

ESTUDO DOS ÓXIDOS DE GRAFENO E SUAS POTENCIAIS APLICAÇÕES EM BIOSENSORES

STUDY OF GRAPHENE OXIDES AND THEIR POTENTIAL APPLICATIONS IN
BIOSENSORS

ESTUDIO DE LOS ÓXIDOS DE GRAFENO Y SUS POSIBLES APLICACIONES EN
BIOSENSORES

Ollenka Huaman¹, Fernando Sanchez², Thaíssa Pontes³, Rafael Rampinelli Alves⁴, Fernanda Dias da Silva⁵, Ana Champi⁶

DOI: 10.54899/dcs.v23i94.6812

Recibido: 27/08/2026 | Aceptado: 28/08/2026 | Publicación en línea: 09/09/2026.

RESUMO

Atualmente, o óxido de grafeno (GO, do termo em inglês Graphene Oxide) tem despertado grande interesse como material de funcionalização para o desenvolvimento de diferentes tipos de biossensores, devido à sua elevada dispersibilidade em meios aquosos, ampla área superficial e à presença de grupos funcionais oxigenados em sua estrutura. Nesse contexto, este trabalho reúne e discute as principais informações relacionadas ao óxido de grafeno, principais rotas de síntese, seus grupos funcionais, biocompatibilidade e potencial de aplicação como material de funcionalização em biossensores. Além disso, são abordadas algumas das principais limitações associadas as rotas de síntese do GO, destacando-se a necessidade de compreender e controlar parâmetros que possam influenciar suas características físico-químicas e sua biocompatibilidade. Dessa forma, busca-se evidenciar a importância da otimização dos processos de síntese para a obtenção de GO com propriedades adequadas para suas aplicações em biossensores.

Palavras-chave: Óxido de Grafeno. Síntese Química. Grupos Funcionais. Biocompatibilidade. Biossensores.

¹ Mestrando em Biotecnociencia, Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo, Brasil.

E-mail: ollenka.huaman@ufabc.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-0876-9497>

² Mestrando em Engenharia Biomédica, Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo, Brasil.

E-mail: fernando.sanchez@ufabc.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-6952-2535>

³ Graduado em Biomedicina, Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo, Brasil.

E-mail: thaipontes508@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1848-8863>

⁴ Mestrando em Biotecnociencia, Universidade Federal do ABC, São Bernardo, São Paulo, Brasil.

E-mail: rafael.rampinelli@ufabc.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-9195-2012>

⁵ Doutora em Biologia, Universidade Federal do ABC, São Bernardo, São Paulo, Brasil.

E-mail: fernanda.dias@ufabc.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3508-6241>

⁶ Doutora em Física, Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo, Brasil.

E-mail: ana.champi@ufabc.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2354-8867>

ABSTRACT

Currently, graphene oxide (GO) has attracted significant interest as a functionalization material for the development of various types of biosensors, due to its high dispersibility in aqueous media, large surface area, and the presence of oxygen-containing functional groups in its structure. In this context, this paper compiles and discusses key information related to graphene oxide, including its main synthesis routes, functional groups, biocompatibility, and potential for application as a functionalization material in biosensors. In addition, some of the main limitations associated with GO synthesis routes are addressed, highlighting the need to understand and control parameters that may influence its physicochemical characteristics and biocompatibility. Thus, this study aims to highlight the importance of optimizing synthesis processes to obtain GO with properties suitable for its applications in biosensors.

Keywords: Graphene Oxide. Chemical Synthesis. Functional Groups. Biocompatibility. Biosensors.

RESUMEN

En la actualidad, el óxido de grafeno (GO) ha despertado un gran interés como material de funcionalización para el desarrollo de diferentes tipos de biosensores, debido a su elevada capacidad de dispersión en medios acuosos, su alta área superficial y la presencia de grupos funcionales oxigenados en su estructura. En este contexto, este trabajo reúne y analiza la información más relevante relacionada con el óxido de grafeno, las principales rutas de síntesis, grupos funcionales, su biocompatibilidad y su potencial de aplicación como material de funcionalización en biosensores. Además, se abordan algunas de las principales limitaciones asociadas a las vías de síntesis del GO, destacando la necesidad de comprender y controlar los parámetros que pueden influir en sus características físico-químicas y en su biocompatibilidad. De este modo, exhibe la importancia de optimizar los procesos de síntesis con el fin obtener GO con propiedades adecuadas para sus aplicaciones en biosensores.

Palabras clave: Óxido de Grafeno. Síntesis Química. Grupos Funcionales. Biocompatibilidad. Biosensores.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das estratégias mais eficazes para o controle de doenças e de suas consequências é a detecção precoce. A identificação da doença em seus estágios iniciais possibilita a adoção mais rápida de tratamentos, contribuindo na melhora da saúde dos pacientes. Apesar da ampla utilização de métodos convencionais de detecção, como a reação em cadeia da polimerase (PCR) e o ensaio de imunoabsorção enzimática (ELISA), essas técnicas apresentam

limitações relacionadas ao elevado custo, à necessidade de equipamentos e pessoal especializado, bem como ao tempo requerido para a realização das análises. Essas características podem dificultar sua aplicação em análises rápidas e em regiões com recursos limitados (Lazcka *et al.*, 2007; Hossain *et al.*, 2019). Nesse cenário, os biossensores surgem como uma alternativa promissora para a detecção de diferentes analitos, possibilitando análises mais simples, acessíveis e eficientes, com vantagens relacionadas à portabilidade, rapidez de resposta e elevada sensibilidade, tornando-se ferramentas potencialmente relevantes no diagnóstico e monitoramento de doenças.

Ao longo do tempo, diferentes materiais têm sido investigados, com o objetivo de aprimorar o desempenho dos biossensores. Nesse contexto, os nanomateriais de carbono têm gerado grande interesse devido às suas propriedades estruturais, elétricas e químicas, que os tornam promissores para o desenvolvimento de sistemas de detecção mais eficientes (Yildiz *et al.*, 2021).

Entre esses materiais, destaca-se o grafeno, um material bidimensional formado por átomos de carbono sp^2 organizados em uma rede hexagonal. Suas propriedades excepcionais, incluindo elevada área superficial, alta condutividade térmica, elevada mobilidade eletrônica e excelente resistência mecânica, têm despertado grande interesse para o desenvolvimento de biossensores. (Allen *et al.*, 2010; Yildiz *et al.*, 2021; Challhua *et al.*, 2023).

Entretanto, a produção em larga escala de grafeno de alta qualidade ainda representa um desafio significativo. Métodos tradicionais, como a esfoliação mecânica ou a deposição química na fase de vapor (CVD), apresentam limitações importantes para implementação industrial (Marcano *et al.*, 2010). Nesse contexto, o óxido de grafeno (GO) surgiu como uma alternativa promissora já que o método de obtenção se baseia principalmente em rotas químicas reprodutíveis e escaláveis, que envolvem a esfoliação oxidativa do grafite (Guerrero-Contreras *et al.*, 2015). Durante esse processo, agentes oxidantes fortes introduzem grupos funcionais oxigenados, como hidroxilas ($-OH$), epóxidos ($-O-$), carbonilas ($C=O$) e carboxilas ($-COOH$), tanto nos planos basais quanto nas bordas das folhas de grafite. A incorporação desses grupos aumenta o espaçamento interlamelar, enfraquece as forças de van der Waals entre as camadas e favorece a esfoliação do material, resultando em folhas de GO constituídas por uma ou poucas camadas (Kumar *et al.*, 2021).

Devido à presença de grupos funcionais oxigenados em sua estrutura, o GO apresenta grande potencial para ser utilizado como plataforma de imobilização de agentes biológicos que

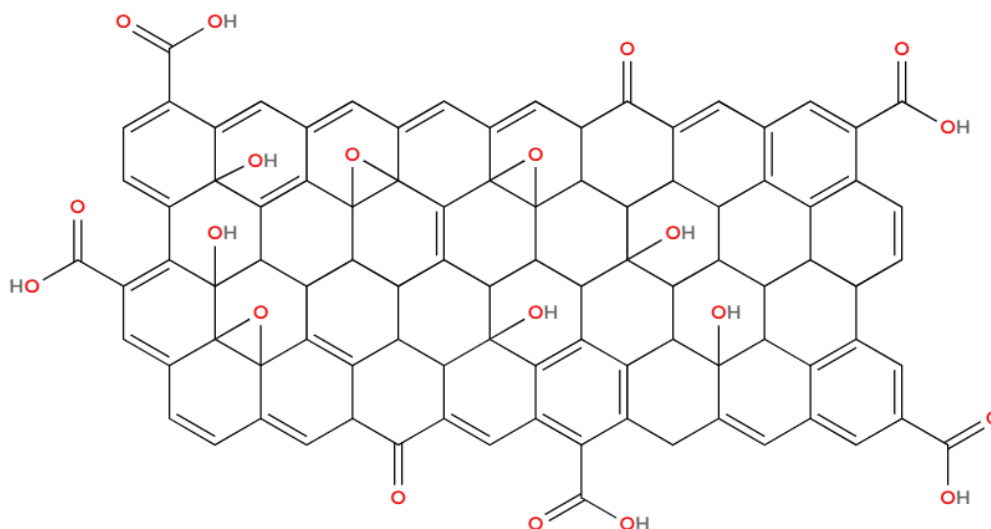
atuam como elementos de reconhecimento, os quais são responsáveis por interagir especificamente com o analito de interesse, permitindo que essa interação biológica seja posteriormente convertida pelo biossensor em um sinal mensurável. Dessa forma, o GO tem sido amplamente empregado no desenvolvimento de diferentes sistemas de detecção, incluindo biossensores colorimétricos, fluorescentes e eletroquímicos (Fatemi *et al.*, 2026; Jain *et al.*, 2016).

Neste trabalho, serão abordadas as principais características dos óxidos de grafeno, suas propriedades físico-químicas, estruturais e superficiais, e como essas características tornam esse nanomaterial particularmente promissor para aplicações em biossensores, destacando sua elevada área superficial, a presença de grupos funcionais oxigenados e sua capacidade de interação e funcionalização com diferentes elementos de reconhecimento biológico. Além disso, serão apresentadas algumas das principais aplicações do GO no desenvolvimento de diferentes tipos de biossensores.

ÓXIDO DE GRAFENO (GO)

O óxido de grafeno (GO) é um nanomaterial bidimensional constituído por uma rede de carbono sp^2 , amplamente funcionalizada com grupos funcionais oxigenados ($-OH$, $-O-$, $C=O$, $-COOH$), como se pode observar na Figura 1. Esses grupos são incorporados à estrutura do material durante o processo de síntese química do GO, que envolve principalmente a oxidação do grafite (Guerrero-Contreras *et al.*, 2015).

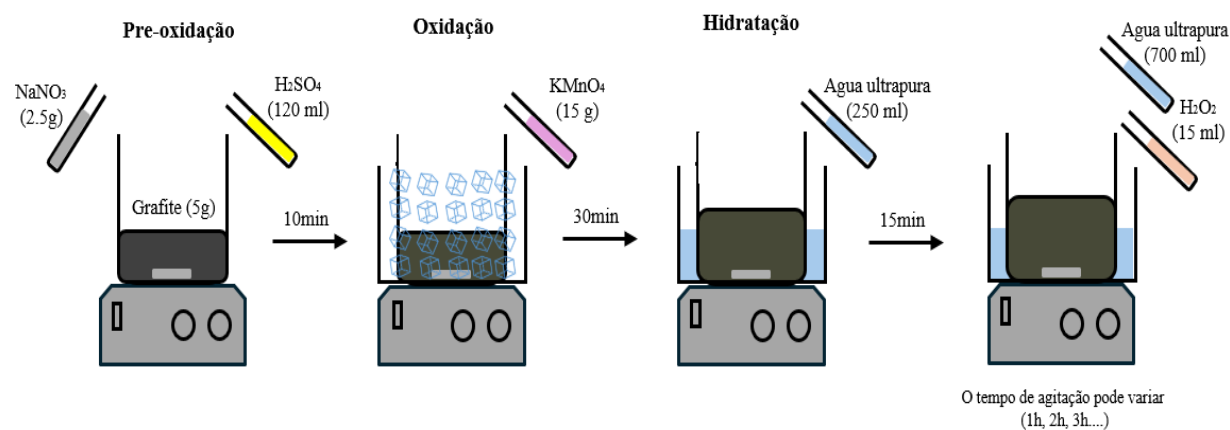
Figura1. Representação da estrutura do óxido de grafeno.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em 1859, Brodie demonstrou, pela primeira vez, a síntese química do GO, por meio da adição de reagentes como o clorato de potássio (KClO_3) e ácido nítrico (HNO_3) a uma suspensão de grafite (Brodie *et al.*, 1859). Entre os métodos químicos mais utilizados destacam-se o procedimento desenvolvido por Hummers *et al.* (1958), bem como suas versões modificadas, método de Hummers modificado, ou o método proposto por Marcano *et al.* (2010). No método de Hummers modificado, como se pode ser observado na Figura 2, o grafite é inicialmente submetido a uma etapa de pré-oxidação, utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) e nitrato de sódio (NaNO_3) por 10min. Em seguida, na etapa de oxidação, a mistura é colocada em banho de gelo para a adição do agente oxidante, o permanganato de potássio (KMnO_4), mantendo-se a temperatura abaixo de 35°C por 30 min. Em seguida, na etapa de hidratação, é adicionada água destilada à mistura e, após 15 min, inicia-se a etapa final, na qual são adicionados mais água destilada e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para remover espécies oxidantes residuais. Nessa etapa, a mistura continua sob agitação durante um determinado período, que pode variar dependendo do tipo de óxido de grafeno que se deseja obter. Por último, a mistura passa por um processo de lavagem e secagem para obtenção dos flocos de óxido de grafeno. Já o método modificado por Marcano *et al.* (2010), substitui o NaNO_3 , reduzindo a emissão de gases tóxicos, por uma mistura de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_3\text{PO}_4$ e utiliza maiores quantidades de KMnO_4 , promovendo uma oxidação mais eficiente e um maior teor de grupos funcionais oxigenados.

Figura 2. Etapas do método de Hummer modificado usado para a síntese química do óxido de grafeno.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Como se pode observar, os métodos de síntese química do GO vêm sendo aprimorados ao longo do tempo por meio da modificação dos reagentes utilizados no processo, conforme apresentado no Quadro 1, com o objetivo de controlar a emissão de gases tóxicos e reduzir ou eliminar contaminantes do material e, conseqüentemente, ajustar suas propriedades de acordo com a aplicação desejada.

Quadro 1. Métodos químicos para a obtenção de GO onde (*) são os reagentes presentes e (—) os reagentes não presentes nas sínteses.

Método	Grafito	HNO ₃	KClO ₃	H ₂ SO ₄	NaNO ₃	H ₃ PO ₄	KMnO ₄	Fonte
Brodie	*	*	*	—	—	—	—	Brodie <i>et al.</i> , (1859).
Staudenmaier	*	*	*	*	—	—	—	Staudenmaier <i>et al.</i> , (1898)
Hummer	*	—	—	*	*	—	*	Hummers <i>et al.</i> (1958)
Marcano	*	—	—	*	—	*	*	Marcano <i>et al.</i> (2010)

Fonte: Elaborado pelos autores.

No caso da utilização de óxidos de grafeno como materiais de funcionalização em biossensores eletroquímicos, é importante considerar o grau de oxidação do material, uma vez que uma elevada porcentagem de oxigênio pode aumentar seu caráter isolante e, conseqüentemente, interferir na transferência de elétrons e nas medidas eletroquímicas. Por outro lado, a presença de uma superfície rica em grupos carboxila na estrutura do GO pode favorecer a interação e a imobilização de aptâmeros, que são oligonucleotídeos de DNA ou RNA capazes de reconhecer e se ligar especificamente a diferentes moléculas-alvo, possibilitando o seu uso como elementos de reconhecimento em biossensores baseados em GO (Fatemi *et al.* 2026). Dessa forma, o controle do grau de oxidação e da distribuição dos grupos funcionais do GO é fundamental para adequar suas propriedades às características e aos mecanismos de detecção de

cada tipo de biossensor.

Para que o GO possa ser utilizado como material de funcionalização em biossensores destinados ao reconhecimento celular, é importante que sua interação com as células não comprometa significativamente sua viabilidade, considerando que efeitos tóxicos podem interferir no reconhecimento biológico e prejudicar o desempenho do dispositivo.

Embora o GO seja conhecido por apresentar, de modo geral, boa biocompatibilidade, diversos estudos reportam que o GO pode apresentar efeitos tóxicos frente a alguns microrganismos como a *Escherichia coli*, resultando na redução do crescimento celular ou até mesmo em efeitos bactericidas. A comparação entre diferentes trabalhos de toxicidade dos óxidos de grafeno é frequentemente dificultada pela grande variabilidade dos materiais utilizados; fatores como a origem da matéria-prima, o método de síntese, as etapas de purificação e as condições de processamento podem influenciar significativamente as propriedades físico-químicas e dessa forma mudar a biocompatibilidade do GO obtido (Liu *et al.*, 2011; Nanda *et al.*, 2016; Majeed *et al.*, 2017).

Nesse contexto, alguns estudos sugerem que parâmetros como a porcentagem de oxigênio relacionada ao grau de oxidação, e o tamanho das folhas podem influenciar a interação do GO com células bacterianas. Entretanto, essa relação ainda permanece pouco explorada (Liu *et al.*, 2012; Majeed *et al.*, 2017). Dessa forma, torna-se relevante a avaliação da toxicidade do material e a investigação sobre como as propriedades físico-químicas do óxido de grafeno afetam sua interação com microrganismos, contribuindo para uma melhor compreensão de sua biocompatibilidade e uma síntese controlada de óxidos de grafeno para aplicações em biossensores.

Para avaliar os possíveis efeitos tóxicos dos diferentes tipos de óxido de grafeno sintetizados frente a bactérias, podem ser realizados ensaios de toxicidade utilizando-se diferentes concentrações do nanomaterial, previamente estabelecidas com base em estudos descritos (Majeed *et al.*, 2017; Schmuck *et al.*, 2024). Antes da realização dos ensaios, os óxidos de grafeno são adequadamente dispersos em água destilada ou em algum outro meio apropriado, podendo ser submetidos à sonicação a fim de favorecer à dispersão homogênea dos nanomateriais.

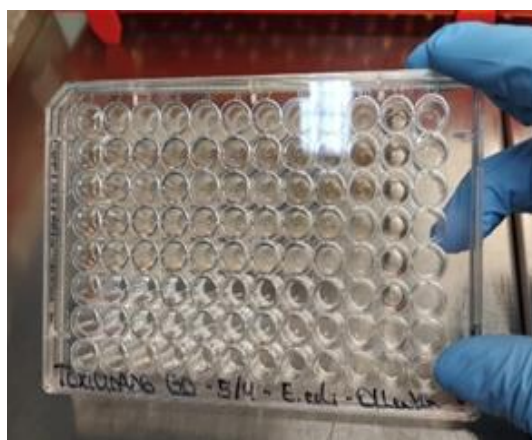
A suspensão bacteriana deve ser preparada em uma concentração adequada para o ensaio, de acordo com protocolos previamente descritos na literatura ou com as recomendações da coleção de culturas correspondente.

O ensaio de toxicidade pode ser realizado conforme exemplo apresentado na Figura 3. A

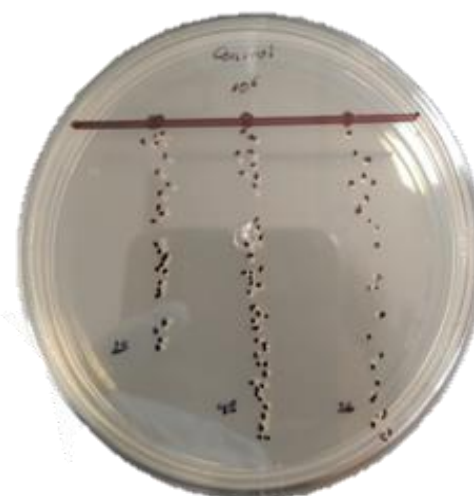
suspensão bacteriana é colocada em contato com diferentes concentrações de GO, juntamente com o grupo controle sem a presença do nanomaterial, e posteriormente incubada em condições adequadas para o crescimento bacteriano. Essa etapa permite avaliar os efeitos do contato com o GO sobre a viabilidade bacteriana e quais concentrações são tóxicas. Após período de incubação em condições adequadas ao crescimento microbiano, as suspensões provenientes dos tratamentos e dos grupos controle são diluídas e plaqueadas em meio de cultivo sólido. No exemplo da Figura 3 foi utilizado o método de plaqueamento da gota escorrida (Jett *et al.* 1997). Este método permite a determinação do número de unidades formadoras de colônia por mililitro (UFC mL⁻¹). A partir desses resultados, pode-se avaliar a influência do tipo e da concentração de GO sobre a viabilidade e o crescimento bacteriano, permitindo estabelecer possíveis relações entre as características dos nanomateriais e seus efeitos biológicos.

Figura 3. Exemplo de ensaio de toxicidade utilizando GO e bactérias *E. coli*. (a) Incubação das bactérias com diferentes concentrações de GO. (b) Determinação de UFC mL⁻¹.

a)



b)



Fonte: Acervo dos autores

APLICAÇÕES DO ÓXIDO DE GRAFENO EM BIOSSENSORES

O óxido de grafeno (GO) apresenta diversas aplicações em biossensores devido à sua elevada área superficial, à presença de numerosos grupos funcionais oxigenados em sua estrutura e ao seu caráter hidrofílico. Essas características favorecem a dispersão do material em meios aquosos, a imobilização de moléculas de biorreconhecimento e sua integração a diferentes plataformas de detecção, como se pode observar no Quadro 2.

Quadro 2. Aplicações do GO em diferentes tipos de biossensores.

MATERIAIS	TIPO DE SENSOR	APLICAÇÃO	FONTE
Pt/GO@NiNps	Eletroquímico	Deteção de glicose	Tran <i>et al.</i> (2025)
GO/CAA	Eletroquímico	Câncer de ovário (deteção de miRNA)	Kivrak e Kara (2025)
GO/LPG	Sensor óptico	Câncer de mama	Sun <i>et al.</i> (2025)
LSPR/GO/MWCNTs	Sensor óptico	Deteção de histamina	Zhang <i>et al.</i> (2023)
GO@CMC.MgO	Eletroquímico	Deteção de dopamina e heroína	Javed <i>et al.</i> (2023)
MGO (modified Graphene oxide)	Fluorescente	Deteção de E coli	Fatemi <i>et al.</i> (2025)
GO/CA-125	Eletroquímico	Deteção de biomarcadores presentes na endometriose	Sangili <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Uma dessas aplicações encontra-se no campo da eletroquímica, no qual o GO, combinado com outros nanomateriais, pode integrar a composição do eletrodo de trabalho. Tran *et al.* (2025), por exemplo, utilizaram o GO para melhorar a dispersão das nanopartículas de níquel e aumentar a área superficial do eletrodo, favorecendo a interação com a glicose, a transferência de elétrons durante sua oxidação e a sensibilidade do sensor. Além disso, o GO pode ser funcionalizado para aprimorar sua interação com elementos de biorreconhecimento. Kivrak e Kara (2025), por exemplo, introduziram grupos carboxila na estrutura do GO, aumentando sua dispersibilidade e possibilitando a imobilização de microRNAs por meio da química EDC/NHS. Nesse processo, os grupos amino do RNA ligaram-se covalentemente aos grupos carboxila, enquanto os grupos remanescentes foram bloqueados com dietilamina (DEA). Outra aplicação relevante é a detecção de drogas: Javed *et al.* (2023) empregaram um nanocompósito de GO@CMC/MgO para a determinação eletroquímica de dopamina e heroína. Nesse sistema, o GO atua como estabilizador químico e térmico, enquanto as propriedades condutivas e capacitivas do óxido de Magnésio (MgO) associado ao GO@CMC aumentam a taxa de transferência de carga e conferem propriedades eletroquímicas favoráveis à membrana. A funcionalização do GO com carboxymethylcelulosa (CMC) também favorece a interação com íons metálicos, melhora a dispersibilidade em solventes e aumenta a resistência mecânica do eletrodo.

A versatilidade do óxido de grafeno também permite sua utilização como revestimento funcional para aprimorar as propriedades ópticas de sensores baseados em redes de período longo em fibra (LPG). Sun *et al.* (2025), por exemplo, recobriram uma LPG com GO para aumentar sua sensibilidade. Embora essas redes já constituam uma alternativa adequada para a detecção não invasiva, a elevada área superficial e as propriedades ópticas do GO podem melhorar significativamente seu desempenho. Nesse caso, o sistema foi empregado na detecção de células

MCF-7 de câncer de mama por meio do monitoramento das alterações do índice de refração provocadas pelos metabólitos liberados durante o metabolismo celular.

Zhang *et al.* (2023), por sua vez, desenvolveram um biossensor de fibra óptica baseado em ressonância plasmônica de superfície localizada (LSPR) para a detecção de histamina. A histamina é uma amina biogênica que pode ser encontrada em alimentos comuns como os peixes. Em concentrações elevadas, pode causar intoxicação alimentar. A plataforma foi funcionalizada com GO, nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs), nanopartículas de ouro (AuNPs) e diamina oxidase. Nesse sistema, o GO aumenta a área superficial disponível para a imobilização das nanopartículas de ouro e da enzima, favorecendo a interação com a histamina e contribuindo para a sensibilidade do sensor.

O GO também pode ser empregado em plataformas de detecção fluorescente. Fatemi *et al.* (2025) desenvolveram um aptassensor fluorescente para a identificação de *E. coli* em alimentos, cuja presença representa um risco relevante à saúde. Nessa aplicação, o GO desempenha um papel central, pois o empilhamento π - π favorece sua interação não covalente com o aptâmero P12-31, utilizado como elemento de biorreconhecimento específico para a cepa *E. coli* ATCC 25922. Essa estratégia possibilita o desenvolvimento de um sensor rápido, seletivo e adequado para aplicações no ponto de atendimento.

Taniselass *et al.* (2019) destacam o potencial dos materiais à base de grafeno na construção de biossensores eletroquímicos devido à combinação entre elevada área superficial, propriedades elétricas e possibilidade de funcionalização. Especificamente para a endometriose, uma doença ginecológica crônica que atinge aproximadamente 10% das mulheres em idade reprodutiva e está associada a dor pélvica, dismenorreia, infertilidade e impactos significativos na qualidade de vida (Eisenberg *et al.*, 2018; Ellis *et al.*, 2022). Sangili *et al.* (2020) desenvolveram um imunossensor eletroquímico baseado em um nanocompósito de nanopartículas de ouro (AuNP) e óxido de grafeno reduzido (rGO) para a detecção do biomarcador CA-125 presente em pacientes com endometriose, demonstrando a aplicabilidade de materiais derivados do grafeno na identificação de marcadores relacionados à doença. Embora esse estudo tenha empregado rGO, seus resultados fornecem uma base experimental relevante para investigar o GO como material de suporte e funcionalização em uma nova plataforma voltada à análise de biomarcadores em sangue menstrual. Sendo assim, utilização do GO poderá representar uma rota para integrar nanotecnologia e sensoriamento na busca por uma abordagem diagnóstica mais acessível e minimamente invasiva para a endometriose.

Portanto, o GO apresenta elevado potencial para aplicações em diagnóstico, monitoramento e segurança alimentar. Entretanto, o controle rigoroso de sua síntese, dispersão e funcionalização é fundamental para garantir a reprodutibilidade de suas propriedades e otimizar sua interação com diferentes elementos de biorreconhecimento. O aperfeiçoamento desses parâmetros pode ampliar ainda mais sua versatilidade e contribuir para o desenvolvimento de tecnologias de detecção mais sensíveis, rápidas e confiáveis.

DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar dos avanços apresentados neste trabalho, os métodos químicos tradicionais ainda apresentam limitações no controle de parâmetros fundamentais do GO obtido, como o grau de oxidação, a densidade de defeitos estruturais e a morfologia das folhas, características que influenciam diretamente as propriedades finais do material e, consequentemente, seu desempenho em diferentes aplicações. Embora a incorporação de diferentes nanopartículas possa contribuir para melhorar determinadas características do óxido de grafeno, a otimização dos processos de síntese é fundamental para reduzir os custos de produção e aumentar a reprodutibilidade a maior escala. Nesse sentido, o controle das condições de síntese pode permitir a obtenção de nanomateriais com propriedades mais adequadas às demandas específicas de diferentes aplicações, incluindo o desenvolvimento de biossensores. Por esse motivo, nos últimos anos, diversas estratégias têm sido exploradas para aprimorar a síntese do GO, envolvendo modificações nas proporções dos reagentes, nos tempos e temperaturas de reação e na sequência de adição dos componentes (Guerrero-Contreras *et al.*, 2015; Eigler *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2021). Essas abordagens buscam não apenas aumentar a eficiência do processo, mas também obter maior controle sobre as características estruturais e químicas do GO, permitindo adequar suas propriedades às necessidades de cada aplicação.

Além disso, o estudo da biocompatibilidade do óxido de grafeno é fundamental para sua interação com agentes biológicos. Nesse sentido, torna-se necessário aprofundar a investigação sobre a influência de diferentes propriedades físico-químicas do GO, como o grau de oxidação, o tamanho das folhas, a morfologia e a composição superficial, a fim de determinar se essas características podem alterar sua biocompatibilidade e, consequentemente, induzir efeitos tóxicos em diferentes microrganismos.

Apesar dessas limitações, as perspectivas futuras para o uso do óxido de grafeno (GO)

como material de funcionalização em biossensores são promissoras. Atualmente, o GO tem sido amplamente utilizado no desenvolvimento de diferentes biossensores como os eletroquímicos, ópticos e fluorescentes, destinados à detecção de biomarcadores que permitiram detecções precoces de diferentes doenças, como se pode observar na parte de aplicações neste trabalho. Entretanto, seu potencial de aplicação não se restringe à área médica, podendo também ser explorado no desenvolvimento de sensores voltados ao monitoramento e à segurança de qualidade de alimentos, bem como ao monitoramento de diferentes contaminantes (Prasetya *et al.*, 2025; Han *et al.*, 2022). Dessa forma, a versatilidade das propriedades físico-químicas do GO possibilita sua incorporação em novas plataformas sensoras, ampliando significativamente o campo de aplicações desse material.

Nesse contexto, são importantes pesquisas orientadas na padronização e aprimoramento dos métodos de síntese do GO o que poderão permitir um maior controle sobre características como tamanho lateral, número de camadas, densidade e distribuição dos grupos funcionais e grau de oxidação possibilitando a obtenção de materiais com propriedades mais reprodutíveis e adequadas a diferentes tipos de biossensores. Outro aspecto essencial para o avanço do uso do GO em biossensores é a compreensão de sua biocompatibilidade. Por isso é importante a investigação de forma sistemática dos parâmetros como tamanho das folhas, grau de oxidação, impurezas, e tempo de exposição podem influenciar sua interação com sistemas biológicos. Essa compreensão é indispensável para avaliar os riscos associados ao material e estabelecer condições que favoreçam sua estabilidade e biocompatibilidade.

CONCLUSÕES

O óxido de grafeno (GO) apresenta uma grande variedade de aplicações em biossensores devido à sua estabilidade estrutural e química, elevada área superficial, hidrofiliabilidade e boa dispersibilidade em meios polares. Sua versatilidade também está relacionada às diferentes modificações que podem ser realizadas em sua estrutura e à capacidade de atuar sinergicamente com outros nanomateriais.

Muitas dessas aplicações concentram-se no campo da eletroquímica, no qual o GO pode desempenhar diferentes funções na composição dos eletrodos de trabalho. Quando combinado com nanopartículas na forma de nanocompósito, o GO pode melhorar sua dispersão, aumentar a área eletroquimicamente ativa e contribuir para a redução do limite de detecção. Além disso, as

modificações de sua estrutura podem favorecer a imobilização dos elementos de biorreconhecimento sobre o eletrodo de trabalho e, conseqüentemente, melhorar a sensibilidade e a especificidade dos sensores.

O GO também pode ser empregado como suporte funcional em plataformas ópticas, nas quais atua não apenas como revestimento estrutural, mas também como um material capaz de modificar as propriedades ópticas e refrativas do sistema, aumentando sua sensibilidade. Da mesma forma, sua ampla variedade de grupos funcionais favorece a interação com diferentes biomoléculas e possibilita sua aplicação em sensores baseados em fluorescência.

Embora as aplicações do GO sejam amplas e tenham sido extensivamente investigadas, seu potencial ainda não foi completamente explorado. Permanecem oportunidades de aprimoramento relacionadas ao controle de sua síntese, funcionalização, dimensões, espessura, combinação com outros nanomateriais e grau de oxidação. O controle desses parâmetros é fundamental, pois eles influenciam diretamente suas propriedades físico-químicas e seu desempenho nas plataformas de detecção.

Finalmente, o óxido de grafeno apresenta elevada versatilidade para aplicações em biossensores. Pesquisas futuras deverão continuar explorando suas propriedades, limitações e possibilidades de funcionalização, com o objetivo de desenvolver plataformas de detecção mais sensíveis, seletivas, reprodutíveis e adequadas para aplicações reais.

AGRADECIMENTOS

Ana Champi agradece o apoio financeiro concedido pelo “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Processo: 302584/2023-4, 404412/2024-6, Bolsa da FAPESP (2022/11894-1) e INCT Nanocarbono e Materiais 2D, Processo: 408649/2024-0. Ollenka Huaman agradece o apoio financeiro do “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Processo: 133267/2025-3, pela concessão da bolsa de estudos. Fernando Sanchez agradece o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES)- pela concessão da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

ALLEN, Matthew J.; TUNG, Vincent C.; KANER, Richard B. **Honeycomb carbon: a review of graphene**. Chemical reviews, v. 110, n. 1, p. 132-145, 2010.

BRODIE, B. Collins. **On the atomic weight of graphite**. Philosophical transactions of the

Royal Society of London, v. 149, p. 249-259, 1859.

CHALLHUA, Ronaldo *et al.* **Portable reduced graphene oxide biosensor for detection of rabies virus in bats using nasopharyngeal swab samples.** Biosensors and Bioelectronics, v. 232, p. 115291, 2023.

FATEMI, Kiyana *et al.* **Development of a modified graphene oxide-alginate electrochemical impedance aptasensor for rapid E. coli detection.** Microchemical Journal, p. 117490, 2026.

FATEMI, Kiyana *et al.* **Revolutionizing aptamer-graphene oxide biosensing: detection, therapeutic applications and environmental monitoring from a clinical perspective.** Microchemical Journal, p. 115819, 2025.

GUERRERO-CONTRERAS, Jesus; CABALLERO-BRIONES, Felipe. **Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variations of the Hummers method.** Materials chemistry and physics, v. 153, p. 209-220, 2015.

HAN, Lei *et al.* Mini review: **Electrochemical electrode based on graphene and its derivatives for heavy metal ions detection.** Talanta Open, v. 6, p. 100153, 2022.

HOSSAIN, SM Zakir; MANSOUR, Nouredine. **Biosensors for on-line water quality monitoring—a review.** Arab Journal of Basic and Applied Sciences, v. 26, n. 1, p. 502-518, 2019.

HUMMERS JR., William S.; OFFEMAN, Richard E. **Preparation of graphitic oxide.** *Journal of the American Chemical Society*, v. 80, n. 6, p. 1339, 1958.

JAIN, Priyamvada *et al.* **Aptamer-graphene oxide for highly sensitive dual electrochemical detection of Plasmodium lactate dehydrogenase.** Analytical biochemistry, v. 514, p. 32-37, 2016.

JAVED, Ayman, *et al.* **Effect of narcotic drugs on neurotransmitter: Electrochemical determination of heroin and dopamine by graphene oxide/carboxymethylcellulose/magnesium oxide nanohybrid membrane.** *Journal of Molecular Liquids*, 2023, vol. 384, p. 122154.

JETT, Bradley D. *et al.* **Simplified agar plate method for quantifying viable bacteria.** Biotechniques, v. 23, n. 4, p. 648-650, 1997.

KIVRAK, Ezgi; KARA, Pinar. **Simultaneous detection of ovarian cancer related miRNA biomarkers with carboxylated graphene oxide modified electrochemical biosensor platform.** *Bioelectrochemistry*, 2025, vol. 161, p. 108806.

KUMAR, Navneet; SRIVASTAVA, Vimal Chandra. **Simple synthesis of large graphene oxide sheets via electrochemical method coupled with oxidation process.** ACS omega, v. 3, n. 8, p. 10233, 2018.

KUMAR, Neeraj *et al.* **Top-down synthesis of graphene: A comprehensive review.** FlatChem, v. 27, p. 100224, 2021.

LAZCKA, Olivier; DEL CAMPO, F. Javier; MUNOZ, F. Xavier. **Pathogen detection: A perspective of traditional methods and biosensors.** Biosensors and bioelectronics, v. 22, n. 7, p. 1205-1217, 2007.

LIU, Shaobin *et al.* **Antibacterial activity of graphite, graphite oxide, graphene oxide, and reduced graphene oxide: membrane and oxidative stress.** ACS nano, v. 5, n. 9, p. 6971-6980, 2011.

LIU, Shaobin *et al.* **Lateral dimension-dependent antibacterial activity of graphene oxide sheets.** Langmuir, v. 28, n. 33, p. 12364-12372, 2012.

MAJEED, Waqar *et al.* **The role of surface chemistry in the cytotoxicity profile of graphene.** Journal of Applied Toxicology, v. 37, n. 4, p. 462-470, 2017.

MARCANO, Daniela C. *et al.* **Improved synthesis of graphene oxide.** ACS nano, v. 4, n. 8, p. 4806-4814, 2010.

NANDA, Sitansu Sekhar; YI, Dong Kee; KIM, Kwangmeyung. **Study of antibacterial mechanism of graphene oxide using Raman spectroscopy.** Scientific reports, v. 6, n. 1, p. 28443, 2016.

PRASETYA, Nor Basid Adiwibawa *et al.* **pH-sensitive chitosan/graphene oxide films enriched with red cabbage anthocyanins for visual spoilage detection in chicken meat.** International Journal of Biological Macromolecules, p. 147866, 2025.

SCHMUCK, Josefina *et al.* **Lyophilized and sonicated graphene oxide and its nanoecotoxicity applications.** Diamond and Related Materials, v. 145, p. 111145, 2024.

STAUDENMAIER, L. **Method for the preparation of graphitic acid.** Ber Dtsch Chem Ges, v. 31, p. 1481-1487, 1898.

SUN, Jiaxing, *et al.* **Graphene oxide-functionalized optical sensor for label-free detection of breast cancer cells.** ACS Applied Nano Materials, 2025, vol. 8, no 34, p. 16770-16778.

TRAN, Luyen Thi, *et al.* **An enzyme-free electrochemical glucose sensor: Directly electrosynthesized nickel nanoparticles/graphene oxide composite on a platinum microelectrode.** Synthetic Metals, 2025, p. 117949.

YILDIZ, Gulsah; BOLTON-WARBERG, Majbritt; AWAJA, Firas. **Graphene and graphene oxide for bio-sensing: General properties and the effects of graphene ripples.** Acta biomaterialia, v. 131, p. 62-79, 2021.

ZHANG, Wen, *et al.* **Humanoid shaped optical fiber plasmon biosensor functionalized with graphene oxide/multi-walled carbon nanotubes for histamine detection.** Optics express, 2023, vol. 31, no 7, p. 11788-11803.