-forum-plga-a-versatile-copolymer-for-design-development-of-nanoparticles-for-drug-delivery/>. Acesso em: 26 set. 2024.

FRANCI, G. et al. Silver nanoparticles as potential antibacterial agents. **Molecules**, v. 20, n. 5, p. 8856-8874, 2015.

FRIEDMAN, T. L. **O Mundo é plano: uma breve história do século XXI**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2005.

FULCO, Patricia Pecora; MCNICHOLL, Ian R. Etravirine and rilpivirine: nonnucleoside reverse transcriptase inhibitors with activity against human immunodeficiency virus type 1 strains resistant to previous nonnucleoside agents. *Pharmacotherapy: The Journal of Human Pharmacology and Drug Therapy*, v. 29, n. 3, p. 281-294, 2009.

GAJBHIYE, S.; SAKHARWADE, S. Silver nanoparticles in cosmetics. **Journal of Cosmetics, Dermatological Sciences and Applications**, v. 6, n. 1, p. 48-53, 2016.

GALEOTTI, P.; BERTELE, F.. Safety and efficacy of silver nanoparticles in antimicrobial treatments: a systematic review. **International Journal of Nanomedicine**, v. 14, p. 3375-3390, 2019.

GAO, W.; SINGH, A. K. Graphene Quantum Dots: Synthesis, Properties, and Applications. **Springer**, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-57537-8>. Acesso em: 20 jun. 2024.

GALIOTIS, C.. Graphene: revolutionising composite applications. **Graphene and 2D Materials**, 16 maio 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/2731>. Acesso em: 20 jun. 2024.

GALIOTIS, C. Graphene: Revolutionising Composite Applications. **Springer**, 2020.

GARRIDO, Vi. "Terrorismo nuclear: desafio à segurança?". **Política Exterior**, n.º 148, jul./ago., Madri, 2012, p. 3-5.

GARRIGA, D. "El lobo solitario". **Criminologia e Criminalística**, 01/2014. Disponível em: <http://criminologiaycriminalisticafb.blogspot.com.es/2014/01/el-lobo-solitario.html>. Acesso em: 28 fev. 2024.

GERAKI, D. Clinical use of iodine-131 in the treatment of thyroid gland disorders and radiation protection applications. **Nuclear Medicine Review**, v. 28, n. 1, p. 15-28, 2024.

GEREMIAS, T. C. **Desenvolvimento e caracterização de membranas de nanofibras de PLGA associadas a antibiofilme**. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/188478>. Acesso em: 17 maio 2024.

GHERASIM, O. et al. An updated review on silver nanoparticles in biomedicine. **Nanomaterials**, v. 10, n. 11, p. 2318, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano10112318>. Acesso em: 26 set. 2024.

GILARDI, G. et al. **Cyclodextrin nanosponges as a carrier for biocatalysts, and in the delivery and release of enzymes, proteins, vaccines and antibodies.** 2009.

GRAPHENE Quantum Dots as Efficient Adsorbents for the Removal of Radioactive Pollutants. **Journal of Environmental Management**, v. 260, p. 109877, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.109877>. Acesso em: 20 jun. 2024.

GRAPHENE Quantum Dots as Nanocarriers for Radioactive Waste Management. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 22, n. 3, p. 89, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11051-020-04940-3>. Acesso em: 20 jun. 2024.

GRAPHENE Quantum Dots for Radiological Decontamination: A Review. **Environmental Science & Technology**, v. 56, n. 12, p. 7400-7411, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08424>. Acesso em: 20 jun. 2024.

GRAPHENE research, innovation and collaboration. **Graphene Flagship**, 2023. Disponível em: <https://graphene-flagship.eu>. Acesso em: 20 jun. 2024.

GREULICH, C. et al. Uptake and intracellular distribution of silver nanoparticles in human mesenchymal stem cells. **Acta Biomaterialia**, v. 7, n. 1, p. 347-354, 2011.

GU, B.; WANG, Y.; BURGESS, D. J. In vitro and in vivo performance of dexamethasone loaded PLGA microspheres prepared using polymer blends. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 496, n. 2, p. 534-540, 2015.

GURUNATHAN, S. et al. Antiviral Potential of Nanoparticles—Can Nanoparticles Fight Against Coronaviruses?. **Nanomaterials**, v. 10, n. 9, p. 1645, 2020.

GUTERRES, S. S.; ALVES, M. P.; POHLMANN, A. R. Polymeric nanoparticles, nanospheres and nanocapsules, for cutaneous applications. **Drug Target Insights**, v. 2, p. 117739280700200002, 2007.

HAIPOUR, M. J. et al. Antibacterial properties of nanoparticles. Trends in **Biotechnology**, v. 30, n. 10, p. 499-511, 2012.

HE, Y.; CAO, X.; BAO, H. Ideas and perspectives: The same carbon behaves like different elements – an insight into position-specific isotope distributions. **Biogeosciences**, v. 17, p. 4785-4795, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-17-4785-2020>. Acesso em: 20 jun. 2024.

HOGAN, M. C. Respiration. Encyclopedia of Earth. Eds. Mark McGinley and C. J. Cleveland. **National Council for Science and the Environment**. Washington, D.C, 2011.

HOSSAIN, Md. Saiful Islam; ISLAM, Md. Shafiqul. Review on recent advances in the removal of heavy metals from contaminated water using low-cost adsorbents. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 15, p. 100420, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100420>. Acesso em: 20 jun. 2024.

HOWITT, A. M.; PANGI, Robyn L. **Countering terrorism: dimensions of preparedness**. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2003.

HUTTER, T.; ELLIOTT, S. R.; MAHAJAN, S. Interaction of metallic nanoparticles with dielectric substrates: effect of optical constants. **Nanotechnology**, v. 24, n. 3, p. 035201, 2012.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Combating Illicit Trafficking in Nuclear and Other Radioactive Material**. Viena: International Atomic Energy Agency, 2008.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014.

INTERNATIONAL COMMITTEE ON TAXONOMY OF VIRUSES (ICTV). Disponível em: <https://ictv.global/taxonomy/>. Acesso em: 17 set. 2020.

IRJHIS. Characterization Techniques for Nanomaterials. **International Research Journal of Humanities and Interdisciplinary Studies**, 2024.

JAIN, A.; JAIN, R.; JAIN, S. Sterilization of Glassware; Preparation and Sterilization of Media. In: **Basic Techniques in Biochemistry, Microbiology and Molecular Biology**. Springer Protocols Handbooks. Humana, New York, NY, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9861-6_28. Acesso em: 20 jun. 2024.

JEREMIAH, S. S. et al. Potent antiviral effect of silver nanoparticles on SARS-CoV-2. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, 2020.

JIA, M. et al. Evaluation of the Genotoxic and Oxidative Damage Potential of Silver Nanoparticles in Human NCM460 and HCT116 Cells. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 5, p. 1618, 2020.

JOHNSON, B. C. et al. A comparison of the ability of rilpivirine (TMC278) and selected analogues to inhibit clinically relevant HIV-1 reverse transcriptase mutants. **Retrovirology**, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2012.

JOHNSON, C.; NANDINI, G.; BALIVADA, S. K. Radioactive waste management in a medical cyclotron facility: A review. **International Journal of Health Technology**, v. 9, n. 3, p. 112-130, 2022.

JOSHI, M.; BUTOLA, B. S. Application technologies for coating, lamination and finishing of technical textiles. In: **Advances in the Dyeing and Finishing of Technical Textiles**. Woodhead Publishing, 2013. p. 355-411.

KAHN, J. S.; MCINTOSH, K. History and recent advances in coronavirus discovery. **The Pediatric Infectious Disease Journal**, v. 24, n. 11, p. S223-S227, 2005.

KHALID, M.; EL-SAWY, H. S. Polymeric nanoparticles: promising platform for drug delivery. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 528, n. 1-2, p. 675-691, 2017.

KHAN, I. et al. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 12, n. 7, p. 908-931, 2019.

KIRBY, B. J.; HASSELBRINK JR, E. F. Zeta potential of microfluidic substrates: 1. Theory, experimental techniques, and effects on separations. *Electrophoresis*, v. 25, n. 2, p. 187-202, 2004.

KNOOPS, K. et al. SARS-coronavirus replication is supported by a reticulovesicular network of modified endoplasmic reticulum. *PLoS Biol*, v. 6, n. 9, p. e226, 2008.

KOLATE, A. et al. Polymer assisted entrapment of netilmicin in PLGA nanoparticles for sustained antibacterial activity. *Journal of Microencapsulation*, v. 32, n. 1, p. 61-74, 2015.

KUILA, T. et al. Chemical functionalization of graphene and its applications. *Progress in Materials Science*, v. 57, p.1061-1105, 2012.

KUMARI, A.; YADAV, S. K.; YADAV, S. C. Biodegradable polymeric nanoparticles based drug delivery systems. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, v. 75, n. 1, p. 1-18, 2010.

KURKOV, S. V.; LOFTSSON, T. Cyclodextrins. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 453, n. 1, p. 167-180, 2013.

LANE, D. **Introduction to statistics**. David Lane: Rice University. 2003.

LARA, H. H. et al. Mode of antiviral action of silver nanoparticles against HIV-1. *Journal of Nanobiotechnology*, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2010.

LARA, H. H. et al. Silver nanoparticles are broad-spectrum bactericidal and virucidal compounds. *Journal of Nanobiotechnology*, v. 9, n. 1, p. 30, 2011.

LEE, A. et al. Multi-year study of environmental stability of $Ti_3C_2T_x$ MXene films. *Graphene and 2D Materials*, 27 abr. 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/2731>. Acesso em: 20 jun. 2024.

LETKO, M. et al. Functional assessment of cell entry and receptor usage for SARS-CoV-2 and other lineage B betacoronaviruses. *Nature Microbiology*, v. 5, n. 4, p. 562-569, 2020.

LI, W. et al. Co-delivery of HIV-1 entry inhibitor and nonnucleoside reverse transcriptase inhibitor shuttled by nanoparticles: cocktail therapeutic strategy for antiviral therapy. *Aids*, v. 30, n. 6, p. 827-838, 2016.

LI, X. et al. Recent advances in the application of nanomaterials for decontamination of heavy metals and organic pollutants from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, n. 5, p. 104223, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104223>. Acesso em: 20 jun. 2024.

LI, Y.; THAMBI, Thavasyappan; LEE, Doo Sung. Co-delivery of drugs and genes using polymeric nanoparticles for synergistic cancer therapeutic effects. *Advanced Healthcare Materials*, v. 7, n. 1, p. 1700886, 2018.

LI, Y.; ZHAO, X.; TAN, W. Photoluminescent Graphene Quantum Dots for Bioimaging and Biosensing. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 148, p. 111835, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111835>. Acesso em: 20 jun. 2024.

LIMA, R. de. O suicídio-espetáculo na sociedade do espetáculo. **Revista Espaço Acadêmico**, Maringá, n. 44, jan. 2005.

LIU, J.; BAO, S.; WANG, X. Applications of graphene-based materials in sensors: A review. **Micromachines**, v. 13, n. 2, p. 184, 2022.

LOK, Chun-Nam et al. Silver nanoparticles: partial oxidation and antibacterial activities. **JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry**, v. 12, n. 4, p. 527-534, 2007.

LOPES, A. G.; TAUHATA, L.; BERTELLI, L. **Protocolo para trato de pessoas que sofreram ferimentos com material radioativo em acidentes radiológicos e nucleares**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado em Radioproteção) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: http://moodle.ird.gov.br/ensino/images/DissertacoesMestrado/DissertacoesMestrado2015/dissertao_amanda%20gomes%20lopes.pdf. Acesso em: 28 set. 2024.

LOURO, M. H. D. L. G. **Nanomateriais manufaturados: avaliação de segurança através da caracterização dos seus efeitos genéticos**. 2013.

LU, L. et al. Silver nanoparticles inhibit hepatitis B virus replication. **Antiviral Therapy**, v. 13, n. 2, p. 253, 2008.

LUGANI, Y. et al. Nanotechnology: Current Applications and Future Prospects. **World Journal of Advance Healthcare Research**, v. 2, n. 5, p. 137-139, 2018.

MACIEL, A. P.; LONGO, E.; LEITE, E. R. Dióxido de estanho nanoestruturado: síntese e crescimento de nanocristais e nanofitas. **Química Nova**, v. 26, n. 6, p. 855-862, 2003.

MADIGAN, M. T. et al. Microbiologia de Brock-14ª Edição. **Artmed Editora**, 2016.

MAHAR, R. et al. Application of PLGA as a biodegradable and biocompatible polymer for pulmonary delivery of drugs. **Aaps Pharmscitech**, v. 24, n. 1, p. 39, 2023.

MAINARDES, Rubiana Mara; GREMIÃO, Maria Palmira Daflon; EVANGELISTA, Raul Cesar. Thermoanalytical study of praziquantel-loaded PLGA nanoparticles. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 42, p. 523-530, 2006.

MANSHA, M. et al. Nanomaterial-based probes for iodide sensing: synthesis strategies, applications, challenges, and solutions. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 12, p. 4919-4947, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D3TC04611G>. Acesso em: 20 jun. 2024.

MANSOT, J. L. et al. Nanolubrication. **Brazilian Journal of Physics**, v. 39, n. 1A, p. 186-197, 2009.

MARCONE, G. P. S. et al. **Avaliação da ecotoxicidade de nanopartículas de dióxido de titânio e prata**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Instituto de Química. 2011.

MARSCHNER, H. Marschner's mineral nutrition of higher plants. **Academic Press**, 2011. Disponível em: <https://www.elsevier.com/books/marschners-mineral-nutrition-of-higher-plants/marschner/978-0-12-384905-2>. Acesso em: 20 jun. 2024.

MARQUES, F. L. N.; OKAMOTO, M. R. Y.; BUCHPIGUEL, C. A. Alguns aspectos sobre geradores e radiofármacos de tecnécio-99m e seus controles de qualidade. **Radiologia Brasileira**, v. 34, p. 233–239, 2001.

MARQUES, P. Considerações sobre a segurança atual das instalações nucleares. **Revista Uniandrade**, Curitiba, v. 2, n. 3, jul./dez. 2001.

MARTIN C. C. **Terrorismo Nuclear**. Madri: CESEDEN, n.º 16, 2007, p. 16.

MAVROMATIS, V. et al. Magnesium isotopes in permafrost-dominated Central Siberian larch forest watersheds. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 147, p. 76-89, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.10.007>. Acesso em: 20 jun. 2024.

MCCORKLE, E. M. et al. Tracing the source of soil organic matter eroded from temperate forest catchments using carbon and nitrogen isotopes. **Chemical Geology**, v. 44, p. 172-184, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.012>. Acesso em: 20 jun. 2024.

MELLO, J. P. et al. Graphene oxide membranes for efficient desalination and heavy metal decontamination: a review. **Desalination**, v. 479, p. 114328, 2020.

MENDES, A. F.; COSTA, V. M.; RIBEIRO, P. S. Estratégias de descontaminação de radionuclídeos em hospitais e laboratórios. **International Journal of Nuclear Medicine Research**, v. 17, n. 3, p. 56-72, 2023.

MOHAMMADI, B.; ASHKARRAN, A. A.. **Graphene and 2D Materials**. Springer, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/2731>. Acesso em: 20 jun. 2024.

MOLLE, A.. **Synthesis and Applications of Graphene and Related Materials**. Elsevier, 2022.

MOINARD-CHÉCOT, D. et al. Mechanism of nanocapsules formation by the emulsion–diffusion process. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 317, n. 2, p. 458-468, 2008.

MORGRIDGE INSTITUTE OF RESEARCH. **Viral Structure**. 2020. Disponível em: <https://morgridge.org/outreach/teaching-resources/virology-immunology/virus-structure/>.

MOTTA, A. C.; DUEK, E. A. R. Síntese, caracterização e degradação" in vitro" do poli (L-ácido láctico-co-ácido glicólico). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 11, p. 340-350, 2006.

MOUDRIKOUDIS, S.; PALLARES, R. M.; THANH, N. T. K. Characterization techniques for nanoparticles: comparison and complementarity upon studying nanoparticle properties. **Nanoscale**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C8NR02278J>.

NAHIDI, S. et al. Biocompatibility of engineered nanoparticles for drug delivery. **Journal of Controlled Release**, v. 166, n. 2, p. 182-194, 2013.

NAIR, P. M. G.; CHUNG, I. M. Assessment of silver nanoparticle-induced physiological and molecular changes in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, n. 14, p. 8858-8869, 2014.

NANDA, S. et al. Chapter 3: Nanocosmetics: performance enhancement and safety assurance. In: Alexandru Mihai Grumezescu (ed.), **Nanobiomaterials in Galenic Formulations and Cosmetics**, p.47-67, 2016.

NAVARRO, E. et al. Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi. **Ecotoxicology**, v. 17, n. 5, p. 372-386, 2008.

NETESOV, S. V. Molecular epidemiology as a new approach in detecting terrorist use of infectious agents. In: WORKSHOP ON TERRORISM IN A HIGH-TECH SOCIETY AND MODERN METHODS FOR PREVENTION AND RESPONSE, 2001, Moscow, Russia. High-impact terrorism: proceedings of a Russian-American workshop. Washington, D.C.: **National Academy Press**, 2002. p. 87-101.

NIETO-TORRES, J. L. et al. Subcellular location and topology of severe acute respiratory syndrome coronavirus envelope protein. **Virology**, v. 415, n. 2, p. 69-82, 2011.

NOGUEIRA, P. F. M.; PAINO, I. M. M.; ZUCOLOTTO, Valtencir. Nanosilver: Propriedades, aplicações e impactos na saúde pública e meio ambiente. **Vigilância Sanitária em Debate: Sociedade, Ciência & Tecnologia**, v. 1, n. 4, p. 59-71, 2013.

NOVA, C. V. **Síntese, caracterização e avaliação antimicrobiana de nanopartículas de ZrO₂ e ZrO₂: Ag por Método Hidrotermal**. 2016.

NOVEL Graphene Quantum Dots for High-Efficiency Removal of Cesium Ions from Aqueous Solutions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 524, p. 86-93, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.04.062>. Acesso em: 20 jun. 2024.

OESER, M. et al. High-Precision Fe and Mg Isotope Ratios of Silicate Reference Glasses Determined In Situ by Femtosecond LA-MC-ICP-MS and by Solution Nebulisation MC-ICP-MS. **Geostandards and Geoanalytical Research**, v. 38, p. 311-328, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2013.00237.x>. Acesso em: 20 jun. 2024.

OESER, R. A.; VON BLANCKENBURG, F. Do degree and rate of silicate weathering depend on plant productivity? **Biogeosciences**, v. 17, p. 4883-4917, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-17-4883-2020>. Acesso em: 20 jun. 2024.

- OFAER, A. D.; GOODMAN, Seymour E. **The transnational dimension of cyber crime and terrorism**. Stanford, CA.: Hoover Institution Press, 2001. 292 p.
- OHTSURU, A. et al. Nuclear disasters and health: lessons learned, challenges, and proposals. *The Lancet*, v. 386, p. 489–497, 2015. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60994-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60994-1).
- OLIVEIRA, A. L. M. et al. **Nanossegurança na Prática**. 2018. Disponível em: <http://www.redemtnanoagro.com.br/wp-content/uploads/2018/08/livro-nanosseguranca-2017.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.
- OLIVEIRA, H. S.; MARTINS, D. R.; SILVA, A. P. Uso do iodo-131 no tratamento de doenças tireoidianas: uma revisão sistemática. **Revista Brasileira de Endocrinologia Clínica**, v. 14, n. 4, p. 102-118, 2020.
- OLIVEIRA, F. M. **Estudo da utilização do óxido de grafeno e do óxido de grafeno imobilizado em matriz de poli (divinilbenzeno) visando o tratamento de rejeito radioativo líquido**. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-25032019-104214/publico/2018OliveiraEstudoRevisado.pdf>. Acesso em: 28 set. 2024.
- OLIVEIRA, R. S. et al. Radiofármacos, Radiofarmácia e Medicina Nuclear. INCA, 2009. Disponível em: <https://ninho.inca.gov.br/jspui/bitstream/123456789/8599/1/Radiof%C3%A1rmacos%2C%20Radiofarm%C3%A1cia%2e%20Medicina%20Nuclear.pdf>. Acesso em 28 set 2024.
- OPFERGELT, S. et al. Quantifying nutrient uptake as driver of rock weathering in forest ecosystems by magnesium stable isotopes. **Biogeosciences**, v. 17, p. 4785-4795, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-17-4785-2020>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- PANDA, S. et al. Nanosponges: A novel carrier for targeted drug delivery. **Int J PharmTech Res**, v. 8, n. 7, p. 213-24, 2015.
- PATIL, D. R. Application of Nanotechnology in Covid-19. **Aayushi International Interdisciplinary Research Journal (AIIRJ)**, 2020.
- PATIL, T. S. et al. Nanosponges: A Novel Targeted Drug delivery for cancer treatment. **International Journal for Advance Research and Development**, v. 2, n. 4, 2017.
- PELGRIFT, R. Y.; FRIEDMAN, A. J. Nanotechnology as a therapeutic tool to combat microbial resistance. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 65, n. 13-14, p. 1803-1815, 2013.
- PILLAR, P. R. Os instrumentos do contraterrorismo. **Agenda da política externa dos EUA**, Washington, D.C., v. 6, n. 3, nov. 2001.
- PINHEIRO, A. de S. O Combate ao terrorismo: o antiterrorismo e o contraterrorismo. **Defesa@Net**, 22 mar. 2004.

- PONTES, M. R. D. **Terrorismo: características, tipologias e presença nas relações internacionais**. 1999. Dissertação (Mestrado em Relações Internacionais) – Universidade de Brasília, Brasília, 1999.
- POST, J. M. et al. The psychology of suicide terrorism. **Psychiatry**, v. 72, n. 1, p. 13-31, 2009.
- RADSAR, T.; KHALESİ, H.; GHODS, V. Graphene properties and applications in nanoelectronic. **Optical and Quantum Electronics**, v. 53, n. 4, p. 178, 2021.
- RAMOS JR, A. da C. O terrorismo e a ameaça nuclear. 2003. **Monografia (Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia–CAEPE)-Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro**, 2003.
- RAMOS, M. A. D. S. et al. Nanotechnology-based drug delivery systems for control of microbial biofilms: a review. **International Journal of Nanomedicine**, v. 13, p. 1179, 2018.
- RAPOSO, A. C. Terrorismo e Contraterrorismo: desafio do século XXI. **Revista Brasileira de Inteligência**, v. 3, n. 4, p. 39-56, 2007.
- RATWANI, C. R.; BARKAN, T. Human trials suggest graphene inhalation may be safe. **Graphene and 2D Materials**, 16 abr. 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/2731>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- RAZAB, M. K. A. A.; NAWI, N. M.; KHAIZUL, A. T. Extraction of iodine-131 from radioactive spillage using coconut shell activated carbon in nuclear medicine. **AIP Conference Proceedings**, v. 2454, n. 1, p. 060027, 2022.
- REIS, C. P. et al. Nanoencapsulation I. Methods for preparation of drug-loaded polymeric nanoparticles. **Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine**, v. 2, n. 1, p. 8-21, 2006.
- REVIEWING Performance Measures of the Die-Sinking Electrical Discharge Machining Process: Challenges and Future Scopes. **Nanomaterials**, v. 12, n. 3, p. 384, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano12030384>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- ROGERS, B.; MCKAY, E.; SHARMA, D. Radiation safety: Protection of staff and the general public in nuclear medicine. **Health Physics Journal**, v. 118, n. 3, p. 312-328, 2020.
- RUMP, A. et al. Estimation of radiation-induced health hazards from a “dirty bomb” attack with radiocesium under different assault and rescue conditions. **Military Medical Research**, v. 8, n. 65, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40779-021-00349-w>.
- SADHUKHAN, J. Sustainable net-zero pathways: efficient, cost-effective, and environmentally sustainable strategies. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, p. 121907, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121907>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- SAHOO, S. et al. A review on supercapacitors based on plasma enhanced chemical vapor deposited vertical graphene arrays. **Journal of Energy Storage**, v. 53, p. 105212, 2022.

SALGADO, A. R. **Influência do azul da Prússia alemão e brasileiro no desenvolvimento in vitro de embriões murinos irradiados com cobalto 60 (Co60)**. 2020. 123 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-05112020-155619/publico/2020SalgadoInfluencia.pdf>. Acesso em: 28 set. 2024.

SALLEH, A. et al. The Potential of Silver Nanoparticles for Antiviral and Antibacterial Applications: A Mechanism of Action. **Nanomaterials**, v. 10, n. 8, p. 1566, 2020.

SAMBALLE, F. et al. Investigations of the toxic effect of silver nanoparticles on mammalian cell lines. **Journal of Nanomaterials**, v. 2015, 2015.

SANDHU, A.; KUMAR, P. Sustainable strategies for the decontamination of heavy metals from industrial wastewater: a review. **Environmental Research**, v. 192, p. 110321, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110321>. Acesso em: 20 jun. 2024.

SAINT-PIERRE, H. L. Em torno de uma definição de “terrorismo”. **Portal Universia**, v. 8, 2005.

SANTOS, N. M. **Nanopartículas magnéticas biocompatíveis e funcionalizadas com ácido fólico como potencial agente teranóstico no tratamento de câncer via magnetohipertermia**. 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75134/tde-10112021-165537/publico/NataliaMarianaSantosrevisada.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.

SANTOS, N. S. O.; ROMANOS, M. T. V.; WIGG, M. D. **Virologia humana**. Grupo Gen-Guanabara Koogan, 2015.

SANTOS, R. G.; LIMA, T. P.; SILVA, M. O. Aplicações do tecnécio-99m na medicina nuclear: benefícios e limitações. **Caderno de Ciências Biomédicas**, v. 7, n. 1, p. 25-40, 2021.

SANTOS, R. M. M.; FIALHO, S. L. Nanopartículas. **Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento**, Ano 10, Número 37, Janeiro/Fevereiro, 2007.

SARKAR, S. K.; CHAKRABARTI, S. Advanced oxidation processes for the decontamination of heavy metal-contaminated water: a review. **Science of The Total Environment**, v. 696, p. 134029, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134029>. Acesso em: 20 jun. 2024.

SCHAFFAZICK, S. R. et al. Caracterização e estabilidade físico-química de sistemas poliméricos nanoparticulados para administração de fármacos. **Química Nova**, v. 26, n. 5, p. 726-737, 2003.

SCHRÖFEL, A. et al. Applications of biosynthesized metallic nanoparticles—a review. **Acta Biomaterialia**, v. 10, n. 10, p. 4023-4042, 2014.

SCHULZ, P. A. Nanomateriais e a interface entre nanotecnologia e ambiente. **Vigilância Sanitária em Debate: Sociedade, Ciência & Tecnologia**, v. 1, n. 4, p. 53-58, 2013.

SCIENCE NEWS. **Nanosponges from blood cell membranes may soak up toxins and deliver drugs**. Science News, 2020. Disponível em: <https://www.sciencenews.org/article/nanosponges-toxins-blood-cell-membrane-drug-delivery>. Acesso em: 26 set. 2024.

SELVAMUTHUKUMAR, S. et al. Nanosponges: A novel class of drug delivery system- review. **Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences**, v. 15, n. 1, p. 103-111, 2012.

SHANKAR, R. et al. Non-aqueous synthesis of silver nanoparticles using tin acetate as a reducing agent for the conductive ink formulation in printed electronics. **Journal of Materials Chemistry**, v. 21, n. 29, p. 10871-10877, 2011.

SHARMA, S. et al. PLGA-based nanoparticles: A new paradigm in biomedical applications. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 80, p. 30-40, 2016.

SHEREEN, M. A. et al. COVID-19 infection: Origin, transmission, and characteristics of human coronaviruses. **Journal of Advanced Research**, 2020.

SHRINGIRISHI, M. et al. Nanosponges: a potential nanocarrier for novel drug delivery-a review. **Asian Pacific Journal of Tropical Disease**, v. 4, p. S519-S526, 2014.

SHUKRI, S. I. The extraction of iodine-131 from the spillage using coconut shell activated carbon in nuclear medicine. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 55, n. 2, p. 99-110, 2020.

SILVA, J. P.; CARVALHO, M. R.; OLIVEIRA, C. F. Radiofármacos à base de tecnécio-99m: produção, propriedades e aplicações clínicas. **Revista de Medicina Nuclear e Imagem Molecular**, v. 11, n. 2, p. 33-50, 2021.

SILVA, J. S. F. **Sistema Multifuncional nPANI@ nZIF-8: do Design ao uso na terapia do câncer**. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/38914>. Acesso em: 10 maio 2024.

SINGH, R.; LILLARD JR, J. W. Nanoparticle-based targeted drug delivery. **Experimental and Molecular Pathology**, v. 86, n. 3, p. 215-223, 2009.

SIMÓN, J. **Terrorismo do lobo solitário: compreendendo a ameaça crescente**. Nova York: Prometheus Books, 2017.

SOARES, J. A. N. O Terror como arma de guerra. **O Anfíbio: revista do corpo de fuzileiros navais**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 20, p. 4-12, 2001.

SONG, Z. et al. From SARS to MERS, thrusting coronaviruses into the spotlight. **Viruses**, v. 11, n. 1, p. 59, 2019.

SPESHOCK, J. L. et al. Interaction of silver nanoparticles with Tacaribe virus. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 8, n. 1, p. 1-9, 2010.

SUBBARAO, I.; JAMES, J. J. Nuclear preparedness. **Disaster Medicine and Public Health Preparedness**, v. 5, p. S8–S10, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1001/dmp.2011.24>.

SUNAIWI, R. Extraction of iodine-131 by synthetic and natural antibacterial carbon adsorbents for clinical nuclear medicine waste management. **Journal of Nuclear Medicine Technology**, v. 51, n. 4, p. 289-301, 2023.

SUTANTO, S. J. et al. Partitioning of evaporation into transpiration, soil evaporation and interception: a comparison between isotope measurements and a HYDRUS-1D model. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, p. 2605-2616, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-16-2605-2012>. Acesso em: 20 jun. 2024.

TANG, L.; JI, Rong; LI, X.. Deep Ultraviolet to Near-Infrared Emission and Photoresponse in Layered N-Doped Graphene Quantum Dots. **ACS Nano**, v. 12, n. 6, p. 6661-6670, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b03371>. Acesso em: 20 jun. 2024.

The Application of Microwaves, Ultrasounds, and Their Combination in the Synthesis of Nitrogen-Containing Bicyclic Heterocycles. **IJMS**, v. 24, n. 8, p. 3489, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms24083489>. Acesso em: 20 jun. 2024.

TIAN, X. et al. Bactericidal effects of silver nanoparticles on lactobacilli and the underlying mechanism. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 10, n. 10, p. 8443-8450, 2018.

TORTORA, G. J.; CASE, C. L.; FUNKE, B. R. **Microbiologia-12ª Edição**. Artmed Editora, 2016.

TREFRY, J. C.; WOOLEY, D. P. Rapid assessment of antiviral activity and cytotoxicity of silver nanoparticles using a novel application of the tetrazolium-based colorimetric assay. **Journal of Virological Methods**, v. 183, n. 1, p. 19-24, 2012.

TREMILIOSI, G. C. et al. Ag nanoparticles-based antimicrobial polycotton fabrics to prevent the transmission and spread of SARS-CoV-2. **BioRxiv**, 2020.

TRIPATHI, D. K. et al. Uptake, accumulation and toxicity of silver nanoparticle in autotrophic plants, and heterotrophic microbes: a concentric review. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p. 7, 2017.

TROIANO, G. et al. A quality by design approach to developing and manufacturing polymeric nanoparticle drug products. **The AAPS Journal**, v. 18, n. 6, p. 1354-1365, 2016.

TUCKER, J. B. Chemical terrorism: assessing threats and responses. In: Workshop on terrorism in a high-tech society and modern methods for prevention and response, 2001, Moscow, Russia. **High-impact terrorism: proceedings of a Russian-American workshop**. Washington, D.C.: National Academy Press, 2002. p. 115-134.

UPTAKE, Accumulation and toxicity of silver nanoparticle in autotrophic plants, and heterotrophic microbes: a concentric review. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p. 7, 2017.

URADE, A. R.; LAHIRI, I.; SURESH, K. S. Graphene properties, synthesis and applications: a review. **The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society**, n. 75, p. 614-630, 2023.

VALENTE, C. A. **Desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos híbridos e biocompatíveis para aplicação na engenharia de tecidos**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/18982/1/000500853-Clique%2Baqui%2Bpara%2Bacessar-0.pdf>. Acesso em: 17 maio 2024.

- VARGAS, A. Hacktivism: ideologia justifica práticas de crimes virtuais? **Módulo Security News - E-Security News**, n. 221, 01 dez. 2001.
- VASHIST, A. et al. Recent advances in hydrogel based drug delivery systems for the human body. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 2, n. 2, p. 147-166, 2014.
- VATIS. **Cybersecurity Regulation and Incident Reporting**. National Security Archive, 2001. Disponível em: <https://nsarchive.gwu.edu>. Acesso em: 23 set. 2024.
- VAZQUEZ-MUNOZ, R.; LOPEZ-RIBOT, J. L. Nanotechnology as an Alternative to Reduce the Spread of COVID-19. **Challenges**, v. 11, n. 2, p. 15, 2020.
- VENKATESH, N. et al. Metallic nanoparticle: a review. **Biomedical Journal of Scientific & Technical Research**, v. 4, n. 2, p. 3765-3775, 2018.
- VICENTE, A. M. S. L. B. **Estudo do efeito biocida de suportes de celulose impregnados com nanopartículas de óxido de zinco e de prata**. 2016. Tese de Doutorado.
- VOLLATH, D. Nanomaterials an introduction to synthesis, properties and application. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 7, n. 6, p. 865-870, 2008.
- WANG, Z. et al. Upconversion electroluminescence in 2D semiconductors integrated with plasmonic tunnel junctions. **Nature Nanotechnology**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41565-024-01650-0>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- WEI, Ji. et al. Advanced techniques in decontaminating environmental pollutants using CRISPR-Cas systems. **PLOS Biology**, v. 18, n. 4, p. e3000268, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000268>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- WHITE, R. J. et al. Supported metal nanoparticles on porous materials. Methods and applications. **Chemical Society Reviews**, v. 38, n. 2, p. 481-494, 2009.
- WOLOSZYN, A. L. Aspectos gerais e criminais do terrorismo e a situação do Brasil. **Defesa@Net**, 2006.
- WORLD Health Organization. **Coronavirus disease (COVID-19) pandemic. 2020**. Disponível em: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019>.
- WRAPP, D. et al. Cryo-EM structure of the 2019-nCoV spike in the prefusion conformation. **Science**, v. 367, n. 6483, p. 1260-1263, 2020.
- WU, F. et al. A new coronavirus associated with human respiratory disease in China. **Nature**, v. 579, n. 7798, p. 265-269, 2020.
- XIANG, D. et al. Inhibitory effects of silver nanoparticles on H1N1 influenza A virus in vitro. **Journal of Virological Methods**, v. 178, n. 1-2, p. 137-142, 2011.

YANG, G.; ZHU, H.; WANG, Y. Advanced functional materials for water decontamination. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 9, p. 17469-17490, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D1TA02963K>. Acesso em: 20 jun. 2024.

YOON, Y.; KIM, B. Surface decontamination of metals and plastics using advanced photocatalytic methods. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 268, p. 118447, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118447>. Acesso em: 20 jun. 2024.

YU, Y. et al. Enhancement of the luminescent thermal stability and water resistance of K₂SiF₆: Mn⁴⁺, Na⁺ by double coating of GQDs and K₂SiF₆. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 898, p. 162819, 2022.

YUAN, Z. et al. Injectable PLGA microspheres with tunable magnesium ion release for promoting bone regeneration. **Acta biomaterialia**, v. 85, p. 294-309, 2019.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. **Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo Vadis?** Química Nova, v. 36, p. 1533-1539, 2013.

ZHANG, Q. et al. Cellular nanosponges inhibit SARS-CoV-2 infectivity. *Nano Letters*, v. 20, n. 7, p. 5570-5574, 2020.

ZHANG, Ruiyu et al. The role of graphene in anti-corrosion coatings: A review. **Construction and Building Materials**, v. 294, p. 123613, 2021.

ZHANG, Y. et al. Novel applications of biochar for the removal of emerging contaminants from aqueous environments: a comprehensive review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 402, p. 123725, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123725>. Acesso em: 20 jun. 2024.

ZHU, S. et al. Highly Photoluminescent Carbon Dots and Their Applications in Optoelectronic Devices. **Advanced Materials**, v. 31, n. 19, p. 1806262, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adma.201806262>. Acesso em: 20 jun. 2024.