



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E DE ALIMENTOS
CURSO ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Gabriella Ribeiro

Aplicação de *Carbon Dots* em embalagens de alimentos: Uma revisão

Florianópolis

2023

Gabriella Ribeiro

Aplicação de *Carbon Dots* em embalagens de alimentos: Uma revisão

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Alimentos do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador(a): Prof^ª Dr^ª Jéssica de Matos Fonseca

Florianópolis

2023

Ribeiro, Gabriella

Aplicação de Carbon Dots em embalagens de alimentos: Uma revisão / Gabriella Ribeiro ; orientadora, Jéssica Fonseca, 2024.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Alimentos. 2. Efeitos nas propriedades físicas e ópticas . 3. Efeitos nas propriedades ativas e inteligentes. 4. Toxicidade e migração. I. Fonseca, Jéssica. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Alimentos. III. Título.

Gabriella Ribeiro

Aplicação de *Carbon Dots* em embalagens de alimentos: Uma revisão

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Alimentos.

Florianópolis, 8 de dezembro de 2023.



Prof. Dr. Marco Di Luccio
Coordenação do Curso

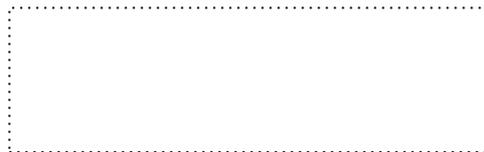
Banca examinadora



Prof.(a) Dr.(a) Jéssica de Matos Fonseca
Orientador(a)



Prof. Dr. Sergio Yesid Gómez González Dr.(a)
Instituição UFSC



MSc. Amanda Galvão Maciel
Instituição UFSC

Florianópolis, 2023

Este trabalho é dedicado ao mais grandioso
Engenheiro e ao Dono de toda ciência, Deus, o Criador.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus, fonte de sabedoria e força que guiaram cada passo desta jornada acadêmica.

À minha mãe, Sara Martins, e ao meu pai, Alison Ribeiro, minha gratidão eterna pelo amor incondicional, apoio incansável e pelos valores que me sustentaram ao longo desta trajetória.

Aos meus amados avós, Maria Fani e Nevil Fidelis, cujo exemplo de fé, dedicação e perseverança sempre me inspirou a alcançar meus objetivos.

Ao meu irmão, Gabriel Ribeiro, pela compreensão, incentivo e pelas risadas que trouxeram leveza aos momentos desafiadores.

Agradeço ao meu namorado, Leonardo Ribak, por ser minha rocha, meu confidente e por compartilhar as alegrias e dificuldades deste percurso.

Minha gratidão se estende à minha orientadora, Jéssica Fonseca, cujo apoio e orientação foram cruciais para a confecção deste trabalho. Sua dedicação e contribuições enriqueceram significativamente no resultado final.

Por fim, expresso meu reconhecimento à Universidade Federal de Santa Catarina e seu corpo docente. Agradeço pela oportunidade de aprendizado, crescimento e pelo ambiente acadêmico que proporcionou a base para este trabalho.

Cada pessoa mencionada desempenhou um papel vital nesta jornada, e por isso, meu coração transborda de gratidão a todos que contribuíram de maneira única para a realização deste trabalho

RESUMO

Este estudo visa uma compreensão mais profunda das crescentes aplicações dos Carbon Dots (CDs) em embalagens de alimentos, realçando suas características únicas, como tamanho nano, grupos funcionais de superfície e eficácia antibacteriana. Ao revisar avanços recentes, analisamos de forma crítica o impacto dos CDs nas propriedades fundamentais dos materiais de embalagem, considerando a diversidade de fontes para a fabricação dessas nanoestruturas, desde micróbios até plantas e alimentos. A análise se estende ao contexto mais amplo da indústria alimentícia, destacando o papel transformador dos CDs nesse cenário dinâmico. Além disso, sublinhamos a relevância prática e econômica dos CDs, ressaltando seu baixo custo e a facilidade de síntese como fatores impulsionadores para sua crescente adoção nas embalagens de alimentos. Ao combinar esses dois estudos, oferecemos uma visão aprofundada e abrangente do estado atual das aplicações dos CDs, abordando desafios enfrentados e perspectivas futuras para essa tecnologia emergente nas embalagens alimentícias.

Palavras-chaves: Carbon dots; embalagem ativas para alimentos; embalagens inteligentes.

ABSTRACT

This study aims to provide a deeper understanding of the growing applications of Carbon Dots (CDs) in food packaging, highlighting their unique characteristics such as nano size, surface functional groups, and antibacterial efficacy. By reviewing recent advancements, we critically analyze the impact of CDs on the fundamental properties of packaging materials, considering the diversity of sources for manufacturing these nanostructures, ranging from microorganisms to plants and food. The analysis extends to the broader context of the food industry, highlighting the transformative role of CDs in this dynamic scenario. Additionally, we emphasize the practical and economic relevance of CDs, underscoring their low cost and ease of synthesis as driving factors for their increasing adoption in food packaging. By combining these two studies, we offer an in-depth and comprehensive view of the current state of CD applications, addressing challenges faced and providing future perspectives for this emerging technology in food packaging.

Keywords: Carbon dots; active food packaging; smart packaging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática estrutural das principais categorias de carbon dots.....	15
Figura 2 - Abordagens Top-down e Bottom-up para a síntese de CD.	16
Figura 3 - CDs como agentes de revestimento, agentes ativos e inteligentes em embalagens.	22
Figura 4 - Mecanismo de barreira UV de filmes poliméricos incorporados de CDs.	28
Figura 5 - Mecanismo antimicrobiano dos CDs.....	35
Figura 6 - Resposta de cor halocrômica do filme compósito	39
Figura 7 - Monitoramento do frescor do camarão usando o indicador CNF/R-CD 3% a 25 °C.	39
Figura 8 - Etapas para monitoramento colorimétrico da deterioração de alimentos no aplicativo.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicações de CDs em embalagens para alimentos utilizando materiais naturais como fontes de carbono e suas aplicações.	21
Tabela 2 - Comparação das propriedades mecânicas de filmes à base de biopolímeros incorporados de Carbon Dots sintetizados a partir de fontes naturais.....	26

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 EMBALAGENS: CONVENCIONAIS, ATIVAS E INTELIGENTES	12
4 CARBON DOTS: NANOTECNOLOGIA À BASE DE CARBONO	14
4.1 SÍNTESE	16
5 CARBON DOTS EM EMBALAGENS DE ALIMENTOS	18
5.1 EFEITO DOS <i>CARBON DOTS</i> NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E ÓPTICAS DA EMBALAGEM	22
5.1.1 Propriedades mecânicas.....	22
5.1.2 Barreira à luz ultravioleta	27
5.1.3 Permeabilidade ao vapor de água e ângulo de contato com a água.....	29
5.1.4 Permeabilidade ao oxigênio	30
5.2 EFEITO DOS CARBON DOTS NAS PROPRIEDADES ATIVAS E INTELIGENTES DA EMBALAGEM	31
5.2.1 Atividade antioxidante	31
5.2.2 Atividade antimicrobiana	34
5.2.3 Indicadores para embalagens inteligentes.....	38
6 TOXICIDADE E MIGRAÇÃO DOS <i>CARBON DOTS</i> DA EMBALAGEM PARA O ALIMENTO	41
7 IMPACTO AMBIENTAL	45
8 LIMITAÇÕES	46
9 TENDÊNCIAS DE MERCADO	47
10 PERSPECTIVAS FUTURAS	48
11 CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	50
ANEXO A: LICENÇA PARA USO DAS FIGURAS 6, 7 E 8	57

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções inovadoras e sustentáveis na área de embalagens de alimentos tem sido uma preocupação constante, impulsionada pela necessidade de preservar a qualidade, segurança e vida útil dos produtos, além de atender às demandas dos consumidores e às regulamentações governamentais. Nesse contexto, a nanotecnologia tem se destacado como uma área promissora, oferecendo novas possibilidades para o desenvolvimento de embalagens mais eficientes e funcionais.

Dentre os nanomateriais em destaque, os *carbon dots* (CDs), nanopartículas de carbono que variam de 1 a 10 nanômetros (Hutton; Martindale; Reisner, 2017), têm despertado grande interesse e chamado a atenção de pesquisadores porque apresentam propriedades únicas e versáteis. Sua baixa toxicidade, biocompatibilidade, baixo custo e inércia química tornam os *carbon dots* uma alternativa atrativa às nanopartículas convencionais, que frequentemente utilizam metais pesados em sua produção (Lim; Shen; Gao, 2015) e aos polímeros oriundos do petróleo, os quais são utilizados em grande parte das embalagens no setor alimentício atualmente.

No contexto das embalagens de alimentos, os *carbon dots* apresentam um potencial significativo para melhorar suas propriedades físicas, como propriedades mecânicas e de barreira, e suas propriedades químicas, incluindo a adição de propriedades ativas e inteligentes. A incorporação dos *carbon dots* em materiais de embalagem para alimentos pode resultar em filmes resistentes a raios ultravioleta, antibacterianos, antioxidantes e biocompatíveis (Zhao et al., 2022). Essas propriedades auxiliam na preservação da qualidade dos alimentos, aumentando sua vida útil e oferecendo maior segurança aos consumidores. Além disso, os *carbon dots* podem ser combinados com outros nanomateriais e matrizes poliméricas, promovendo uma ação sinérgica para o desenvolvimento das embalagens ativas e inteligentes. A adição de *carbon dots* em embalagens também permite o monitoramento e controle das condições internas dos alimentos, como frescor e segurança microbiológica, proporcionando uma resposta adaptável às necessidades específicas de cada produto.

No entanto, é fundamental avaliar constantemente a segurança alimentar relacionada ao uso dos *carbon dots*, afinal esse é um aspecto importante no desenvolvimento de embalagens para alimentos. Questões como a toxicidade e migração dos *carbon dots* precisam ser consideradas, assim como o impacto ambiental da utilização desses nanomateriais em relação a compostos convencionais. Felizmente, a maioria dos estudos atuais de toxicidade biológica

mostraram que os CDs possuem uma boa biocompatibilidade e ao serem comparados aos pontos quânticos metálicos, os CDs apresentam maior segurança biológica para os organismos (Sun et al., 2022).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar as aplicações recentes dos *carbon dots* em embalagens de alimentos e discutir as implicações de seu uso nas propriedades e segurança desses materiais. Será abordado um panorama geral sobre a utilização de *carbon dots*, destacando os avanços científicos e tecnológicos dos últimos anos, bem como os desafios e perspectivas futuras dessa tecnologia nas embalagens de alimentos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar as aplicações de *carbon dots* em embalagens de alimentos e discutir as implicações de seu uso nas propriedades e segurança desses materiais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar um panorama geral sobre a utilização de *carbon dots* para melhorar propriedades de embalagens de alimentos, assim como também os diferentes métodos de síntese desse material.
- Pontuar diferentes matrizes biopoliméricas para a formação de compostos com *carbon dots* e discutir criticamente a ação sinérgica entre outros nanomateriais para o desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes.
- Discutir aspectos sobre segurança alimentar: toxicidade e migração dos *carbon dots* da embalagem para o alimento assim como suas limitações.
- Apresentar o impacto ambiental da utilização de *carbon dots*.

3 EMBALAGENS: CONVENCIONAIS, ATIVAS E INTELIGENTES

As embalagens desempenham um papel crucial na preservação, proteção e comercialização de alimentos. Ao longo dos anos, houve um progresso significativo no desenvolvimento de embalagens para atender às necessidades em constante evolução da

indústria alimentícia e dos consumidores. Embalar alimentos de forma adequada é essencial para manter sua qualidade, segurança e vida útil. Nesse contexto, podemos citar três tipos de embalagens que são utilizadas no mercado atualmente: embalagens convencionais, embalagens ativas e embalagens inteligentes.

As embalagens convencionais têm sido usadas há décadas e geralmente são feitas de materiais como plástico, vidro, papel ou metal. Elas desempenham um papel fundamental na proteção dos alimentos contra danos físicos, contaminação e perda de nutrientes. No entanto, as embalagens convencionais têm limitações quando se trata de monitorar e controlar as condições internas do produto como frescor e segurança microbiológica (Sarantópoulos; Moraes, 2009).

As embalagens ativas surgiram como uma evolução das embalagens convencionais. Elas incorporam componentes ativos, como absorvedores de oxigênio, absorvedores de umidade e agentes antimicrobianos, que interagem com o ambiente interno da embalagem. Esses componentes ajudam a prolongar a vida útil do alimento, reduzir o crescimento de microrganismos indesejáveis e preservar sua qualidade. As embalagens ativas são projetadas para responder a mudanças nas condições do ambiente, adaptando-se às necessidades específicas do produto embalado (Fellows, 2002). Por exemplo, um absorvedor de oxigênio pode ser usado em embalagens de alimentos sensíveis à oxidação, como produtos de panificação, para prolongar o seu frescor.

As embalagens inteligentes representam a vanguarda da tecnologia de embalagens. Elas são capazes de comunicar informações sobre o estado do alimento e das condições internas da embalagem. Esse tipo de embalagem pode conter sensores que monitoram parâmetros como temperatura, umidade, presença de gases e indicadores de vida útil. Esses sensores fornecem dados em tempo real, que podem ser transmitidos a um dispositivo externo, como um smartphone, permitindo que os consumidores obtenham informações sobre a qualidade e a segurança do alimento antes de comprá-lo ou consumi-lo. Além disso, as embalagens inteligentes podem fornecer informações adicionais, como instruções de preparo, receitas ou alertas sobre alergênicos, melhorando a experiência do consumidor (Han, 2005). Portanto, embalagens inteligentes podem ser definidas como sistemas que monitoram a qualidade do alimento embalado durante o seu transporte, distribuição e comercialização (Yam; Takhistov; Miltz, 2005).

Para se obter esses tipos de propriedades específicas nas embalagens são utilizados principalmente os materiais compósitos, que são materiais derivados da combinação de dois ou

mais componentes, no qual há a adição de cargas (fase dispersa/descontínua) à matriz polimérica (fase contínua), que origina um novo material com características melhores do que os materiais constituintes aplicados individualmente. A matriz polimérica tem a função de manter a integridade estrutural do compósito, em virtude das suas propriedades de coesão, enquanto a fase dispersa desempenha o papel de transferir tensões que, por sua vez, atuam como um reforço ou enchimento do material, conferindo um melhor desempenho mecânico da matriz, portanto, modificando suas propriedades (Almeida et al., 2015). Nesse contexto é que entram as nanopartículas, pois muitas das propriedades desejadas, principalmente a resistência final, é dependente do tamanho da partícula, a qual aumenta com a diminuição do tamanho da carga (Rabello, 2000), reduzindo assim problemas com baixa interação/adesão na interface entre os componentes. O uso de materiais de reforço com pelo menos uma dimensão na escala nanométrica (menor que 100 nm), as nanopartículas, produzem os nanocompósitos (Alexandre; Dubois, 2000). Uma das vantagens do uso de nanocompósitos na estrutura da embalagem é a atribuição de propriedades ativas ao material, levando as embalagens ativas e inteligentes a um novo patamar tecnológico, abrindo espaço para o desenvolvimento de uma gama de materiais com diferentes características e qualidade.

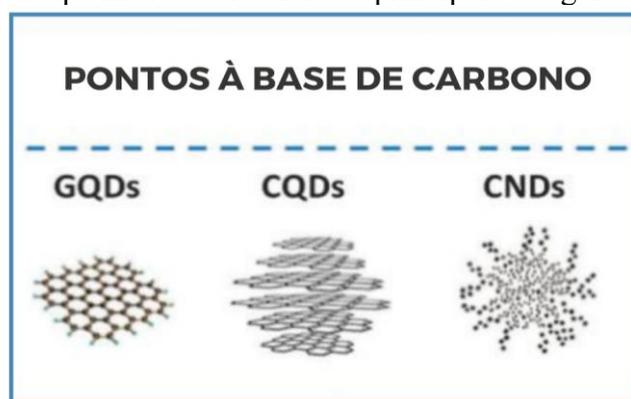
4 CARBON DOTS: NANOTECNOLOGIA À BASE DE CARBONO

A nanotecnologia tem sido uma área de grandes investimentos nos últimos anos e um nanomaterial em especial tem atraído atenção de pesquisadores e empreendedores de diversas áreas, aumentando assim o número de publicações a seu respeito a cada ano. O nanomaterial em questão é o *carbon dot* ou ponto de carbono. Além de apresentarem um grande potencial para uma ampla variedade de aplicações técnicas, a baixa toxicidade, biocompatibilidade, baixo custo e inércia química dos *carbon dots* o tornam uma forte alternativa às nanopartículas semicondutoras convencionais, as quais apresentam certas limitações como alta toxicidade devido ao uso de metais pesados em sua produção (Lim; Shen; Gao, 2015).

Os *carbon dots* (CDs) são nanopartículas de carbono que variam de 1 a 10 nm e que apresentam um núcleo em nanoescala estabilizado por grupos de superfície oxidados, como álcoois e ácidos carboxílicos, os quais são funcionalizáveis (Hutton; Martindale; Reisner, 2017). A composição da nanopartícula de carbono, assim como suas propriedades podem variar de acordo com o método de obtenção, dessa forma, torna-se essencial a categorização de cada tipo de *carbon dot*.

São três as categorias de nanopartículas de carbono: *nanodots* de carbono (CND), os quais são definidos como nanopartículas amorfas e quase esféricas, que possuem estados excitados exclusivamente moleculares e, portanto, não exibem nenhum efeito de confinamento quântico; ponto quântico de grafeno (GQD), os quais possuem precursores principalmente à base de grafeno, sendo nanopartículas bidimensionais em disco; ponto quântico de carbono (CQD), os quais podem ser preparados a partir de outros nanomateriais de carbono com estrutura cristalina, como nanotubos de carbono ou por pirólise de moléculas orgânicas submetidas a altas temperaturas (Cayuela et al., 2016). Na Figura 1 é possível verificar a diferença morfológica entre cada categoria de nanopartículas de carbono.

Figura 1 - Representação esquemática estrutural das principais categorias de carbon dots.



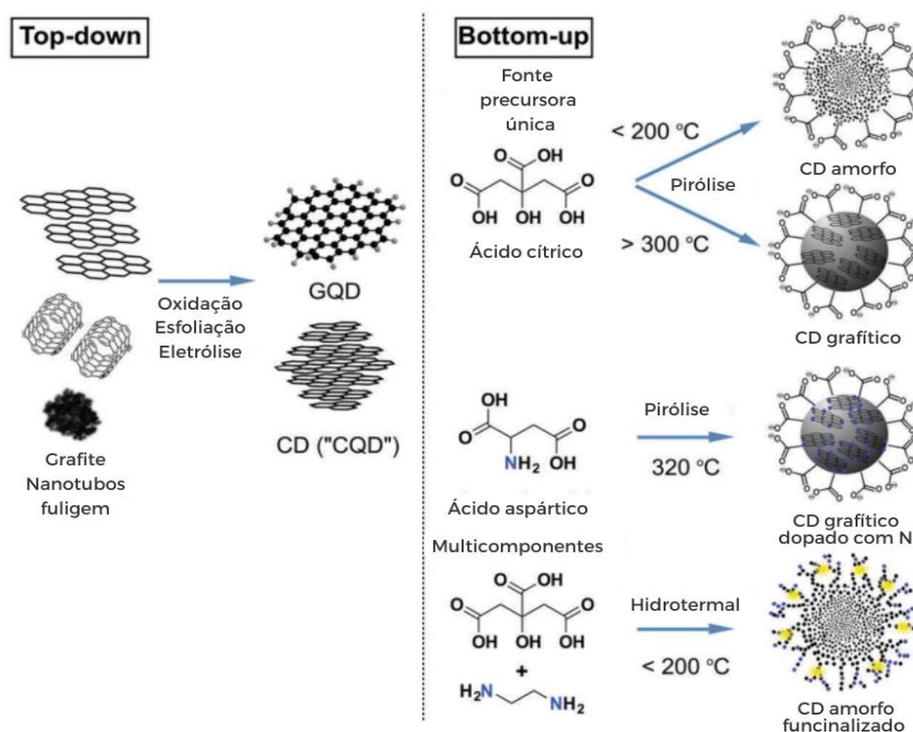
Fonte: Adaptado de Cayuela, Soriano, Carrillo-Carrio e Valcárcel (2015).

As propriedades morfológicas, químicas e estruturais como a cristalinidade dos CDs são dependentes do método de síntese e da fonte de carbono utilizada como agente precursor. Fontes que não sejam oriundas de biomassa, como combustíveis líquidos e resíduos poliméricos são citotóxicos, não sendo permitidos na utilização em contato com alimentos. Para a aplicação em embalagens de alimentos, é possível citar fontes ecologicamente corretas para a síntese de CDs como alimentos de origem animal, frutas, vegetais e resíduos agroindustriais (Salimi et al., 2021). Entre os agentes precursores de origem orgânica é possível citar como exemplo a banana (Zhao et al., 2021), folhas de coentro (Sachdev; Gopinath, 2015), bagaço de uva (Murru; Badía-Laiño; Díaz-García, 2020), acerola (Carvalho et al., 2019) e bagaço de limão (Dos Santos et al., 2020). Em comparação com moléculas orgânicas tóxicas, como compostos de hidrocarbonetos aromáticos, a biomassa é mais segura, barata e fácil de obter pois ela pode ser sintetizada a partir de plantas, produtos alimentícios e microrganismos e por utilizarem métodos hidrotérmico e de micro-ondas que são os mais adequados para a síntese desses *carbon dots*.

4.1 SÍNTESE

Os CDs podem ser obtidos de duas maneiras: métodos *top-down* e métodos *bottom-up*. Na primeira, os CDs são preparados a partir de precursores de carbono maiores, tais como diamante, grafite, nanotubos de carbono e óxido de grafite utilizando técnicas químicas ou eletroquímicas e físicas, tendo como exemplo a oxidação química, descarga de arco, ablação a laser e métodos eletroquímicos (Baker; Baker, 2010). Já nas abordagens *bottom-up* os CDs são sintetizados a partir de precursores moleculares, como ácido cítrico, glicose e resina utilizando alguma energia como tratamento hidrotérmico, ultrassônico, decomposição térmica, pirólise, carbonização e síntese por micro-ondas (De Medeiros et al., 2019).

Figura 2 - Abordagens Top-down e Bottom-up para a síntese de CD.



Fonte: Adaptado de Hutton, Martindale e Reisner (2017).

Assim como todo método, a síntese desse material exige certas condições como tempo, matérias-primas, instrumentos, consumo de energia que podem dificultar a preparação de grandes quantidades de CDs com qualidade, o que nos leva a tornar a abordagem *bottom-up* mais compatível, permitindo a preparação de nanoestruturas com menos defeitos e composições

químicas mais homogêneas (Wang et al., 2014). Além disso, apresentam requisitos de reagentes com baixo custo, eficiência e compatibilidade com a química verde.

O método mais utilizado na abordagem *bottom-up* é o método hidrotérmico, o qual refere-se ao tratamento de alimentos ou seus componentes em soluções aquosas quentes sob altas pressões de vapor (Liu et al., 2012) e para a síntese de CDs esse método apresenta várias vantagens, como simplicidade, baixo custo, ausência de reagentes tóxicos e a possibilidade de usar fontes de carbono naturais, como alimentos ou seus componentes. O método hidrotérmico oferece flexibilidade na escolha dos materiais de partida, permitindo a utilização de diferentes fontes de carbono, como açúcares, ácidos orgânicos, proteínas e polissacarídeos presentes em alimentos. Além disso, a variação das condições de tratamento hidrotérmico, como temperatura, pressão e tempo de reação, pode influenciar nas propriedades dos CDs sintetizados, como tamanho, emissão de luz e estabilidade. Por exemplo, Sabet et al. (2019) usaram a grama moída como fontes de carbono e nitrogênio para a síntese de CDs via reação hidrotérmica a 120 °C em 2 horas, eles produziram CDs altamente fotoluminescentes dopados com nitrogênio (N-). Outro exemplo foi o suco de maçã, que também pode servir como uma fonte de carbono para a produção de CD por meio do método hidrotérmico (Mehta et al., 2015). Alam et al. (2015) escolheram o repolho como material de partida e sintetizaram CDs com propriedades fotoluminescentes de conversão descendente e ascendente. Da mesma forma, o chocolate rico em carbono e oxigênio pode ser convertido em CDs após reação hidrotérmica a 200 °C por 8 horas. Os CDs de chocolate demonstraram alta sensibilidade e seletividade na detecção de Pb^{2+} (Liu et al., 2016).

Já o método de irradiação de micro-ondas permite a síntese de CDs a partir de precursores sob os efeitos de aquecimento homogêneo da irradiação de micro-ondas usando um forno de micro-ondas doméstico (Hu; Gao, 2020) ou laboratorial (Yang et al., 2019). A irradiação de micro-ondas aquece as moléculas-alvo diretamente, em vez de pôr condução e/ou convecção como no método hidrotérmico (De Medeiros et al., 2019). Este método pode ainda ser categorizado em irradiação de micro-ondas de vaso aberto e irradiação de micro-ondas de vaso fechado. Na irradiação de micro-ondas em recipiente aberto a potência de micro-ondas e o tempo são os únicos dois parâmetros a serem considerados. Já na síntese de micro-ondas em vaso fechado ou comumente conhecida como síntese hidrotérmica assistida por micro-ondas requer um controle de temperatura preciso, bem como o sistema de alívio de pressão para fins de segurança (Ng; Lim; Leo, 2021). O uso de micro-ondas pode aumentar a taxa de reação,

melhorar a pureza dos CDs e controlar melhor o tamanho e as propriedades ópticas dos *nanodots* obtidos.

As características químicas, físicas e funcionais dos CDs também podem ser aprimoradas pelo processo de dopagem com heteroátomos como fósforo (P), nitrogênio (N₂), flúor (F), enxofre (S), cobre (Cu), magnésio (Mg), titânio (Ti) e diferentes combinações de átomos. Com base no tipo de material, a dopagem pode ser considerada como metal e não metal, por exemplo, *carbon dots* baseados em glicose de nitrogênio (NGCD) ou *carbon dots* N-funcionalizados (Ezati et al., 2022).

5 CARBON DOTS EM EMBALAGENS DE ALIMENTOS

As propriedades de muitos materiais podem ser melhoradas com a adição de nanocompósitos durante o seu desenvolvimento, isso devido a sua superioridade eletrônica, características ópticas, térmicas e mecânicas (Espitia et al. 2012). No caso das embalagens de alimentos, o *carbon dot* em específico ganha notoriedade pois pode ajudar a desenvolver novos filmes biodegradáveis, antiultravioleta, antibacterianos, antioxidação e biocompatíveis, mantendo o frescor e aumentando o prazo de validade dos alimentos (Zhao et al. 2022), proporcionando propriedades químicas, físicas e mecânicas.

A adição de CDs em filmes e revestimentos para alimentos pode aumentar a sua propriedade de barreira à luz sem afetar a permeabilidade ao vapor de água, propriedades mecânicas e ângulo de contato com a água. Esse composto gera espécies reativas de oxigênio por exemplo, que têm um ótimo efeito antibacteriano e antifúngico e como complemento ainda pode aumentar a resistência à tração e o módulo de elasticidade do filme (Deepika, Kumar, e Gaikwad 2023). A natureza dessas alterações depende do tipo, forma e dimensões das nanoestruturas, da quantidade e do método de incorporação, assim como da compatibilidade entre o polímero e o nanomaterial. A distribuição uniforme de CDs nos locais internos da camada do biopolímero é a principal causa do aumento nas interações intermoleculares e, assim, na melhora da resistência à tração (Mirtalebi, Almasi, e Alizadeh Khaledabad 2019).

Devido a tantas características promissoras, os *carbon dots* possuem grande potencial para serem aplicados em diversas áreas do setor alimentício, como embalagens e coberturas ativas e inteligentes, aditivos para aumentar a vida útil dos alimentos e proporcionar valor agregado ao produto e segurança alimentar.

A Tabela 1 mostra a aplicação em filmes de embalagens contendo *carbon dots* sintetizados a partir de fontes de materiais naturais de carbono por via hidrotérmica. A partir dela, é possível verificar que a adição de *carbon dots* proporciona diferentes aplicabilidades principalmente relacionadas a propriedade de barreira à luz do filme, efeito antibacteriano, atividade antifúngica, biocompatibilidade e indicadores para embalagens inteligentes.

As propriedades fotoluminescentes dos CDs podem também ajudar no combate a falsificações, uma vez que os CDs emitem uma fluorescência específica, dificultando assim a imitação de embalagens e facilitando na identificação quando essas falsificações acontecem. As aplicações de CDs como biossensores na qualidade alimentar e detecção de segurança também ganham forças ao incluir detecção de substâncias, nutrientes, pesticidas, aditivos proibidos ou limitado, microrganismos patogênicos e toxinas microbianas (Qu, Wei, e Sun 2018). Além disso, a utilização de CDs abre caminho para a análise de patógenos através de bioimagem, provando ser agentes potenciais para imagens multicoloridas de células com altos sinais fluorescentes, o que permite seu uso em aplicações tanto de bioimagem quanto optoeletrônicas (Bhamore et al. 2019).

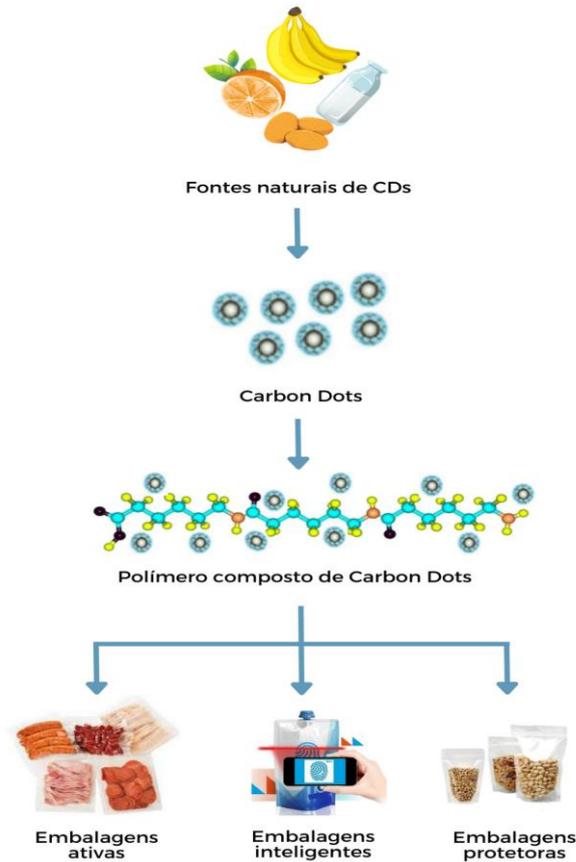
A partir dessas promissoras propriedades, a aplicação de CDs no setor alimentício, principalmente em composição de embalagens, está ganhando força e abrindo espaço para grandes desenvolvimentos na área. Na figura 3 é possível ver a incorporação de CDs em polímero, abrindo assim a possibilidade de termos embalagens ativas, inteligentes ou com melhores revestimentos.

Tabela 1 - Aplicações de CDs em embalagens para alimentos utilizando materiais naturais como fontes de carbono e suas aplicações.

Precursor de CDs	Filme polimérico	Aplicação	Principais Resultados	Referência
Acerola	Poli (álcool vinílico)	Sensores fluorescentes para detecção de íons metálicos	O filme compósito apresentou uma redução visível na fluorescência sob luz UV quando íons de ferro foram adicionados.	(Carvalho et al. 2019)
Bactérias Láticas	Nanocelulose bacteriana	Barreira UV, elasticidade, antibacteriano e fotoluminescentes	CDs na concentração de 500 mg mL ⁻¹ exibiu atividade antibacteriana contra bactéria gram-negativa e gram-positiva e mostrou fluorescência e barreira à luz UV.	(Kousheh et al. 2020)
Pó de Café	Gelatina/poli (álcool vinílico) / extrato de semente de toranja	Proteção UV, antioxidante e antibacteriano	O filme aumentou a vida útil da carne suína, reduzindo o crescimento bacteriano de <i>Listeria monocytogenes</i> na carne em 2 Log UFC/mL abaixo do filme de embalagem controle.	(Min et al. 2023)
Casca de Batata	Gelatina	Barreira UV, antioxidante e antimicrobiana	O filme apresentou forte atividade antioxidante e antimicrobiana com baixa citotoxicidade, já que mais de 80% das células L929 de fibroblastos de camundongo sobreviveram mesmo quando expostas a 500 µg/mL por 72 horas.	(Min, Ezati, e Rhim 2022)
Casca de Tangerina	Aplicada em papel de filtro Whatman No. 42	Indicadores biocompatíveis para monitoramento de frutos do mar	Indicador baseado em papel de CDs exibiu uma impressionante mudança de cor de amarelo para marrom durante a detecção de vapor de amônia.	(Ezati, Khan, e Rhim 2023)
Resíduos de chá	Álcool polivinílico	Barreira UV, flexibilidade e resistência	O filme contendo 3mg de CDs foi testando uvas e bloqueou 100% a região UV-C (230-280 nm) e UV-B (280-315 nm), enquanto 20-60% da região UV- A (315-400nm).	(Patil et al. 2020)
Casca de Pomelo	Gelatina/alginato dialdeído	Antioxidante, antimicrobiana, barreira UV	CDs em concentração de 3% apresentou capacidade antioxidante com eliminação de radicais de 91,71% para DPPH 100% para ABTS, mas também exibiu excelente capacidade antimicrobiana contra bactérias e fungos.	(Li et al. 2023)
Glicose e ureia	Alginato	Barreira UV, barreira a oxigênio, antioxidante e antimicrobiana.	Melhora de 19,8% na propriedade de barreira de oxigênio e as propriedades de barreira UV, antioxidantes e antibacterianas dos filmes ativos aumentaram em 50,0%, 61,1% e 70,1%, respectivamente.	(Mao et al. 2023)

Fonte: Autora (2023)

Figura 3 - CDs como agentes de revestimento, agentes ativos e inteligentes em embalagens.



Fonte: Autora (2023)

5.1 EFEITO DOS *CARBON DOTS* NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E ÓPTICAS DA EMBALAGEM

As propriedades físicas e ópticas das embalagens desempenham um papel crucial na preservação da qualidade e segurança dos alimentos. No contexto das embalagens de alimentos, a incorporação de *carbon dots* oferece oportunidades empolgantes para aprimorar e otimizar essas características tendo um impacto significativo na eficácia dessas embalagens. Esta seção destaca as propriedades mecânicas e barreiras à luz ultravioleta e a gases de filmes poliméricos incorporados de CDs utilizados em embalagens para alimentos.

5.1.1 Propriedades mecânicas

A barreira mecânica desempenha um papel fundamental na eficácia das embalagens de alimentos, influenciando diretamente o comportamento do filme durante todas as etapas da cadeia de suprimentos, desde a produção até o consumo final. A embalagem atua como uma defesa contra as variadas cargas mecânicas externas que os produtos alimentícios enfrentam

durante seu trajeto, desde o processo de fabricação até o armazenamento, transporte e distribuição. Nesse contexto, as propriedades mecânicas de filmes de embalagem são de extrema importância, e a incorporação de *carbon dots* em polímeros biodegradáveis têm emergido como uma estratégia promissora para aprimorar essas propriedades e, conseqüentemente, melhorar a eficácia das embalagens de alimentos.

Características como resistência à tração e módulo de elasticidade desempenham um papel crítico na capacidade da embalagem de resistir a forças mecânicas. A adição estratégica de CDs a esses materiais poliméricos resulta na formação de filmes compostos para embalagens de alimentos, cujas propriedades mecânicas são aprimoradas de forma notável. Além disso, o uso de filmes mais finos, sem comprometer a integridade mecânica, apresenta a vantagem de reduzir o custo e a quantidade de material empregado nas embalagens (Qu et al. 2018), tornando-se uma abordagem mais sustentável. Em geral, as propriedades mecânicas como resistência à tração, alongamento de ruptura e módulo de elasticidade dos filmes compósitos dependem do tipo de matriz polimérica, do tipo e conteúdo das cargas utilizadas, da distribuição das nanopartículas dentro da matriz polimérica e da compatibilidade entre elas (Ezati, Riahi, e Rhim 2022).

O estudo de Roy et al. (2021) mostra o efeito da adição de *carbon dots* obtidos a partir de cogumelo Enoki no filme de gelatina/carragenina. A espessura e a resistência à tração do filme era de $54,5 \mu\text{m}$ e $52,8 \text{MPa}$, respectivamente, antes da incorporação dos CDs. Após a adição dos CDs observou-se um aumento significativo principalmente na resistência à tração, atingindo $81,2 \text{MPa}$ e uma espessura de $61,4 \mu\text{m}$ devido ao aumento do teor de sólidos, aumentando assim a sua densidade. Acredita-se que a alta resistência do filme se deva à boa interação intermolecular entre os dois biopolímeros. O grupo $-\text{OH}$ da carragenina e o grupo carboxila desprotonado ($-\text{COO}^-$) da gelatina podem fazer uma forte interação para formar uma ligação éster (Bohidar et al. 2011). A adição de CDs melhorou significativamente a resistência à tração devido à interação interfacial (eletrostática) entre os CDs e a matriz polimérica (gelatina e carragenina). Por outro lado, a adição de CDs também afeta significativamente o alongamento à ruptura, aumentando linearmente, enquanto o módulo de elasticidade diminui linearmente com o aumento na concentração de CD, dessa forma, é notório que ao adicionar os CDs o filme se tornou mais rígido e quebradiço.

No estudo desenvolvido por Riahi et al. (2022), a adição de CDs aumentou significativamente a resistência à tração (em até 27,6%) e o módulo de elasticidade (em até 61,5%) do filme de carboximetilcelulose (CMC). Porém, o alongamento à ruptura do filme

diminuiu ligeiramente. Estes resultados indicam que o filme CMC se torna mais forte e rígido com flexibilidade reduzida pela adição de CDs. A resistência mecânica do filme de CMC foi aumentada mesmo quando CD foi adicionado até 5% em peso, o que pode ser atribuído à distribuição uniforme de CDs na matriz polimérica devido às suas propriedades hidrofílicas e pequeno tamanho. Além disso, a ligação de hidrogênio entre os grupos hidroxila de CDs e CMC pode melhorar a interação entre eles, aumentando a resistência do filme através da melhor distribuição de carga do polímero devido ao alinhamento induzido por deformação (Riahi et al. 2022).

Ezati, Rhim, Molaei, e Rezaei (2022) sintetizaram CDs usando glicose como fonte de carbono para preparar filmes compósitos à base de quitosana/gelatina e mostraram que a espessura do filme não foi significativamente alterada pela adição de CDs, o que pode ser devido à distribuição uniforme de baixa concentração de CDs, que possui tamanho pequeno em relação à matriz polimérica. A adição de CDs aumentou ligeiramente a resistência à tração dos filmes e reduziu o módulo de elasticidade, indicando que os filmes se tornaram relativamente mais fortes e mais rígidos. Em outro trabalho de Ezati, Rhim, Molaei, Priyadarshi, et al. (2022), para filmes à base de nanofibras de celulose, a incorporação de CDs também não modificou a espessura dos filmes, confirmando a facilidade de distribuição uniforme dos CDs na matriz polimérica. Já os testes de tração indicaram que houve um relativo aumento no módulo de tração (73,3 a 75,2 Mpa), assim como no módulo de alongamento do filme (3,8 a 3.9%) tendo por outro lado uma ligeira redução na elasticidade do filme (6,3 à 6.2 GPA), indicando que o filme de nanofibras de celulose são relativamente fortes e rígidos com menor flexibilidade.

Em outro estudo, foi relatado que a adição de pontos de carbono sintetizados por bactérias do ácido láctico ao filme à base de nanocelulose aumentou extensivamente o alongamento de ruptura e reduziu significativamente a resistência à tração após a impregnação em 500 mg mL⁻¹ de CDs, que consiste em submergir a membrana na solução de CDs filtrados. A capacidade de carga superior da nanocelulose, o método de impregnação e a dispersão heterogênea de CDs desempenham uma função principal nesta redução, isso porque esse processo pode resultar em uma concentração mais elevada de *carbon dots* nas camadas superficiais do filme polimérico em comparação com o interior, dependendo das condições de impregnação. Por outro lado, o valor melhorado do alongamento do filme composto pode estar intimamente ligado à presença de exopolissacarídeo e ácidos graxos nos pós-bióticos de bactérias lácticas, uma vez que esses materiais apresentam atividade plastificante e fortalecem a extensibilidade do filme (Kousheh et al. 2020). Dessa forma, embora os CDs diminuam a

flexibilidade dos filmes na maioria dos casos, uma alternativa é adicionar mais plastificante à formulação. A Tabela 2 traz alguns exemplos do impacto nas propriedades mecânicas de embalagens quando adicionado CDs na matriz composta sintetizados a partir do método hidrotérmico.

Tabela 2 - Comparação das propriedades mecânicas de filmes à base de biopolímeros incorporados de Carbon Dots sintetizados a partir de fontes naturais.

Precursor de CDs	Filme polimérico	Espessura		Elasticidade		Resistência à tração		Alongamento		Referência
		Filme controle	Filme compósito	Filme controle	Filme compósito	Filme controle	Filme compósito	Filme controle	Filme compósito	
Cogumelo Enoki	Gelatina/Carragenina	54.5 μm	61.4 μm	3.1 GPa	0.8 GPa	52.8 MPa	81.2 MPa	3.9%	6.4%	(Roy et al. 2021)
Quitosana	Carboximetilcelulose	58.3 μm	61.3 μm	1.3 GPa	2.1 GPa	30.7 MPa	39.2 MPa	6.4%	4.7%	(Riahi et al. 2022)
Glicose	Quitosana/Gelatina	51.8 μm	52.9 μm	2.8 GPa	2.5 GPa	79.5 MPa	82.3 MPa	7.3%	8.2%	(Ezati, Rhim, Molaei, e Rezaei 2022)
Glicose	Nanofibras de celulose	32.5 μm	32.8 μm	6.3 GPa	6.2 GPa	73.3 MPa	75.2 MPa	3.8%	3.9%	(Ezati, Rhim, Molaei, Priyadarshi, et al. 2022)
Bactérias Lácticas	Nanocelulose bacteriana	–	–	–	–	6,75 MPa	0,01 MPa	1,03%	67,67%	(Kousheh et al. 2020)
Cúrcuma	Pectina/gelatina	–	–	2.0 GPa	2.3 GPa	55,3 MPa	60,0 MPa	8.9%	6,4%	(Ezati, Roy, e Rhim 2022)
Casca de Batata	Gelatina	62,3 μm	69,5 μm	2,8 GPa	1,7 GPa	60,7 MPa	50,3 MPa	12,2%	11,3%	(Min et al. 2022)

Fonte: Autora (2023)

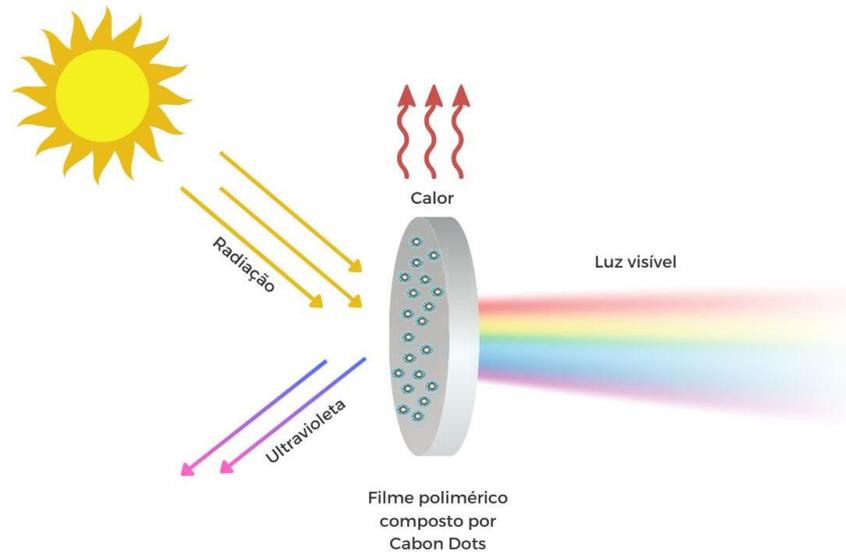
5.1.2 Barreira à luz ultravioleta

As características de barreira de uma embalagem são de fundamental importância para preservar a frescura, os valores nutricionais e a qualidade dos produtos alimentícios. Barreiras como a resistência à refração da radiação ultravioleta (UV), a permeabilidade ao vapor de água e as barreiras contra gases desempenham um papel crítico na proteção dos alimentos contra a influência do ambiente externo.

A radiação UV em alimentos pode resultar na degradação de nutrientes essenciais e afetar adversamente a qualidade geral dos produtos. Produtos alimentícios enriquecidos com vitamina B2, como produtos lácteos, são especialmente suscetíveis à perda de nutrientes quando expostos à radiação UV (Hess et al. 2017). A influência da radiação UV não se limita aos nutrientes; ela também afeta o óleo presente em muitos alimentos. A oxidação do óleo pode levar a mudanças na cor dos produtos alimentícios e à redução das concentrações de vitaminas, como a vitamina C e a vitamina D, nos alimentos (Passaretti et al. 2019).

Os *carbon dots* destacam-se por suas excelentes propriedades de barreira e sua capacidade de resistir à radiação UV, a qual pode ser dividida em três regiões de banda: UVA (320–400 nm), UVB (320–280 nm) e UVC (280–100 nm). Quando incorporados em embalagens de alimentos, esses nanomateriais desempenham um papel vital na proteção contra os efeitos adversos da radiação UV. Os *carbon dots* possuem propriedades notáveis de dispersão e adsorção, o que lhes permite converter instantaneamente a energia do fóton UV em calor e em seguida, causar perda de energia devido à acentuada conversão, funcionando assim como agentes de barreira UV ativos (Salimi et al. 2021). Esse processo envolve a absorção do fóton pela molécula de CDs que leva a formação de um estado eletronicamente excitado, onde há a promoção de um elétron para um estado excitado, o qual permanece neste estado por uma fração infinitamente pequena de tempo e volta para o estado fundamental novamente. É durante esse processo de relaxamento eletrônico que parte da energia absorvida é dissipada na forma de calor (Vaz et al. 2015). Isso significa que os CDs podem ser utilizados eficazmente para salvaguardar a integridade dos alimentos embalados, especialmente aqueles sensíveis à luz como alimentos ricos em lipídeos, óleos essenciais e pigmentos naturais como antocianinas e carotenoides, visto que a maioria dos polímeros permite a passagem da luz UV (Zhao et al. 2022). A Figura 4 representa o mecanismo de barreira UV quando os *carbon dots* são incorporados em embalagens.

Figura 4 - Mecanismo de barreira UV de filmes poliméricos incorporados de CDs.



Fonte: Autora (2023)

Kousheh et al. (2020) relataram que ao incorporar CDs oriundos de bactérias ao filme de nanocelulose tiveram o aumento das propriedades de bloqueio de luz UV do filme compósito, concluindo que à medida que a quantidade de CDs no filme de nanocelulose aumenta, o domínio bloqueador de luz se expande. A transmitância registrada para a membrana de nanocelulose com capacidade de carga de CDs de $15,11 \pm 2,47 \text{ mg cm}^{-2}$ foi $< 1\%$ em $< 548 \text{ nm}$.

As propriedades de transparência e barreira UV foram avaliadas na adição de CDs à base de cogumelo Enoki em filme de gelatina/carragenina. Considerando a transmitância de luz de 660 nm a 280 nm , o filme puro de gelatina/carragenina apresentou alta transparência à luz visível e transmitância relativamente baixa à luz UV, que pode ser atribuída à propriedade de barreira UV da gelatina. A adição de CDs não alterou significativamente a transmitância da luz para a luz visível, mas diminuiu significativamente para a luz UV. A transmitância de luz de 660 nm do filme gelatina/carragenina não foi alterado significativamente pela adição de CDs, enquanto a transmitância de luz de 280 nm diminuiu significativamente, mostrando uma diminuição exponencial com o aumento da concentração de CD. Como resultado, a adição de CDs aumentou significativamente as propriedades de bloqueio de UV do filme gelatina/carragenina (Roy et al. 2021). Isso é um resultado promissor para o desenvolvimento de embalagens que permitam que o consumidor possa visualizar o produto dentro dela sem comprometer a sua qualidade.

Riahi et al. (2022) mostraram que o filme de carboximetilcelulose (CMC) possui transmitância de luz UV e visível relativamente alta, com transmitância em 280nm e 660nm (T660nm) de 61,1% e 84,2%, respectivamente e que as propriedades de bloqueio de UV do filme aumentaram em aproximadamente 80%, 99% e 100% pela adição de 1,0, 3,0 e 5,0% em peso de CDs, respectivamente. Por outro lado, a transparência (T660nm) do filme não foi significativamente alterada, provavelmente porque o tamanho do CD (<10 nm) era muito menor que o comprimento de onda da luz (660nm), o que não interferia na transmissão da luz. Como resultado, ele também concluiu que a adição de CDs aumentou significativamente as propriedades de bloqueio de UV sem sacrificar a transparência do filme CMC.

No trabalho de (Patil et al. 2020), foi utilizado CDs à base de resíduo de chá em filme de álcool poli vinílico (PVA) como agentes bloqueadores de luz UV. O perfil de transmitância foi representado para o PVA puro e PVA composto por CDs com concentração crescente de 0,5, 1,0, 2,0, 3,0, 5,0 mg no estado sólido. Observou-se que, para o filme PVA puro, há um máximo de transmitância de 87% de transmissão de luz UV na região de 200-400 nm, sendo capaz de absorver um pouco da região UV-C (230-280 nm). Por outro lado, com a adição dos CDs, ocorre uma mudança drástica na absorção de UV, aumentando a capacidade de bloqueio, sendo capaz de reduzir a transmissão de luz do UV-C (230-280 nm), UV-B (280-315 nm) e alguma parte do UV-A (315-400 nm). A partir de 3,0 mg de CDs já foi possível absorver quase 100% da luz UV-B e UV-C e entre 20-60% da luz UV-A, sem haver muita diferença para a concentração de 5,0 mg de CDs.

5.1.3 Permeabilidade ao vapor de água e ângulo de contato com a água

A permeabilidade ao vapor de água e o ângulo de contato com a água de filmes de biopolímero são usados para determinar as propriedades de barreira ao vapor de água e a hidrofobicidade/hidrofilicidade do filme, respectivamente (Rhim e Wang 2014). A permeabilidade ao vapor de água expressa a capacidade de difusão do vapor de água de uma membrana, neste caso um filme polimérico. Quanto menor a permeabilidade, mais eficaz é o filme como barreira contra a umidade. Por outro lado, o ângulo de contato com a água é uma medida da molhabilidade da superfície do filme. Em superfícies de biomateriais, a hidrofobicidade resulta em ângulos de contato com a água superiores a 65°, enquanto as

superfícies hidrofílicas tendem a exibir ângulos de contato com a água inferiores a 65° (Vogler 1998) o que significa maior interação química da água com a superfície do material (polar).

Riahi et al. (2022) mostraram que o ângulo de contato com a água do filme de carboximetilcelulose aumentou significativamente pela adição de CDs de $37,7^\circ$ para $50,2^\circ$ para uma concentração de 5,0% de CDs em relação à massa de CMC. As ligações de hidrogênio formadas entre o polímero e os CDs competem com as interações entre os grupos hidroxila da CMC e as moléculas de água, reduzido a hidrofílicidade da superfície e aumentando o ângulo de contato (Zabihollahi et al. 2020). Esses resultados corroboram a diminuição de elasticidade de filmes biopoliméricos com a adição de CDs. A água exerce um efeito plastificante nas matrizes, e uma vez que são repelidas pela estrutura compósita, o resultado é a formação de compósitos mais rígidos e quebradiços. Já a permeabilidade ao vapor de água dos filmes puros foi de $1,42 \times 10^{-9} \text{ gm/m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$, enquanto a permeabilidade dos filmes com CDs foi significativamente menor ($1,29 \times 10^{-9} \text{ gm/m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$). Embora os CDs sejam hidrofílicos, a distribuição uniforme da matriz polimérica cria um caminho tortuoso para a difusão do vapor de água, reduzindo a permeabilidade do filme compósito (Rhim e Wang 2014).

Em contrapartida, no estudo de Min et al. (2022) ao adicionar CDs (4% em peso) oriundos da casca de batata em filme de gelatina, houve um aumento significativo na permeabilidade ao vapor de água do filme composto, passando de $7,7 \times 10^{-9} \text{ gm/m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$ para $9,9 \times 10^{-9} \text{ gm/m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$, enquanto o ângulo de contato com a água diminuiu de $70,7^\circ$ para $61,5^\circ$. A diminuição da barreira ao vapor e redução do ângulo de contato com a água do filme compósito pode estar associada ao aumento dos grupos funcionais hidrofílicos de superfície dos CDs oriundos da casca de batata ao interagir com o filme de gelatina. Assim, é possível concluir que o caráter hidrofílico do filme compósito depende da concentração de CDs e sua interação com os polímeros naturais.

5.1.4 Permeabilidade ao oxigênio

Para alcançar uma vida útil máxima de armazenamento em alguns alimentos, é essencial minimizar a sua exposição ao oxigênio, pois isso pode acarretar a oxidação de diversos compostos, reduzindo a qualidade do alimento.

No trabalho de Ezati, Rhim, Molaei, Priyadarshi, et al. (2022), a adição de CDs em filmes à base de nanofibras de celulose, tendo a glicose como fonte de carbono, reduziu a taxa

de transmissão de oxigênio do filme de 5,08 para 0,01 $cm^3/m^2\text{dia}$. Foi concluído que as propriedades melhoradas de barreira ao oxigênio do filme compósito podem ser devidas à ligação interfacial adicional entre os CDs provenientes da glicose com o filme à base de nanofibras de celulose, que fornece uma estrutura mais densa com volume livre reduzido.

Mao et al. (2023) adicionaram CDs dopados com nitrogênio usando glicose e uréia pelo método hidrotérmico em filme ativo a base de alginato e obtiveram uma melhora de 19,8% na propriedade de barreira de oxigênio em comparação com o filme puro, isso pode ser atribuído ao aprimoramento da afinidade entre as nanopartículas e a matriz polimérica graças à presença dos CDs, resultando na redução do espaço intercadeias na estrutura do polímero, o que, por sua vez, dificulta a penetração das moléculas de gás.

No trabalho de Wen et al. (2023) ao combinarem CDs oriundos de cúrcuma via método hidrotérmico em uma matriz de quitosana obtiveram uma redução de aproximadamente 25% na taxa de transmissão de oxigênio conforme houve aumento no teor de CDs. Essa diminuição pode ser explicada tanto pelo aumento da espessura do filme quanto pela maior compactação das moléculas causado pela introdução dos CDs, o que dificulta a permeação do gás oxigênio pelos poros do filme. Como resultado, a capacidade de barreira do filme contra gases é aprimorada. Dessa forma, é concluído que o filme ajuda a regular as trocas gasosas da embalagem com o meio ambiente, retardando o amadurecimento e a deterioração ao controlar as taxas de respiração.

5.2 EFEITO DOS CARBON DOTS NAS PROPRIEDADES ATIVAS E INTELIGENTES DA EMBALAGEM

A revolução nas embalagens vai muito além do simples envolvimento físico dos produtos. As embalagens ativas representam um avanço significativo, interagindo de forma dinâmica e benéfica com os produtos que protegem. Elas desempenham um papel químico ou biológico essencial, proporcionando uma série de vantagens, como a prevenção do crescimento microbiano, a preservação da qualidade e do frescor dos alimentos, a extensão da vida útil e até mesmo a capacidade de fornecer informações em tempo real sobre a condição do produto.

5.2.1 Atividade antioxidante

Uma das aplicações de embalagens ativas é o uso de materiais de embalagem funcionais adicionados de substâncias funcionais para fornecer funções antioxidantes para

inibir alterações químicas ou biológicas adversas em alimentos embalados para manter a qualidade e garantir a segurança. Atualmente, uma série de CDs, como GQD, CDs dopados com selênio, CDs dopados com nitrogênio e CDs dopados com cloro são amplamente utilizados como antioxidantes para reduzir espécies reativas de oxigênio (Deepika et al. 2023).

Riahi et al. (2022) investigaram pelos métodos de capacidade de remoção de radical orgânico ABTS (2,20-azino-bis (ácido 3-ethylbenzthiazoline-6-sulfônico)) e de peroxidação do DPPH (2,2-difenil-1-picrylhydrazil) as propriedades antioxidantes dos filmes à base de carboximetilcelulose ao adicionar CDs sintetizados a partir de quitosana. O filme de CMC puro apresentou leve atividade antioxidante, 8,1% para ABTS e 4,4% para DPPH. Com a adição de CDs essa atividade foi aumentada significativamente à medida que a concentração de CDs aumentou. Filmes de CMC com 3 e 5% de CDs em peso apresentaram 100% de atividade antioxidante no método ABTS, mas 87 e 88% no método DPPH, respectivamente. A maior atividade antioxidante avaliada pelo método ABTS foi atribuída à solução aquosa de ABTS, resultando em melhores interações entre radicais livres e CDs hidrofílicos. O método ABTS é baseado na habilidade dos antioxidantes em capturar o cátion ABTS⁺. Essa captura provoca um decréscimo na absorbância, que é lida a partir da mistura do radical com o antioxidante em diferentes tempos, sendo representadas graficamente. Este método apresenta vantagem em relação a outros, pois pode ser utilizado tanto para amostras hidrossolúveis quanto lipossolúveis. Com a adição de um antioxidante, ocorre a redução do ABTS⁺ a ABTS promovendo a perda da coloração azul esverdeada do meio reacional (Sucupira et al. 2012). Já o DPPH é um método químico, aplicado para determinar a capacidade antioxidante de um composto em sequestrar radicais livres, sendo um dos mais utilizados, pois ele é considerado um método rápido, prático e com boa estabilidade. O DPPH é um radical de nitrogênio orgânico, estável, de cor violeta, que possui absorção na faixa de 515-520 nm. A redução do radical DPPH é monitorada pelo decréscimo da absorbância durante a reação. O método de sequestro do radical livre DPPH pode ser utilizado para avaliar a atividade antioxidante de compostos específicos ou de um extrato em curto período. Na presença de um doador de hidrogênio ou elétron a intensidade de absorção diminui e a solução com o radical perde cor, tornando-se amarela, de acordo com o número de elétrons capturados, ou seja, quando o elétron desemparelhado do átomo de nitrogênio no DPPH recebe um átomo de hidrogênio proveniente de compostos antioxidantes, ocorre a mudança de cor (Sucupira et al. 2012).

A atividade antioxidante dos CDs que tiveram como precursor cogumelo Enoki em filme de gelatina/carragenina aumentou em 65% para ABTS, enquanto a atividade de eliminação de DPPH aumentou em 15% quando 1% em peso de CDs foram adicionados à matriz polimérica. Em comparação, a atividade de eliminação de radicais livres do filme puro de gelatina/carragenina foi de 5 e 7% para ensaios DPPH e ABTS, respectivamente. A atividade de eliminação de radicais livres aumentou à medida que a concentração de CDs aumentou, e o aumento na atividade do ABTS foi maior do que no DPPH. Isso ocorre pois os CDs são mais solúveis em uma solução aquosa de ABTS do que em uma solução de metanol de DPPH. A alta atividade antioxidante dos CDs pode ser devida à presença de grupos hidroxila superficiais dos CDs. Os radicais livres ABTS • e DPPH • podem ser reduzidos ou extintos pela transferência de H • dos grupos hidroxila dos CDs (Roy et al. 2021). Acredita-se que a alta atividade antioxidante dos CDs se deva à presença de numerosos grupos doadores de elétrons, como hidroxila, carboxila etc. (Son, Park, e Jung 2021).

Algo semelhante foi relatado por Ezati, Rhim, Molaei, e Rezaei (2022) ao utilizar CDs usando glicose como fonte de carbono em filme de quitosana/gelatina. A atividade antioxidante do filme puro foi de 16,1% e 2,8% para a eficácia de eliminação de ABTS e DPPH. No entanto, quando 1% em peso de CDs foi adicionado, a atividade de eliminação de ABTS do filme aumentou significativamente para quase 94,2%, e a capacidade de eliminação de DPPH aumentou para 65,4%. Ao adicionar 2% em peso de CDs a atividade antioxidante do filme foi aumentada para 98,1% e 74,7% nos ensaios ABTS e DPPH. A atividade antioxidante do filme adicionado de CD foi maior no método ABTS do que no método DPPH porque a hidrofiliabilidade do filme quitosana/gelatina causou uma liberação mais rápida de CDs da solução aquosa ABTS.

No trabalho de Min et al. (2023) a atividade antioxidante foi analisada ao adicionar CDs sintetizados a partir de pó de café em filme de gelatina/poli(álcool vinílico) e comparado com um adicional de extrato de semente de toranja ao filme compósito. O filme puro apresentou atividade antioxidante de 5,8% para o método DPPH e 35,6% para ABTS, resultado esse que pode ser atribuído aos grupos amino livres da molécula de gelatina que possuem atividade eliminadora de radicais livres. Conforme aumentava a concentração de CDs no filme a atividade antioxidante foi melhorada significativamente, mesmo na concentração de apenas 50 µg/mL de CD a atividade foi de 71,5% para ABTS e 32,5% para DPPH. Já ao atingir 200 µg/mL de CD a atividade foi de 100% para ABTS e 90% para DPPH. Ao adicionar no filme puro o extrato de semente de toranja a atividade antioxidante melhorou, porém não tanto quando comparado com

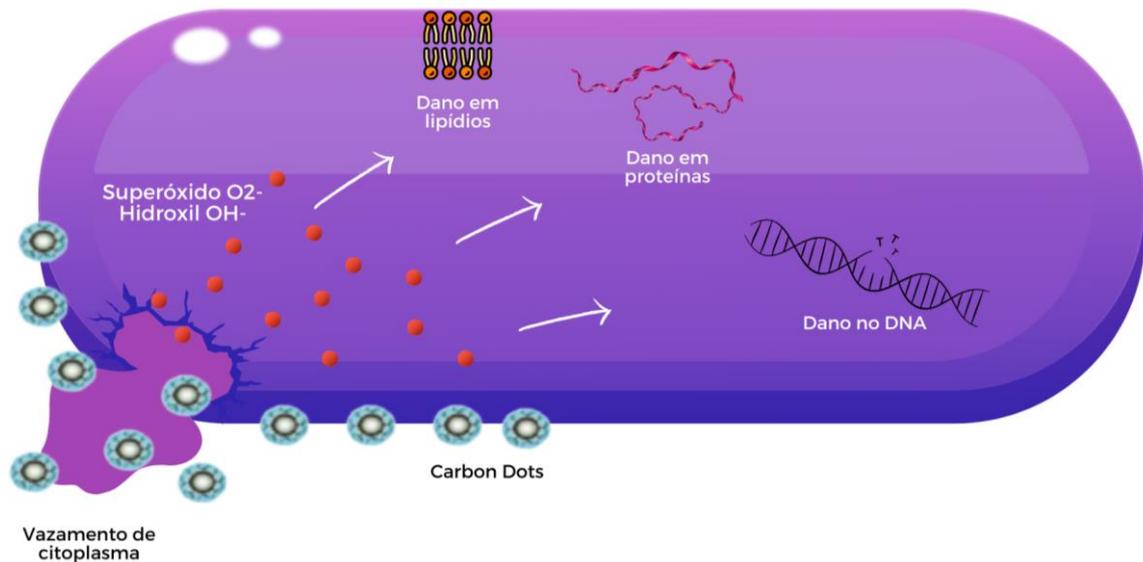
a adição dos CDs, o que reforça a potente ação antioxidante dos CDs. A atividade antioxidante do extrato de semente de toranja foi atribuída aos flavonoides encontrados na solução enquanto a atividade antioxidante dos CDs ocorre devido à alta presença de hidroxilas, responsáveis por neutralizar os radicais livres. Da mesma forma que os estudos citados anteriormente, o CD apresentou maior atividade antioxidante no método ABTS do que no método DPPH pela maior facilidade de liberação na solução aquosa de ABTS pela hidrofiliabilidade do filme compósito. O estudo também investigou o efeito sinérgico das atividades antioxidantes de CDs e do extrato de semente de toranja ao adicioná-los juntos ao filme de gelatina/poli(álcool vinílico), o que resultou em uma excelente atividade antioxidante eliminando >38% de radicais DPPH e 100% de radicais ABTS. Com isso é possível concluir que a ação antioxidante dos CDs pode ser ainda maior ao combiná-los com outros compostos.

5.2.2 Atividade antimicrobiana

Compreender os efeitos antimicrobianos dos CDs é essencial para aprimorar a segurança alimentar. Os CDs provenientes de diversas fontes demonstram propriedades antimicrobianas abrangentes, capazes de atuar contra uma ampla variedade de patógenos de origem alimentar e microrganismos responsáveis pela deterioração. Contudo, a eficácia antimicrobiana dos CDs é intrinsecamente influenciada por fatores como sua morfologia, tamanho, carga superficial e a presença de grupos funcionais específicos (Das Purkayastha et al. 2014). A implementação bem-sucedida dessas propriedades ocorre por meio da incorporação direta de CDs nas embalagens de produtos, por meio da aplicação de revestimentos ou pela adição dessas nanoestruturas à composição da embalagem em si. A ação antimicrobiana dos CDs ocorre por mecanismos diversos, incluindo a indução de vazamento citoplasmático, danos à estrutura celular e a geração de espécies reativas de oxigênio. Após a ligação dos CDs à superfície dos microrganismos, os CDs induzem espécies reativas de oxigênio por meio da transferência de moléculas de oxigênio. Esse processo culmina na formação de íons O_2^- (radical superóxido) e OH^- (radical hidroxil), provocando uma perturbação no equilíbrio entre os processos oxidativos e antioxidantes, o que resulta na deterioração de biomoléculas como proteínas e lipídios encontradas na parede celular dos microrganismos, levando, eventualmente, à lise celular (Jhonsi et al. 2018), dessa forma, com o acúmulo desses íons nas superfícies bacterianas há um aumento da permeabilidade da membrana, levando ao estresse oxidativo que

causarão a introdução de variações estruturais, desnaturação de proteínas, ruptura de enzimas e destruição de DNA, levando a consequente morte celular (Varghese e Balachandran 2021). Na figura 5 é possível observar o mecanismo de atividade antimicrobiana dos CDs no microrganismo.

Figura 5 - Mecanismo antimicrobiano dos CDs.



Fonte: Autora (2023)

O filme puro de Carboximetilcelulose não apresenta qualquer atividade antibacteriana. Porém, ao adicionar os CDs à base de quitosana ao filme, obteve-se uma atividade antibacteriana significativa contra *E. coli* e *L. monocytogenes*, a qual aumentou à medida que a concentração de CDs aumentou. O filme com menor concentração de CDs (1%) apresentou efeito bacteriostático contra ambas as bactérias ao final de 12 horas de incubação. Já o filme que possui concentração de 3% de CDs preveniu inteiramente o crescimento de *E. coli* e *L. monocytogenes* após 9 horas e 12 horas de incubação, respectivamente. Os filmes de CMC com maior concentração de CDs (5% em peso) interrompeu completamente o crescimento de ambas as bactérias após 3 horas de exposição (Riahi et al. 2022). Apesar das bactérias gram-negativas possuírem uma parede celular mais complexa, o filme adicionado de CDs exibiu atividade antimicrobiana superior contra *E. coli* do que contra *L. monocytogenes*, o que é atribuído à presença de camadas espessas e rígidas de peptidoglicano nas bactérias gram-positivas, que proporciona alta resistência ao ataque externo. Além disso, no estudo de (Zhang et al. 2023) a *E. coli* (bactéria gram-negativa) obteve aumento do potencial zeta negativo após o tratamento

de desinfecção eletroquímica dominado por $\cdot\text{OH}$, o que promove o processo de inativação, enquanto *Staphylococcus aureus* (bactérias gram-positiva) obteve diminuição do potencial zeta negativo, o que resultou em aglomeração significativa das mesmas, resultando no aumento da resistência às espécies reativas de oxigênio. Isso explicaria a diferença no tempo de inibição de uma bactéria para a outra.

Ainda no estudo de Riahi et al. (2022) o tamanho da zona de inibição do crescimento fúngico de bolores (*A. niger*, *P. chrysogenum*) foi proporcional à concentração de CDs adicionadas. Limões frescos foram revestidos com diferentes soluções de película e armazenados em condições ambientes (25°C, 50% de umidade relativa) durante 21 dias. No grupo controle (não revestido), a deterioração da fruta começou após 7 dias, já no limão revestido com o filme composto com CDs (3% em peso) o crescimento do bolor aparece na superfície do limão somente após 21 dias.

No estudo de Li et al. (2023) filmes funcionais de gelatina/alginato e dialdeído reticulados com escamas de peixe foram incorporados com CDs derivados de resíduos de casca de pomelo e resultados semelhantes ao de Riahi et al. (2022) foram obtidos. Com uma baixa concentração de CDs (1% em peso), o filme compósito conseguiu impedir o crescimento das bactérias após 3 e 6 horas de incubação. Além disso, demonstrou ter um efeito bactericida contra *E. coli* após 9 horas de incubação e contra *L. monocytogenes* após 12 horas de incubação. Por sua vez, o filme 3% de concentração de CDs inibiu completamente o crescimento de *E. coli* após 6 horas e o crescimento de *L. monocytogenes* após 9 horas. É importante notar que os filmes com 5% e 7% em peso de CDs foram ainda mais eficazes, eliminando a maioria das duas bactérias testadas após apenas 6 horas de incubação, o que evidencia um poderoso efeito inibitório no crescimento bacteriano. Além disso, o resultado corrobora com a explicação dada no estudo de Zhang et al. (2023), o qual avalia a diferença do poder inibitório entre as bactérias gram-negativas e gram-positivas.

Continuando no estudo de Li et al. (2023) a atividade antifúngica também foi avaliada para *Penicillium palitans* (*P. palitans*) e *Aspergillus fumigatus* (*A. fumigatus*). O filme puro inicialmente demonstrou uma atividade antifúngica leve, com taxas de inibição de crescimento de cerca de 7,21% contra *P. palitans* e 8,42% contra *A. fumigatus*. No entanto, ao adicionar CDs aos filmes, foi notável uma atividade antifúngica mais significativa contra ambos os fungos, e essa atividade estava diretamente relacionada à quantidade de CDs presentes. Quando

o teor de CDs foi aumentado para 7% em peso, o filme compósito alcançou uma notável taxa de inibição de crescimento fúngico de 92,9% contra ambos os fungos.

Carbonos funcionalizados com determinados elementos podem potencializar a atividade antimicrobiana dependendo das suas características, como é o caso do filme compósito à base de nanofibras de celulose com CDs dopados de nitrogênio. O filme adicionado de N-CD apresentou um efeito de morte microbiana e inibiu inteiramente o crescimento de *A. flavus* após dois dias de incubação, indicando alta função antifúngica, enquanto o filme adicionado só de CDs mostrou um efeito apenas de redução do crescimento dos microrganismos de teste (Ezati, Rhim, Molaei, Priyadarshi, et al. 2022). Um efeito semelhante foi observado em filmes à base de pectina/gelatina ao adicionar CDs e S-CDs (CDs dopados de enxofre). O filme adicionado de CD reduziu o crescimento de *L. monocytogenes* e *E. coli* em cerca de 2 Log UFC/mL em comparação ao grupo controle ao final das 12 horas de exposição, enquanto o filme adicionado de CDs dopados de enxofre exibiu acentuada atividade antibacteriana contra ambas as bactérias de teste, resultando em uma diminuição no crescimento de 5 Log UFC/mL em comparação com o grupo controle após 12 horas de exposição. A atividade antimicrobiana mais forte do filme adicionado de S-CD é provavelmente devida a grupos funcionais específicos, como sulfonatos e ácidos sulfônicos, que se ligam ao grupo funcional -SH da enzima e geram estresse de espécies reativas de oxigênio que desnatura proteínas e lipídios (Ezati, Roy, e Rhim 2022).

Os filmes compósitos com CDs podem ser utilizados também como coberturas. Por exemplo, no trabalho de Ezati, Rhim, Molaei, Priyadarshi, et al. (2022), tangerina e morango foram revestidos com soluções de filme de nanofibras de celulose integrado com CDs funcionalizados com nitrogênio para testar a eficácia do material de revestimento no prolongamento da vida útil das frutas. Inicialmente, todas as frutas mantiveram uma aparência fresca, mas ao longo do armazenamento, os frutos não revestidos e aqueles com revestimento de filmes puros de nanofibras de celulose ou com CDs adicionados apresentaram crescimento de fungos na superfície, levando à deterioração da qualidade. Porém, filmes contendo CDs retardaram a deterioração das frutas. As frutas revestidas com o filme dopado de N-CDs mantiveram a qualidade aparente e não exibiram sinais de crescimento de fungos mesmo após 15 dias, graças à atividade antifúngica dos CDs dopados.

Embora a cobertura com CDs tenha apresentado alta atividade antimicrobiana, a potência desse efeito é dependente de vários fatores, como fonte de carbono, tamanho da partícula, morfologia, método de fabricação etc.

5.2.3 Indicadores para embalagens inteligentes

Na busca contínua por avanços nas embalagens ativas, uma direção promissora é aprimorar a capacidade de fornecer informações vitais sobre a qualidade e o frescor dos alimentos. Esse avanço resultou no desenvolvimento das chamadas embalagens inteligentes. Essas inovações são possíveis graças ao uso de tecnologias de detecção e rótulos inteligentes, que monitoram atentamente as mudanças nas condições ambientais no interior das embalagens (Zhao et al. 2022). Por exemplo, o frescor dos alimentos é indicado por meio de mudanças de cor em um rótulo inteligente aplicado ao recipiente, oferecendo uma maneira eficaz de garantir o monitoramento preciso da adequação dos produtos para consumo (Wu et al. 2021). Esta tecnologia aprimora o monitoramento dos alimentos com indicadores como de frescor, patógenos, vazamentos, dióxido de carbono, oxigênio, pH, tempo ou temperatura (Kuswandi et al. 2011). Quando o alimento não está mais em condições de ser consumido, podemos simplesmente observar a mudança de cor no indicador de filme e monitorar de forma precisa a data ideal para consumo. Isso desempenha um papel crucial na redução do desperdício de alimentos (Chen et al. 2018). O CD é considerado um candidato promissor para o desenvolvimento de novos nanosensores inteligentes para controle de qualidade de alimentos (Khan et al. 2023).

Rahman e Chowdhury (2022) demonstraram que filmes de goma guar/alginato de sódio incorporados de CDs de glicose/glicerol podem ser usados para detectar umidade relativa. O estudo demonstra que em diferentes condições de umidade relativa há uma alteração na fluorescência dos filmes compósitos sob luz UV, formando um ótimo sensor inteligente baseado nos mecanismos de fluorescência 'liga-desliga' contra a umidade. A diminuição da intensidade de fluorescência do filme nanocompósito ocorre enquanto a umidade relativa aumenta, e o contrário acontece quando a umidade diminuiu, a intensidade de fluorescência do filme nanocompósito aumenta. Assim, o filme nanocompósito pode monitorar a umidade relativa (UR), e indiretamente o frescor dos alimentos, pois é influenciado pela alteração da UR do produto e do ambiente (Rahman e Chowdhury 2022).

Xu et al. (2021) fabricaram um filme de nanofibras de silicone sensível ao oxigênio dopado com rutênio e CD funcionalizados com silano usando tecnologia de eletrofiliação para monitorar o frescor de produtos agrícolas armazenados, uma vez que a taxa de respiração do alimento é monitorada pela concentração de oxigênio ou gás carbônico dentro da embalagem. No teste de armazenamento de frutas, a cor fluorescente do filme de nanofibra variou com diferentes tempos de armazenamento. O filme compósito emitiu fluorescência azul no início do teste. No terceiro dia, a cor fluorescente mudou para púrpura causada pela respiração das uvas. Com o processo de respiração, a cor fluorescente tornou-se vermelho claro no 6º e 7º dia de armazenamento e não houve diferença significativa na cor, indicando que o oxigênio do frasco cônico havia se esgotado. Os resultados do estudo indicaram que o filme produzido com CDs pode ser usado para monitorar remotamente a respiração de produtos agrícolas embalados. Dessa forma, é perceptível que filmes incorporados com CDs são materiais com grande potencial para o monitoramento de alimentos que respiram durante o seu armazenamento.

Kilic et al. (2022) desenvolveram filmes colorimétricos de gelatina de peixe dopados com antocianinas e CDs funcionalizados com carboxila que foram sintetizados através da carbonização de ácido cítrico por um método assistido por micro-ondas para monitoramento do frescor de alimentos usando um aplicativo de smartphone. O filme tratado com UV e contendo 100 mg/l de CDs foi o que apresentou melhores resultados, se relacionando bem com o crescimento microbiano e a liberação de Nitrogênio Volátil Total em amostras de peito de frango sem pele. A cor dos filmes mudou de vermelho para verde quando expostos a um nível de amônia na faixa de 0 a 120 mg/100 g. Essa mudança na cor é de grande utilização pois durante a deterioração de alimentos ricos em proteínas são geradas aminas básicas voláteis, incluindo amônia, como resultado de atividades bacterianas e enzimáticas. A cor dos filmes no teste com o frango permaneceu quase igual ao vermelho tijolo durante os primeiros 5 dias. Já no dia 7 a cor tornou-se completamente verde, ultrapassando o nível crítico de TVB-N (Base Total de Nitrogênio Volátil) de 30 mg N/100 g segundo a Norma Turca de acordo com o estudo. Os valores de TVB-N foram inferiores a esse limite de rejeição nos primeiros 6 dias. Com o aplicativo “SmartFood”, foi possível determinar a quantidade e qualidade do alimento ao tirar uma foto do mesmo, mostrando tanto a concentração de gás amônia, quanto o estado de consumo “Bom apetite” ou “Inconsumível” conforme mostra a figura 8.

Figura 8 - Etapas para monitoramento colorimétrico da deterioração de alimentos no aplicativo.



Fonte: Kilic et al., (2022)

No estudo de Al-Qahtani et al. (2022) foi desenvolvida uma tinta fotocromica fluorescente de CDs dopados com nitrogênio que utilizaram resíduos de palha de arroz como precursor via método hidrotérmico para impressão digital de antifalsificação. A tinta foi impressa em folhas de celulose demonstrando uma aparência incolor com capacidade de mudar de cor sob luz UV. Sob a luz visível do dia, os filmes apresentaram uma cor esbranquiçada. Ao serem expostos sob a lâmpada UV, as camadas luminosas produziram uma cor azul fotocromica que desapareceu imediatamente após a remoção da lâmpada. Além disso, os testes realizados demonstraram que a tinta poderia ser impressa com facilidade, sem quaisquer efeitos tóxicos, apresentou rápida reversibilidade, resistência à fadiga e fotoestabilidade. Dessa forma, o filme pode ser aplicado sob condições ambientais em uma variedade de superfícies comerciais a fim de garantir um método de antifalsificação.

6 TOXICIDADE E MIGRAÇÃO DOS *CARBON DOTS* DA EMBALAGEM PARA O ALIMENTO

O avanço da nanotecnologia abriu novas perspectivas na indústria alimentícia, oferecendo soluções inovadoras como a melhoria da qualidade dos alimentos, a garantia da segurança alimentar, a redução do desperdício e o aumento da vida útil dos produtos (Zhao et al. 2022). Porém, para utilizar as nanopartículas em embalagens de alimentos, é necessário garantir a segurança através da investigação da citotoxicidade dessas nanopartículas assim como sua estabilidade sob condições de armazenamento e sua inércia no desempenho sensorial dos alimentos. A toxicidade é um indicador importante para medir o impacto potencial dos CDs na saúde dos consumidores e no meio ambiente.

Como as nanopartículas tradicionais utilizam metais pesados no processo de produção, elas apresentam alta toxicidade, o que pode limitar suas aplicações. Nesse cenário, as nanopartículas de carbono se sobressaem, pois além de possuírem propriedades de luminescência e características de tamanho nanométrico semelhantes aos pontos quânticos tradicionais, excelente solubilidade em água, propriedades antibacterianas e propriedades físico-químicas exclusivas, as quais já foram abordados nos tópicos anteriores, são de baixa toxicidade. Atualmente, a maioria dos estudos de toxicidade biológica indicaram que os CDs não causam alterações patológicas significativas após entrarem no organismo devido à boa biocompatibilidade, e podem ser descarregados através de vias metabólicas normais. Comparados aos pontos quânticos metálicos, os CDs apresentam maior segurança biológica para os organismos (Sun et al. 2022).

Roy et al. (2021) estudaram a toxicidade *in vitro* de CDs usando fibroblastos de camundongos. Os resultados do teste mostraram que os CDs do cogumelo Enoki tinham excelente biocompatibilidade, porque tinham citotoxicidade nula ou insignificante, dependendo da concentração. Resultado semelhante foi observado em CDs obtidos de precursores de quitosana, os quais mostraram uma citotoxicidade insignificante para células de fibroblastos de camundongos, mesmo em uma concentração de 500 µg/mL (Riahi et al. 2022), assim como foi observado também por (Ezati, Roy, e Rhim 2022) ao estudar a citotoxicidade de CDs derivados de cúrcuma.

O mesmo teste de viabilidade celular foi realizado em filmes compósitos à base de nanofibras de celulose (CNF) e incorporados de CDs e CDs funcionalizados com nitrogênio (N-CD) tendo a glicose como precursor. A viabilidade celular dos filmes CNF/CD e CNF/NCD diminuiu de 100 % para 87,2 e 84,2%, respectivamente. Vale ressaltar que mais de 84% das células sobreviveram por 72 horas. Dessa forma, foi concluído que os filmes testados

apresentam baixa toxicidade contra a linha celular de fibroblastos de camundongo, indicando citotoxicidade muito baixa e boa biocompatibilidade (Ezati, Rhim, Molaei, Priyadarshi, et al. 2022). Até o momento, as investigações de citotoxicidade de CDs indicaram que concentrações situadas na faixa de 10-100 µg/mL geralmente resultam em uma diminuição leve na viabilidade celular, em torno de 10-20%. Essa faixa de impacto na viabilidade celular demonstra ser apropriada tanto para fins de marcação e coloração celular (Ray et al. 2009), quanto para possíveis aplicações em embalagens de alimentos.

(Min et al. 2022) sintetizaram CDs via síntese hidrotérmica utilizando casca de batata. O teste de citotoxicidade mostrou que mais de 80% das células de fibroblastos de camundongo sobreviveram mesmo quando expostas a 500 µg/mL por 72 horas, concluindo que o filme de gelatina adicionados de CDs têm grande potencial como nanocarga de valor agregado, baixo custo, segura e funcional para a preparação de aplicações de embalagens.

Ghorbani et al. (2024) também avaliaram a citotoxicidade dos CDs sintetizados a partir de pós-bióticos de *Saccharomyces cerevisiae* e incorporados à membrana de celulose bacteriana. A toxicidade foi avaliada em linhagens celulares de câncer de cólon humano e de rim embrionário humano durante um período de exposição de 24 horas. As membras que possuíam CDs com capacidade de carga de 16,50 mg/cm³ e 22,50 mg/cm³ não apresentaram citotoxicidade significativa, mantendo a viabilidade celular acima de 80%, valor que é considerado um limite seguro para aplicações relacionadas a embalagens de alimentos e fins biológicos (Min et al. 2023).

Bi et al. (2017) demonstraram que os CQDs derivados de peixe grelhado apresentaram alta biocompatibilidade e baixa citotoxicidade para células osteoblásticas de camundongo, mesmo em alta concentração de 20 mg/mL. A maioria dos estudos atuais mostrou que os CDs não são tóxicos ou são pouco tóxicos. Dentro de uma faixa de concentração apropriada, os CDs não apresentam toxicidade óbvia para células humanas ou animais.

A taxa de liberação de CDs dos filmes gelatina/carragenina também foi avaliada por Roy et al. (2021) utilizando soluções simuladoras de alimentos, a qual dependeu da solução do simulador alimentar e da concentração de CD. As taxas de liberação de CDs em água e etanol a 95% e 50% foram consideravelmente menores em comparação com as de etanol a 10% e água. Ou seja, a taxa de liberação diminuiu à medida que a concentração de álcool aumentou. Além disso, ao aumentar a concentração de CDs de 1% para 5%, a taxa de liberação aumentou em todos os solventes simulados. Dessa forma, foi concluído que a taxa de liberação é afetada

pela solubilidade da matriz polimérica e pela afinidade entre o solvente e os CDs. A solução aquosa penetra prontamente na matriz hidrofílica de gelatina/carragenina devido à hidrofiliabilidade dos CDs, tornando-se suficientemente hidratada para formar uma estrutura mais aberta e liberar os CDs rapidamente. Em contraste, o álcool tem acesso limitado à matriz polimérica, o que resulta na retenção dos CDs e na redução da difusão e mobilidade na estrutura fechada (Roy et al. 2021). O mesmo resultado foi obtido por Ghorbani et al. (2024) incorporarem CDs em membrana de celulose bacteriana, à medida que a concentração de álcool na solução simulante aumentou, a taxa de liberação de CDs diminuiu, assim como em concentrações mais altas de CDs resultou em taxas de liberação mais altas. A taxa de liberação dos CDs com capacidade de carga de 22,50 mg/cm³ em solução de etanol a 50% foi próximo de 6 µg/cm³ após 24 horas de exposição e atingiu um estado estacionário após 4 horas, enquanto a de 95% etanol foi de 2 µg/cm³, a qual aumentou gradualmente após 4 horas de exposição.

Li et al. (2023) estudaram a migração de um filme compósito incorporado de CDs derivados de casca de pomelo em uma matriz de gelatina de escama de peixe/alginato dialdeído. A migração global foi feita em diferentes simuladores de alimentos (água simulando alimentos aquosos, 3% de ácido acético simulando alimentos ácidos, 50% de etanol simulando alimentos alcoólicos e *n*-hexano simulando alimentos lipídicos). A migração global no filme contendo 3% de CDs em peso foi a que apresentou valores mais baixos quando comparado com a concentração de 1, 5 e 7% (22,03 mg/kg para *n*-hexano, 112,06 mg/kg para ácido acético, 150,50 mg/kg para água e 165,60 mg/kg para etanol 50%). Isso pode ter acontecido devido a distribuição homogênea dos CDs na matriz biopolimérica, de forma a favorecer a formação de ligações de hidrogênio. Por outro lado, o aumento de CDs favorece a hidrofiliabilidade, aumentando a solubilidade do filme, fato que corrobora com os valores de migração obtidos, onde a migração para *n*-hexano foi muito mais baixa do que para a água como exemplo.

A liberação de nanopartículas das membranas é influenciada por diversos fatores, incluindo o grau de interações intermoleculares, o tamanho dos poros, a capacidade de absorção de umidade e a intensidade do entrelaçamento das nanopartículas. Além disso, o solvente em soluções simuladas também desempenha um papel significativo nesse processo.

As referências mencionadas anteriormente sugerem que a adição de CDs em filmes de embalagem provavelmente não representa uma preocupação significativa em termos de citotoxicidade, o que torna sua utilização aparentemente segura em embalagens de alimentos. No entanto, é crucial ressaltar que é necessária uma investigação adicional para avaliar a

citotoxicidade e estabelecer concentrações seguras de utilização de CDs em outros contextos relacionados a alimentos.

7 IMPACTO AMBIENTAL

O aumento das apreensões quanto à segurança energética global e às suas repercussões ambientais tem instigado um renovado interesse no desenvolvimento de novos materiais e processos. Como evidenciado nos tópicos anteriores, a síntese ecológica de CDs emerge como uma abordagem promissora na fabricação de materiais sustentáveis, minimizando o impacto ambiental. Essa metodologia se destaca pelo emprego de precursores naturais, como materiais vegetais, microrganismos, subprodutos alimentares ou outras correntes de resíduos. O propósito é evitar a utilização de produtos químicos tóxicos e/ou equipamentos complexos e dispendiosos. Apesar de não haver registros na literatura dos custos totais dos CDs por grama, a expectativa é de que CDs provenientes de precursores de biomassa acessíveis apresentem custos consideravelmente inferiores em comparação com aqueles derivados de outros precursores, como grafite, fibras de carbono e nanotubos de carbono (Oladzadabbasabadi et al. 2023). Ainda segundo Oladzadabbasabadi et al. (2023), a abordagem *top-down* de síntese de CDs, que envolve a decomposição de grandes precursores de carbono em dimensões menores, é desafiadora devido à necessidade de equipamento específico e ao alto consumo de energia, fugindo dos princípios-chave da química verde. No entanto o método *bottom-up*, incluindo a síntese hidrotérmica e a hidrotérmica assistida por micro-ondas descarta o uso de ferramentas tecnológicas sofisticadas e exige baixas temperaturas de reação operacional, que muitas vezes ficam na faixa de 100-200 °C para a conversão de resíduos alimentares em CDs. Essas características não apenas reduzem a produção de resíduos prejudiciais, mas também preservam energia e minimizam os custos de fabricação, promovendo a economia circular, uma vez que os resíduos alimentares podem ser transformados em um material de valor agregado que pode ser utilizado em uma variedade de aplicações, incluindo embalagens.

No entanto, é importante notar que a síntese verde de *carbon dots* ainda está em estágio inicial de desenvolvimento e há desafios a serem superados, como a otimização dos processos de produção e a garantia da segurança e eficácia dos materiais produzidos. Portanto, mais pesquisas são necessárias para avaliar completamente o impacto ambiental e a viabilidade da síntese verde de *carbon dots* para aplicações em embalagens.

Outro ponto importante a ser considerado é que inevitavelmente os CDs serão descarregados no ambiente, portanto o impacto dessas partículas no meio ambiente não pode ser ignorado. Nesse contexto, os estudos apresentados no tópico anterior corroboraram a excelente biocompatibilidade dos CDs, avaliando os efeitos citotóxicos em diversos organismos terrestres, como camundongos e ratos, células humanas e animais dentro de uma faixa de concentração apropriada. Após serem ingeridos pelo organismo, os CDs não provocaram alterações patológicas significativas, sendo capazes de serem eliminados do corpo por meio das vias metabólicas normais dos organismos. Além disso, Khan et al. (2023) indicaram impactos positivos dos CDs em plantas, beneficiando o crescimento e resistência ao estresse biológico e abiótico quando em concentrações apropriadas. A dose ideal de CDs pode favorecer o crescimento vegetal, promovendo a fixação de nitrogênio por *Azotobacter*, assimilação de nutrientes e acelerando a fotossíntese.

Entender os impactos e a toxicidade dos CDs é crucial para avaliar os potenciais riscos ambientais. Contudo, as influências nos ecossistemas e habitantes biológicos carecem de análises detalhadas, demandando avaliações prudentes no futuro.

8 LIMITAÇÕES

As embalagens de alimentos desempenham um papel crucial na preservação da qualidade e segurança dos produtos, e a busca por materiais inovadores tem levado à consideração dos CDs como uma opção potencial. No entanto, é importante reconhecer as limitações associadas ao uso dessas nanoestruturas em embalagens de alimentos.

A segurança alimentar é uma prioridade fundamental, e embora os *carbon dots* exibam propriedades como estabilidade e biocompatibilidade, há uma necessidade premente de estudos aprofundados sobre os efeitos a longo prazo do consumo de alimentos armazenados em embalagens que contêm esses materiais. A origem dos CDs e a possível liberação de substâncias tóxicas também são preocupações que precisam ser abordadas para garantir a segurança dos consumidores.

A estabilidade dos CDs ao longo do tempo é uma questão crítica, especialmente considerando o armazenamento prolongado de alimentos. Mudanças em sua estrutura podem

impactar negativamente suas propriedades, comprometendo a eficácia das embalagens. Além disso, a interação dos CDs com alimentos ácidos ou gordurosos requer investigação detalhada para evitar consequências indesejadas. As regulamentações e normas rigorosas relacionadas à segurança alimentar devem ser estritamente seguidas, e os CDs devem atender a esses padrões para serem considerados seguros para uso em embalagens de alimentos. Além disso, a incorporação dos CDs em materiais de embalagem pode resultar na perda de algumas de suas propriedades como transparência, cor do filme e dependendo da combinação entre os CDs e o filme polimérico pode levar à redução de propriedades mecânicas da embalagem. Isso levanta questões sobre a eficácia desses materiais em aplicações específicas de embalagem assim como as combinações do filme compósito.

Outra questão é a implementação de sensores baseados em CDs em embalagens de alimentos, uma promissora inovação, mas que enfrenta desafios. A complexidade das matrizes alimentares, as variações nas condições de armazenamento, custos, compatibilidade com diferentes alimentos e a necessidade de regulamentação são considerações críticas. A calibração precisa, a manutenção a longo prazo e questões éticas também são fatores importantes. Superar essas limitações exigirá pesquisa contínua e uma abordagem cuidadosa para garantir a eficácia, segurança e aceitação dessa tecnologia nas embalagens de alimentos.

Em síntese, enquanto os CDs apresentam características promissoras, a pesquisa contínua e a abordagem cuidadosa dessas limitações são essenciais. A inovação em embalagens de alimentos deve equilibrar a busca por benefícios com a garantia da segurança, eficácia e conformidade com as regulamentações vigentes, promovendo assim uma abordagem sustentável e responsável para o futuro.

9 TENDÊNCIAS DE MERCADO

As embalagens que incorporam tecnologias inovadoras, como os CDs, estão rapidamente se tornando protagonistas no cenário da indústria de embalagens, alinhando-se às tendências emergentes do mercado. Essas tendências não apenas refletem a evolução das demandas dos consumidores, mas também apresentam oportunidades significativas para melhorar a segurança, sustentabilidade e interatividade nas embalagens.

Uma tendência-chave é a busca por segurança alimentar aprimorada. As propriedades dos CDs que possibilitam a detecção de contaminantes oferecem um potencial considerável

para embalagens que monitoram a qualidade dos alimentos em tempo real (Khan et al. 2023). Essa capacidade de fornecer informações instantâneas sobre a frescura dos produtos alimentícios atende à crescente demanda dos consumidores por transparência e segurança. A inteligência e interatividade também estão moldando o futuro das embalagens. Sensores baseados em CDs podem ser incorporados para oferecer uma experiência mais envolvente. Isso inclui a possibilidade de embalagens inteligentes que interagem com dispositivos móveis, fornecendo informações personalizadas aos consumidores (Kilic et al. 2022) ou indicando condições de armazenamento ideais.

Além disso, os CDs podem desempenhar um papel crucial na prevenção de fraudes alimentares. Sua capacidade de detectar alterações nos alimentos pode ser aplicada em setores onde a autenticidade dos produtos é fundamental, proporcionando uma camada adicional de segurança e confiança para os consumidores (Al-Qahtani et al. 2022).

A colaboração estratégica entre empresas de tecnologia, indústrias de embalagens e fabricantes de alimentos é essencial para impulsionar a inovação nesse campo. Parcerias estratégicas podem acelerar o desenvolvimento e a adoção de embalagens com CDs, garantindo uma implementação eficaz e sustentável.

Em resumo, as embalagens com CDs não apenas refletem as tendências do mercado, mas também oferecem soluções inovadoras que podem transformar a forma como interagimos com os alimentos e produtos embalados. Essa tecnologia promissora está posicionada para desempenhar um papel vital na busca contínua por embalagens mais seguras, sustentáveis e inteligentes.

10 PERSPECTIVAS FUTURAS

A implementação eficaz de CDs em embalagens de alimentos requer uma abordagem holística que englobe vários domínios de pesquisa e desenvolvimento. A pesquisa sobre CDs para embalagens alimentícias deve avançar, aprofundando nossa compreensão das propriedades físicas e químicas desses nanoestruturados. Estudos detalhados são necessários para explorar como fatores como tamanho, forma, carga e grupos funcionais impactam suas características e desempenho em diversas condições de embalagem. Ao mesmo tempo, a segurança dos CDs em relação à ingestão humana e animal deve ser investigada minuciosamente. Pesquisas abrangentes são cruciais para avaliar a toxicidade em diferentes contextos, garantindo que seu

uso em embalagens de alimentos seja inofensivo. Entender a aceitação do consumidor também é fundamental para a adoção bem-sucedida de embalagens com CDs. Pesquisas de mercado e estudos de opinião devem ser conduzidos para avaliar a receptividade do público, permitindo estratégias de marketing mais eficazes e destacando os benefícios percebidos pelos consumidores.

Além de embalagens, os pontos de carbono têm potencial em outras áreas da indústria alimentícia. Explorar aplicações como sensores de qualidade de alimentos e sistemas de liberação controlada de nutrientes oferece novas dimensões para essa tecnologia inovadora. Finalmente, a sustentabilidade na produção de pontos de carbono é uma prioridade. Investir em métodos mais ecológicos, como o uso de materiais renováveis e processos eficientes em termos de energia, não apenas reduzirá o impacto ambiental, mas também contribuirá para a viabilidade econômica da produção em larga escala.

Em suma, a pesquisa em *carbon dots* pode levar a novas aplicações em outras áreas, como medicina, eletrônica e energia. Isso pode ajudar a impulsionar ainda mais a pesquisa e o desenvolvimento de materiais de *carbon dots*, levando a novas descobertas e inovações em uma variedade de campos, incluindo nas embalagens de alimentos. Com mais pesquisas e desenvolvimento, os *carbon dots* podem se tornar uma parte importante da transição para uma economia mais sustentável e eficiente em termos de recursos.

11 CONCLUSÃO

Os *carbon dots* se destacam como uma fonte versátil e acessível de matéria-prima, oferecendo benefícios como baixo custo, notável fotoluminescência, eficaz bloqueio de raios UV, e interação facilitada com substratos, além de possuir capacidades fotoeletroquímicas. Essas características conferem aos CDs uma posição privilegiada para impulsionar inovações em embalagens de alimentos.

Suas propriedades mecânicas aprimoradas, juntamente com a capacidade de atuar como barreira contra água, atividade térmica, e bloqueio de radiação, água e gases, tornam os CDs promissores para aplicações em embalagens avançadas. Além disso, suas propriedades antimicrobianas e antioxidantes acrescentam camadas de funcionalidade às embalagens, contribuindo para a preservação da qualidade dos alimentos.

A flexibilidade na síntese dos CDs, permitindo a criação de diferentes composições e características, em função das fontes primárias e das condições de processamento, amplia consideravelmente seu potencial como material ativo, aditivo alimentar em nanoescala, agente de revestimento e componente inteligente para prolongar a vida útil dos produtos alimentícios. Destaca-se, ainda, a segurança superior dos CDs, comprovada pela não toxicidade em concentrações apropriadas tanto para seres humanos quanto para células animais. Embora haja a necessidade de investigações mais detalhadas nesse domínio, as pesquisas realizadas até o momento oferecem resultados promissores.

A pesquisa contínua na criação de embalagens inteligentes, que detectam a frescura dos alimentos e apresentam propriedades antibacterianas e antioxidantes, representa um campo promissor. No entanto, a migração dos CDs nos alimentos, principal consideração de toxicidade, requer investigações mais aprofundadas. Estudos adicionais são essenciais para compreender os padrões potenciais de migração em diversos sistemas alimentares e desenvolver estratégias regulatórias eficazes para a liberação controlada de CDs a partir das embalagens. Esses esforços contínuos expandem as possibilidades de aplicação desses materiais quânticos inovadores, delineando um caminho promissor para o futuro das embalagens de alimentos avançadas.

REFERÊNCIAS

ALAM, A. M. et al. Synthesis of carbon quantum dots from cabbage with down- and up-conversion photoluminescence properties: Excellent imaging agent for biomedical applications. **Green Chemistry**, v. 17, n. 7, p. 3791–3797, 1 jul. 2015.

ALEXANDRE, M.; DUBOIS, P. **Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials**. [s.l.: s.n.].

ALMEIDA, A. C. S. et al. Aplicação de nanotecnologia em embalagens de alimentos. **Polimeros**, v. 25, p. 89–97, 1 dez. 2015.

AL-QAHTANI, S. D. et al. Development of fluorescent carbon dots ink from rice straw waste toward security authentication. **Journal of Molecular Liquids**, v. 354, p. 118927, 15 maio 2022.

BAKER, S. N.; BAKER, G. A. **Luminescent carbon nanodots: Emergent nanolights**. **Angewandte Chemie - International Edition**, 10 set. 2010.

BHAMORE, J. R. et al. Green synthesis of multi-color emissive carbon dots from Manilkara zapota fruits for bioimaging of bacterial and fungal cells. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 191, p. 150–155, 1 fev. 2019.

BI, J. et al. Physicochemical properties and cytotoxicity of carbon dots in grilled fish. **New Journal of Chemistry**, v. 41, n. 16, p. 8490–8496, 2017.

BOHIDAR, H. et al. Effect of agar-gelatin compositions on the release of salbutamol tablets. **International Journal of Pharmaceutical Investigation**, v. 1, n. 2, p. 93, 2011.

CARVALHO, J. et al. Hydrothermal Synthesis to Water-stable Luminescent Carbon Dots from Acerola Fruit for Photoluminescent Composites Preparation and its Application as Sensors. **Materials Research**, v. 22, n. 3, 2019.

CAYUELA, A. et al. Semiconductor and carbon-based fluorescent nanodots: The need for consistency. **Chemical Communications**, v. 52, n. 7, p. 1311–1326, 25 jan. 2016.

CHEN, H. ZHI et al. Applicability of a colorimetric indicator label for monitoring freshness of fresh-cut green bell pepper. **Postharvest Biology and Technology**, v. 140, p. 85–92, 1 jun. 2018.

DAS PURKAYASTHA, M. et al. Antioxidative, hemocompatible, fluorescent carbon nanodots from an “end-of-pipe” agricultural waste: Exploring its new horizon in the food-packaging domain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 62, n. 20, p. 4509–4520, 21 maio 2014.

DE MEDEIROS, T. V. et al. Microwave-assisted synthesis of carbon dots and their applications. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 7, n. 24, p. 7175–7195, 2019.

DEEPIKA; KUMAR, L.; GAIKWAD, K. K. Carbon dots for food packaging applications. **Sustainable Food Technology**, 2023.

DOS SANTOS, A. B. et al. Resíduo de fruta cítrica como precursor de Carbon dots: um estudo de reprodutibilidade. **Scientia Plena**, v. 16, n. 2, 18 mar. 2020.

ESPITIA, P. J. P. et al. **Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Antimicrobial Activity and Food Packaging Applications**. **Food and Bioprocess Technology**, jul. 2012.

EZATI, P. et al. Cellulose nanofiber-based coating film integrated with nitrogen-functionalized carbon dots for active packaging applications of fresh fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 186, 1 abr. 2022a.

EZATI, P. et al. Carbon quantum dots-based antifungal coating film for active packaging application of avocado. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 33, 1 set. 2022b.

EZATI, P.; KHAN, A.; RHIM, J. W. Cellulose nanofiber-based pH indicator integrated with resazurin-modified carbon dots for real-time monitoring of food freshness. **Food Bioscience**, v. 53, p. 102679, 1 jun. 2023.

EZATI, P.; RIAHI, Z.; RHIM, J. W. CMC-based functional film incorporated with copper-doped TiO₂ to prevent banana browning. **Food Hydrocolloids**, v. 122, p. 107104, 1 jan. 2022.

EZATI, P.; ROY, S.; RHIM, J. W. Pectin/gelatin-based bioactive composite films reinforced with sulfur functionalized carbon dots. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 636, 5 mar. 2022.

FELLOWS, P. (PETER). **Food processing technology: principles and practice**. [s.l.] Woodhead Pub., 2002.

GHORBANI, M. et al. Carbon dots embedded bacterial cellulose membrane as active packaging: Toxicity, in vitro release and application in minced beef packaging. **Food Chemistry**, v. 433, p. 137311, 1 fev. 2024.

HAN, J. H. **Innovations in food packaging**. [s.l.] Elsevier Academic, 2005.

HESS, S. C. et al. Direct synthesis of carbon quantum dots in aqueous polymer solution: one-pot reaction and preparation of transparent UV-blocking films. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 5, n. 10, p. 5187–5194, 2017.

HU, Y.; GAO, Z. Sewage sludge in microwave oven: A sustainable synthetic approach toward carbon dots for fluorescent sensing of para-Nitrophenol. **Journal of Hazardous Materials**, v. 382, 15 jan. 2020.

HUTTON, G. A. M.; MARTINDALE, B. C. M.; REISNER, E. **Carbon dots as photosensitisers for solar-driven catalysis**. **Chemical Society Reviews** Royal Society of Chemistry, , 21 out. 2017.

JHONSI, M. A. et al. Antimicrobial activity, cytotoxicity and DNA binding studies of carbon dots. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 196, p. 295–302, 5 maio 2018.

KHAN, A. et al. Biocompatible carbon quantum dots for intelligent sensing in food safety applications: Opportunities and sustainability. **Materials Today Sustainability**, v. 21, p. 100306, 1 mar. 2023.

KILIC, B. et al. Colorimetric food spoilage monitoring with carbon dot and UV light reinforced fish gelatin films using a smartphone application. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 209, p. 1562–1572, 1 jun. 2022.

KOUSHEH, S. A. et al. Preparation of antimicrobial/ultraviolet protective bacterial nanocellulose film with carbon dots synthesized from lactic acid bacteria. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 155, p. 216–225, 15 jul. 2020.

KUSWANDI, B. et al. Smart packaging: Sensors for monitoring of food quality and safety. **Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety**, v. 5, n. 3–4, p. 137–146, dez. 2011.

LI, Y. et al. Crosslinked fish scale gelatin/alginate dialdehyde functional films incorporated with carbon dots derived from pomelo peel waste for active food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 253, p. 127290, 31 dez. 2023.

LIM, S. Y.; SHEN, W.; GAO, Z. **Carbon quantum dots and their applications**. **Chemical Society Reviews**Royal Society of Chemistry, , 7 jan. 2015.

LIU, S. et al. Hydrothermal treatment of grass: A low-cost, green route to nitrogen-doped, carbon-rich, photoluminescent polymer nanodots as an effective fluorescent sensing platform for label-free detection of Cu(II) ions. **Advanced Materials**, v. 24, n. 15, p. 2037–2041, 17 abr. 2012.

LIU, Y. et al. Selective and sensitive chemosensor for lead ions using fluorescent carbon dots prepared from chocolate by one-step hydrothermal method. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 237, p. 597–604, 1 dez. 2016.

MAO, L. et al. Alginate based films integrated with nitrogen-functionalized carbon dots and layered clay for active food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 253, p. 126653, 31 dez. 2023.

MEHTA, V. N. et al. One-step hydrothermal approach to fabricate carbon dots from apple juice for imaging of mycobacterium and fungal cells. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 213, p. 434–443, 5 jul. 2015.

MIN, S. et al. Gelatin/poly(vinyl alcohol)-based functional films integrated with spent coffee ground-derived carbon dots and grapefruit seed extract for active packaging application. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 231, p. 123493, 15 mar. 2023.

MIN, S.; EZATI, P.; RHIM, J. W. Gelatin-based packaging material incorporated with potato skins carbon dots as functional filler. **Industrial Crops and Products**, v. 181, p. 114820, 1 jul. 2022.

MIRTALEBI, S. S.; ALMASI, H.; ALIZADEH KHALEDABAD, M. Physical, morphological, antimicrobial and release properties of novel MgO-bacterial cellulose nanohybrids prepared by in-situ and ex-situ methods. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 128, p. 848–857, 1 maio 2019.

MURRU, C.; BADÍA-LAÍÑO, R.; DÍAZ-GARCÍA, M. E. Synthesis and characterization of green carbon dots for scavenging radical oxygen species in aqueous and oil samples. **Antioxidants**, v. 9, n. 11, p. 1–18, 1 nov. 2020.

NG, H. K. M.; LIM, G. K.; LEO, C. P. **Comparison between hydrothermal and microwave-assisted synthesis of carbon dots from biowaste and chemical for heavy metal detection: A review**. **Microchemical Journal**Elsevier Inc., , 1 jun. 2021.

OLADZADABBASABADI, N. et al. Turning food waste into value-added carbon dots for sustainable food packaging application: A review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 321, p. 103020, 1 nov. 2023.

PASSARETTI, M. G. et al. Composite films with UV barrier capacity to minimize flavored waters degradation. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 21, 1 set. 2019.

PATIL, A. S. et al. Photophysical insights of highly transparent, flexible and re-emissive PVA @ WTR-CDs composite thin films: A next generation food packaging material for UV blocking applications. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 400, p. 112647, 1 set. 2020.

QU, J. H.; WEI, Q.; SUN, D. W. **Carbon dots: Principles and their applications in food quality and safety detection**. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition** Taylor and Francis Inc., , 22 set. 2018.

RABELLO, M. **kupdf.net_aditivos-de-polimeros-rabelo-marcelo-silveira**. [s.l.] 2000, [s.d.].

RAHMAN, S.; CHOWDHURY, D. Guar gum-sodium alginate nanocomposite film as a smart fluorescence-based humidity sensor: A smart packaging material. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 216, p. 571–582, 1 set. 2022.

RAY, S. C. et al. Fluorescent carbon nanoparticles: Synthesis, characterization, and bioimaging application. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 113, n. 43, p. 18546–18551, 2009.

RHIM, J. W.; WANG, L. F. Preparation and characterization of carrageenan-based nanocomposite films reinforced with clay mineral and silver nanoparticles. **Applied Clay Science**, v. 97–98, p. 174–181, 1 ago. 2014.

RIAHI, Z. et al. Carboxymethyl cellulose-based functional film integrated with chitosan-based carbon quantum dots for active food packaging applications. **Progress in Organic Coatings**, v. 166, p. 106794, 1 maio 2022.

ROY, S.; EZATI, P.; RHIM, J.-W. **Supporting Information Gelatin/Carrageenan-based Functional Films with Carbon Dots from Enoki Mushroom for Active Food Packaging Applications**. [s.l.: s.n.].

SABET, M.; MAHDAVI, K. Green synthesis of high photoluminescence nitrogen-doped carbon quantum dots from grass via a simple hydrothermal method for removing organic and inorganic water pollutions. **Applied Surface Science**, v. 463, p. 283–291, 1 jan. 2019.

SACHDEV, A.; GOPINATH, P. Green synthesis of multifunctional carbon dots from coriander leaves and their potential application as antioxidants, sensors and bioimaging agents. **Analyst**, v. 140, n. 12, p. 4260–4269, 21 jun. 2015.

SALIMI, F. et al. Optimization and characterization of eco-friendly antimicrobial nanocellulose sheet prepared using carbon dots of white mulberry (*Morus alba* L.). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 8, p. 3439–3447, 1 jun. 2021.

SARANTÓPOULOS, C. I. G. L.; MORAES, B. B. **EMBALAGENS ATIVAS E INTELIGENTES PARA FRUTAS E HORTALIÇAS**. [s.l.: s.n.].

SON, M. H.; PARK, S. W.; JUNG, Y. K. Antioxidant and anti-aging carbon quantum dots using tannic acid. **Nanotechnology**, v. 32, n. 41, 8 out. 2021.

SUCUPIRA, N. R. et al. **Métodos Para Determinação da Atividade Antioxidante de Frutos**
Methods for Measuring Antioxidant Activity of Fruits 263 UNOPAR Cient Ciênc Biol
Saúde. [s.l: s.n.].

SUN, Y. et al. **Recent Development of Carbon Quantum Dots: Biological Toxicity, Antibacterial Properties and Application in Foods.** **Food Reviews International** Taylor and Francis Ltd., , 2022.

VARGHESE, M.; BALACHANDRAN, M. Antibacterial efficiency of carbon dots against Gram-positive and Gram-negative bacteria: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 6, p. 106821, 1 dez. 2021.

VAZ, R. et al. Preparação de pontos de carbono e sua caracterização óptica: Um experimento para introduzir nanociência na graduação. **Química Nova**, v. 38, n. 10, p. 1366–1373, 1 dez. 2015.

VOGLER, E. A. Structure and reactivity of water at biomaterial surfaces. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 74, n. 1–3, p. 69–117, 1 fev. 1998.

WAGH, R. V. et al. Cellulose nanofiber-based multifunctional films integrated with carbon dots and anthocyanins from Brassica oleracea for active and intelligent food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 233, p. 123567, 1 abr. 2023.

WANG, C. I. et al. Electrochemical synthesis of photoluminescent carbon nanodots from glycine for highly sensitive detection of hemoglobin. **Green Chemistry**, v. 16, n. 5, p. 2509–2514, 2014.

WEN, F. et al. Turmeric carbon quantum dots enhanced chitosan nanocomposite films based on photodynamic inactivation technology for antibacterial food packaging. **Carbohydrate Polymers**, v. 311, p. 120784, 1 jul. 2023.

WU, L. T. et al. Active and intelligent gellan gum-based packaging films for controlling anthocyanins release and monitoring food freshness. **Carbohydrate Polymers**, v. 254, p. 117410, 15 fev. 2021.

XU, Y. et al. Carbon dots and ruthenium doped oxygen sensitive nanofibrous membranes for monitoring the respiration of agricultural products. **Polymer Testing**, v. 93, p. 106957, 1 jan. 2021.

YAM, K. L.; TAKHISTOV, P. T.; MILTZ, J. **Intelligent packaging: Concepts and applications.** **Journal of Food Science** Institute of Food Technologists, , 2005.

YANG, P. et al. Microwave-assisted synthesis of polyamine-functionalized carbon dots from xylan and their use for the detection of tannic acid. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 213, p. 301–308, 15 abr. 2019.

ZABIHOLLAHI, N. et al. Development and characterization of carboxymethyl cellulose based probiotic nanocomposite film containing cellulose nanofiber and inulin for chicken fillet shelf life extension. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 160, p. 409–417, 1 out. 2020.

ZHANG, J. et al. Impact of reactive oxygen species on cell activity and structural integrity of Gram-positive and Gram-negative bacteria in electrochemical disinfection system. **Chemical Engineering Journal**, v. 451, p. 138879, 1 jan. 2023.

ZHAO, L. et al. Effects of carbon dots in combination with rosemary-inspired carnosic acid on oxidative stability of deep frying oils. **Food Control**, v. 125, 1 jul. 2021.

ZHAO, L. et al. **Application of carbon dots in food preservation: a critical review for packaging enhancers and food preservatives. Critical Reviews in Food Science and Nutrition** Taylor and Francis Ltd., , 2022.

ANEXO A: LICENÇA PARA USO DAS FIGURAS 6, 7 E 8

ELSEVIER LICENSE TERMS AND CONDITIONS

Nov 22, 2023

This Agreement between Mrs. Gabriella Ribeiro ("You") and Elsevier ("Elsevier") consists of your license details and the terms and conditions provided by Elsevier and Copyright Clearance Center.

License Number	5670361202795
License date	Nov 15, 2023
Licensed Content Publisher	Elsevier
Licensed Content Publication	International Journal of Biological Macromolecules
Licensed Content Title	Cellulose nanofiber-based multifunctional films integrated with carbon dots and anthocyanins from Brassica oleracea for active and intelligent food packaging applications
Licensed Content Author	Rajesh V. Wagh,Ajahar Khan,Ruchir Priyadarshi,Parya Ezati,Jong-Whan Rhim
Licensed Content Date	Apr 1, 2023
Licensed Content Volume	233
Licensed Content Issue	n/a
Licensed Content Pages	1
Start Page	123567
End Page	0
Type of Use	reuse in a thesis/dissertation
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	1
Format	electronic
Are you the author of this Elsevier article?	No
Will you be translating?	No
Title of new work	Application of Carbon Dots in food packaging: A review
Institution name	federal university of santa catarina
Expected presentation date	Dec 2023
Portions	Figure 5
Requestor Location	Mrs. Gabriella Ribeiro Servidão Heleno Peixoto Costa Florianópolis, 88049357 Brazil Attn: Mrs. Gabriella Ribeiro
Publisher Tax ID	GB 494 6272 12
Total	0.00 USD
Terms and Conditions	

INTRODUCTION

1. The publisher for this copyrighted material is Elsevier. By clicking "accept" in connection with completing this licensing transaction, you agree that the following terms and conditions apply to this transaction (along with the Billing and Payment terms and conditions established by Copyright Clearance Center, Inc. ("CCC"), at the time that you opened your RightsLink account and that are available at any time at <https://myaccount.copyright.com>).

GENERAL TERMS

- Elsevier hereby grants you permission to reproduce the aforementioned material subject to the terms and conditions indicated.
- Acknowledgement: If any part of the material to be used (for example, figures) has appeared in our publication with credit or acknowledgement to another source, permission must also be sought from that source. If such permission is not obtained then that material may not be included in your publication/copies. Suitable acknowledgement to the source must be made, either as a footnote or in a reference list at the end of your publication, as follows:
"Reprinted from Publication title, Vol /edition number, Author(s), Title of article / title of chapter, Pages No., Copyright (Year), with permission from Elsevier [OR APPLICABLE SOCIETY COPYRIGHT OWNER]." Also Lancet special credit - "Reprinted from The Lancet, Vol. number, Author(s), Title of article, Pages No., Copyright (Year), with permission from Elsevier."
- Reproduction of this material is confined to the purpose and/or media for which permission is hereby given. The material may not be reproduced or used in any other way, including use in combination with an artificial intelligence tool (including to train an algorithm, test,

process, analyse, generate output and/or develop any form of artificial intelligence tool), or to create any derivative work and/or service (including resulting from the use of artificial intelligence tools).

5. **Altering/Modifying Material: Not Permitted.** However figures and illustrations may be altered/adapted minimally to serve your work. Any other abbreviations, additions, deletions and/or any other alterations shall be made only with prior written authorization of Elsevier Ltd. (Please contact Elsevier's permissions helpdesk [here](#)). No modifications can be made to any Lancet figures/tables and they must be reproduced in full.

6. If the permission fee for the requested use of our material is waived in this instance, please be advised that your future requests for Elsevier materials may attract a fee.

7. **Reservation of Rights:** Publisher reserves all rights not specifically granted in the combination of (i) the license details provided by you and accepted in the course of this licensing transaction, (ii) these terms and conditions and (iii) CCC's Billing and Payment terms and conditions.

8. **License Contingent Upon Payment:** While you may exercise the rights licensed immediately upon issuance of the license at the end of the licensing process for the transaction, provided that you have disclosed complete and accurate details of your proposed use, no license is finally effective unless and until full payment is received from you (either by publisher or by CCC) as provided in CCC's Billing and Payment terms and conditions. If full payment is not received on a timely basis, then any license preliminarily granted shall be deemed automatically revoked and shall be void as if never granted. Further, in the event that you breach any of these terms and conditions or any of CCC's Billing and Payment terms and conditions, the license is automatically revoked and shall be void as if never granted. Use of materials as described in a revoked license, as well as any use of the materials beyond the scope of an unrevoked license, may constitute copyright infringement and publisher reserves the right to take any and all action to protect its copyright in the materials.

9. **Warranties:** Publisher makes no representations or warranties with respect to the licensed material.

10. **Indemnity:** You hereby indemnify and agree to hold harmless publisher and CCC, and their respective officers, directors, employees and agents, from and against any and all claims arising out of your use of the licensed material other than as specifically authorized pursuant to this license.

11. **No Transfer of License:** This license is personal to you and may not be sublicensed, assigned, or transferred by you to any other person without publisher's written permission.

12. **No Amendment Except in Writing:** This license may not be amended except in a writing signed by both parties (or, in the case of publisher, by CCC on publisher's behalf).

13. **Objection to Contrary Terms:** Publisher hereby objects to any terms contained in any purchase order, acknowledgment, check endorsement or other writing prepared by you, which terms are inconsistent with these terms and conditions or CCC's Billing and Payment terms and conditions. These terms and conditions, together with CCC's Billing and Payment terms and conditions (which are incorporated herein), comprise the entire agreement between you and publisher (and CCC) concerning this licensing transaction. In the event of any conflict between your obligations established by these terms and conditions and those established by CCC's Billing and Payment terms and conditions, these terms and conditions shall control.

14. **Revocation:** Elsevier or Copyright Clearance Center may deny the permissions described in this License at their sole discretion, for any reason or no reason, with a full refund payable to you. Notice of such denial will be made using the contact information provided by you. Failure to receive such notice will not alter or invalidate the denial. In no event will Elsevier or Copyright Clearance Center be responsible or liable for any costs, expenses or damage incurred by you as a result of a denial of your permission request, other than a refund of the amount(s) paid by you to Elsevier and/or Copyright Clearance Center for denied permissions.

LIMITED LICENSE

The following terms and conditions apply only to specific license types:

15. **Translation:** This permission is granted for non-exclusive world **English** rights only unless your license was granted for translation rights. If you licensed translation rights you may only translate this content into the languages you requested. A professional translator must perform all translations and reproduce the content word for word preserving the integrity of the article.

16. **Posting licensed content on any Website:** The following terms and conditions apply as follows: Licensing material from an Elsevier journal: All content posted to the web site must maintain the copyright information line on the bottom of each image; A hyper-text must be included to the Homepage of the journal from which you are licensing at <http://www.sciencedirect.com/science/journal/xxxxx> or the Elsevier homepage for books at <http://www.elsevier.com>; Central Storage: This license does not include permission for a scanned version of the material to be stored in a central repository such as that provided by Heron/XanEdu.

Licensing material from an Elsevier book: A hyper-text link must be included to the Elsevier homepage at <http://www.elsevier.com>. All content posted to the web site must maintain the copyright information line on the bottom of each image.

Posting licensed content on Electronic reserve: In addition to the above the following clauses are applicable: The web site must be password-protected and made available only to bona fide students registered on a relevant course. This permission is granted for 1 year only. You may obtain a new license for future website posting.

17. **For journal authors:** the following clauses are applicable in addition to the above:

Preprints:

A preprint is an author's own write-up of research results and analysis, it has not been peer-reviewed, nor has it had any other value added to it by a publisher (such as formatting, copyright, technical enhancement etc.).

Authors can share their preprints anywhere at any time. Preprints should not be added to or enhanced in any way in order to appear more like, or to substitute for, the final versions of articles however authors can update their preprints on arXiv or RePEc with their Accepted Author Manuscript (see below).

If accepted for publication, we encourage authors to link from the preprint to their formal publication via its DOI. Millions of researchers have access to the formal publications on ScienceDirect, and so links will help users to find, access, cite and use the best available version. Please note that Cell Press, The Lancet and some society-owned have different preprint policies. Information on these policies is available on the journal homepage.

Accepted Author Manuscripts: An accepted author manuscript is the manuscript of an article that has been accepted for publication and which typically includes author-incorporated changes suggested during submission, peer review and editor-author communications. Authors can share their accepted author manuscript:

- immediately
 - via their non-commercial person homepage or blog
 - by updating a preprint in arXiv or RePEc with the accepted manuscript
 - via their research institute or institutional repository for internal institutional uses or as part of an invitation-only research collaboration work-group
 - directly by providing copies to their students or to research collaborators for their personal use
 - for private scholarly sharing as part of an invitation-only work group on commercial sites with which Elsevier has an agreement
- After the embargo period
 - via non-commercial hosting platforms such as their institutional repository
 - via commercial sites with which Elsevier has an agreement

In all cases accepted manuscripts should:

- link to the formal publication via its DOI
- bear a CC-BY-NC-ND license - this is easy to do
- if aggregated with other manuscripts, for example in a repository or other site, be shared in alignment with our hosting policy not be added to or enhanced in any way to appear more like, or to substitute for, the published journal article.

Published journal article (JPA): A published journal article (PJA) is the definitive final record of published research that appears or will appear in the journal and embodies all value-adding publishing activities including peer review co-ordination, copy-editing, formatting, (if relevant) pagination and online enrichment.

Policies for sharing publishing journal articles differ for subscription and gold open access articles:

Subscription Articles: If you are an author, please share a link to your article rather than the full-text. Millions of researchers have access to the formal publications on ScienceDirect, and so links will help your users to find, access, cite, and use the best available version.

Theses and dissertations which contain embedded PJAs as part of the formal submission can be posted publicly by the awarding institution with DOI links back to the formal publications on ScienceDirect.

If you are affiliated with a library that subscribes to ScienceDirect you have additional private sharing rights for others' research accessed under that agreement. This includes use for classroom teaching and internal training at the institution (including use in course packs and courseware programs), and inclusion of the article for grant funding purposes.

Gold Open Access Articles: May be shared according to the author-selected end-user license and should contain a [CrossMark logo](#), the end user license, and a DOI link to the formal publication on ScienceDirect.

Please refer to Elsevier's [posting policy](#) for further information.

18. **For book authors** the following clauses are applicable in addition to the above: Authors are permitted to place a brief summary of their work online only. You are not allowed to download and post the published electronic version of your chapter, nor may you scan the printed edition to create an electronic version. **Posting to a repository:** Authors are permitted to post a summary of their chapter only in their institution's repository.

19. **Thesis/Dissertation:** If your license is for use in a thesis/dissertation your thesis may be submitted to your institution in either print or electronic form. Should your thesis be published commercially, please reapply for permission. These requirements include permission for the Library and Archives of Canada to supply single copies, on demand, of the complete thesis and include permission for Proquest/UMI to supply single copies, on demand, of the complete thesis. Should your thesis be published commercially, please reapply for permission. Theses and dissertations which contain embedded PJAs as part of the formal submission can be posted publicly by the awarding institution with DOI links back to the formal publications on ScienceDirect.

Elsevier Open Access Terms and Conditions

You can publish open access with Elsevier in hundreds of open access journals or in nearly 2000 established subscription journals that support open access publishing. Permitted third party re-use of these open access articles is defined by the author's choice of Creative Commons user license. See our [open access license policy](#) for more information.

Terms & Conditions applicable to all Open Access articles published with Elsevier:

Any reuse of the article must not represent the author as endorsing the adaptation of the article nor should the article be modified in such a way as to damage the author's honour or reputation. If any changes have been made, such changes must be clearly indicated.

The author(s) must be appropriately credited and we ask that you include the end user license and a DOI link to the formal publication on ScienceDirect.

If any part of the material to be used (for example, figures) has appeared in our publication with credit or acknowledgement to another source it is the responsibility of the user to ensure their reuse complies with the terms and conditions determined by the rights holder.

Additional Terms & Conditions applicable to each Creative Commons user license:

CC BY: The CC-BY license allows users to copy, to create extracts, abstracts and new works from the Article, to alter and revise the Article and to make commercial use of the Article (including reuse and/or resale of the Article by commercial entities), provided the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, indicates if changes were made and the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. The full details of the license are available at <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>.

CC BY NC SA: The CC BY-NC-SA license allows users to copy, to create extracts, abstracts and new works from the Article, to alter and revise the Article, provided this is not done for commercial purposes, and that the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, indicates if changes were made and the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. Further, any new works must be made available on the same conditions. The full details of the license are available at <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>.

CC BY NC ND: The CC BY-NC-ND license allows users to copy and distribute the Article, provided this is not done for commercial purposes and further does not permit distribution of the Article if it is changed or edited in any way, and provided the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, and that the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. The full details of the license are available at

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. Any commercial reuse of Open Access articles published with a CC BY NC SA or CC BY NC ND license requires permission from Elsevier and will be subject to a fee.

Commercial reuse includes:

- Associating advertising with the full text of the Article
- Charging fees for document delivery or access
- Article aggregation
- Systematic distribution via e-mail lists or share buttons

Posting or linking by commercial companies for use by customers of those companies.

20. Other Conditions:

v1.10

Questions? E-mail us at customercare@copyright.com.



ELSEVIER LICENSE TERMS AND CONDITIONS

Nov 22, 2023

This Agreement between Mrs. Gabriella Ribeiro ("You") and Elsevier ("Elsevier") consists of your license details and the terms and conditions provided by Elsevier and Copyright Clearance Center.

License Number	5670370037021
License date	Nov 15, 2023
Licensed Content Publisher	Elsevier
Licensed Content Publication	Food Bioscience
Licensed Content Title	Cellulose nanofiber-based pH indicator integrated with resazurin-modified carbon dots for real-time monitoring of food freshness
Licensed Content Author	Parya Ezati,Ajahar Khan,Jong-Whan Rhim
Licensed Content Date	Jun 1, 2023
Licensed Content Volume	53
Licensed Content Issue	n/a
Licensed Content Pages	1
Start Page	102679
End Page	0
Type of Use	reuse in a thesis/dissertation
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	1
Format	electronic
Are you the author of this Elsevier article?	No
Will you be translating?	No
Title of new work	Application of Carbon Dots in food packaging: A review
Institution name	federal university of santa catarina
Expected presentation date	Dec 2023
Portions	figure 6
Requestor Location	Mrs. Gabriella Ribeiro Servidão Heleno Peixoto Costa Florianópolis, 88049357 Brazil Attn: Mrs. Gabriella Ribeiro
Publisher Tax ID	GB 494 6272 12
Total	0.00 USD
Terms and Conditions	

INTRODUCTION

1. The publisher for this copyrighted material is Elsevier. By clicking "accept" in connection with completing this licensing transaction, you agree that the following terms and conditions apply to this transaction (along with the Billing and Payment terms and conditions established by Copyright Clearance Center, Inc. ("CCC"), at the time that you opened your RightsLink account and that are available at any time at <https://myaccount.copyright.com>).

GENERAL TERMS

- Elsevier hereby grants you permission to reproduce the aforementioned material subject to the terms and conditions indicated.
- Acknowledgement: If any part of the material to be used (for example, figures) has appeared in our publication with credit or acknowledgement to another source, permission must also be sought from that source. If such permission is not obtained then that material may not be included in your publication/copies. Suitable acknowledgement to the source must be made, either as a footnote or in a reference list at the end of your publication, as follows:
"Reprinted from Publication title, Vol /edition number, Author(s), Title of article / title of chapter, Pages No., Copyright (Year), with permission from Elsevier [OR APPLICABLE SOCIETY COPYRIGHT OWNER]." Also Lancet special credit - "Reprinted from The Lancet, Vol. number, Author(s), Title of article, Pages No., Copyright (Year), with permission from Elsevier."
- Reproduction of this material is confined to the purpose and/or media for which permission is hereby given. The material may not be reproduced or used in any other way, including use in combination with an artificial intelligence tool (including to train an algorithm, test,

process, analyse, generate output and/or develop any form of artificial intelligence tool), or to create any derivative work and/or service (including resulting from the use of artificial intelligence tools).

5. **Altering/Modifying Material:** Not Permitted. However figures and illustrations may be altered/adapted minimally to serve your work. Any other abbreviations, additions, deletions and/or any other alterations shall be made only with prior written authorization of Elsevier Ltd. (Please contact Elsevier's permissions helpdesk [here](#)). No modifications can be made to any Lancet figures/tables and they must be reproduced in full.

6. If the permission fee for the requested use of our material is waived in this instance, please be advised that your future requests for Elsevier materials may attract a fee.

7. **Reservation of Rights:** Publisher reserves all rights not specifically granted in the combination of (i) the license details provided by you and accepted in the course of this licensing transaction, (ii) these terms and conditions and (iii) CCC's Billing and Payment terms and conditions.

8. **License Contingent Upon Payment:** While you may exercise the rights licensed immediately upon issuance of the license at the end of the licensing process for the transaction, provided that you have disclosed complete and accurate details of your proposed use, no license is finally effective unless and until full payment is received from you (either by publisher or by CCC) as provided in CCC's Billing and Payment terms and conditions. If full payment is not received on a timely basis, then any license preliminarily granted shall be deemed automatically revoked and shall be void as if never granted. Further, in the event that you breach any of these terms and conditions or any of CCC's Billing and Payment terms and conditions, the license is automatically revoked and shall be void as if never granted. Use of materials as described in a revoked license, as well as any use of the materials beyond the scope of an unrevoked license, may constitute copyright infringement and publisher reserves the right to take any and all action to protect its copyright in the materials.

9. **Warranties:** Publisher makes no representations or warranties with respect to the licensed material.

10. **Indemnity:** You hereby indemnify and agree to hold harmless publisher and CCC, and their respective officers, directors, employees and agents, from and against any and all claims arising out of your use of the licensed material other than as specifically authorized pursuant to this license.

11. **No Transfer of License:** This license is personal to you and may not be sublicensed, assigned, or transferred by you to any other person without publisher's written permission.

12. **No Amendment Except in Writing:** This license may not be amended except in a writing signed by both parties (or, in the case of publisher, by CCC on publisher's behalf).

13. **Objection to Contrary Terms:** Publisher hereby objects to any terms contained in any purchase order, acknowledgment, check endorsement or other writing prepared by you, which terms are inconsistent with these terms and conditions or CCC's Billing and Payment terms and conditions. These terms and conditions, together with CCC's Billing and Payment terms and conditions (which are incorporated herein), comprise the entire agreement between you and publisher (and CCC) concerning this licensing transaction. In the event of any conflict between your obligations established by these terms and conditions and those established by CCC's Billing and Payment terms and conditions, these terms and conditions shall control.

14. **Revocation:** Elsevier or Copyright Clearance Center may deny the permissions described in this License at their sole discretion, for any reason or no reason, with a full refund payable to you. Notice of such denial will be made using the contact information provided by you. Failure to receive such notice will not alter or invalidate the denial. In no event will Elsevier or Copyright Clearance Center be responsible or liable for any costs, expenses or damage incurred by you as a result of a denial of your permission request, other than a refund of the amount(s) paid by you to Elsevier and/or Copyright Clearance Center for denied permissions.

LIMITED LICENSE

The following terms and conditions apply only to specific license types:

15. **Translation:** This permission is granted for non-exclusive world **English** rights only unless your license was granted for translation rights. If you licensed translation rights you may only translate this content into the languages you requested. A professional translator must perform all translations and reproduce the content word for word preserving the integrity of the article.

16. **Posting licensed content on any Website:** The following terms and conditions apply as follows: Licensing material from an Elsevier journal: All content posted to the web site must maintain the copyright information line on the bottom of each image; A hyper-text must be included to the Homepage of the journal from which you are licensing at <http://www.sciencedirect.com/science/journal/xxxxx> or the Elsevier homepage for books at <http://www.elsevier.com>; Central Storage: This license does not include permission for a scanned version of the material to be stored in a central repository such as that provided by Heron/XanEdu.

Licensing material from an Elsevier book: A hyper-text link must be included to the Elsevier homepage at <http://www.elsevier.com>. All content posted to the web site must maintain the copyright information line on the bottom of each image.

Posting licensed content on Electronic reserve: In addition to the above the following clauses are applicable: The web site must be password-protected and made available only to bona fide students registered on a relevant course. This permission is granted for 1 year only. You may obtain a new license for future website posting.

17. **For journal authors:** the following clauses are applicable in addition to the above:

Preprints:

A preprint is an author's own write-up of research results and analysis, it has not been peer-reviewed, nor has it had any other value added to it by a publisher (such as formatting, copyright, technical enhancement etc.).

Authors can share their preprints anywhere at any time. Preprints should not be added to or enhanced in any way in order to appear more like, or to substitute for, the final versions of articles however authors can update their preprints on arXiv or RePEc with their Accepted Author Manuscript (see below).

If accepted for publication, we encourage authors to link from the preprint to their formal publication via its DOI. Millions of researchers have access to the formal publications on ScienceDirect, and so links will help users to find, access, cite and use the best available version. Please note that Cell Press, The Lancet and some society-owned have different preprint policies. Information on these policies is available on the journal homepage.

Accepted Author Manuscripts: An accepted author manuscript is the manuscript of an article that has been accepted for publication and which typically includes author-incorporated changes suggested during submission, peer review and editor-author communications. Authors can share their accepted author manuscript:

- immediately
 - via their non-commercial person homepage or blog
 - by updating a preprint in arXiv or RePEc with the accepted manuscript
 - via their research institute or institutional repository for internal institutional uses or as part of an invitation-only research collaboration work-group
 - directly by providing copies to their students or to research collaborators for their personal use
 - for private scholarly sharing as part of an invitation-only work group on commercial sites with which Elsevier has an agreement
- After the embargo period
 - via non-commercial hosting platforms such as their institutional repository
 - via commercial sites with which Elsevier has an agreement

In all cases accepted manuscripts should:

- link to the formal publication via its DOI
- bear a CC-BY-NC-ND license - this is easy to do
- if aggregated with other manuscripts, for example in a repository or other site, be shared in alignment with our hosting policy not be added to or enhanced in any way to appear more like, or to substitute for, the published journal article.

Published journal article (JPA): A published journal article (PJA) is the definitive final record of published research that appears or will appear in the journal and embodies all value-adding publishing activities including peer review co-ordination, copy-editing, formatting, (if relevant) pagination and online enrichment.

Policies for sharing publishing journal articles differ for subscription and gold open access articles:

Subscription Articles: If you are an author, please share a link to your article rather than the full-text. Millions of researchers have access to the formal publications on ScienceDirect, and so links will help your users to find, access, cite, and use the best available version.

Theses and dissertations which contain embedded PJAs as part of the formal submission can be posted publicly by the awarding institution with DOI links back to the formal publications on ScienceDirect.

If you are affiliated with a library that subscribes to ScienceDirect you have additional private sharing rights for others' research accessed under that agreement. This includes use for classroom teaching and internal training at the institution (including use in course packs and courseware programs), and inclusion of the article for grant funding purposes.

Gold Open Access Articles: May be shared according to the author-selected end-user license and should contain a [CrossMark logo](#), the end user license, and a DOI link to the formal publication on ScienceDirect.

Please refer to Elsevier's [posting policy](#) for further information.

18. **For book authors** the following clauses are applicable in addition to the above: Authors are permitted to place a brief summary of their work online only. You are not allowed to download and post the published electronic version of your chapter, nor may you scan the printed edition to create an electronic version. **Posting to a repository:** Authors are permitted to post a summary of their chapter only in their institution's repository.

19. **Thesis/Dissertation:** If your license is for use in a thesis/dissertation your thesis may be submitted to your institution in either print or electronic form. Should your thesis be published commercially, please reapply for permission. These requirements include permission for the Library and Archives of Canada to supply single copies, on demand, of the complete thesis and include permission for Proquest/UMI to supply single copies, on demand, of the complete thesis. Should your thesis be published commercially, please reapply for permission. Theses and dissertations which contain embedded PJAs as part of the formal submission can be posted publicly by the awarding institution with DOI links back to the formal publications on ScienceDirect.

Elsevier Open Access Terms and Conditions

You can publish open access with Elsevier in hundreds of open access journals or in nearly 2000 established subscription journals that support open access publishing. Permitted third party re-use of these open access articles is defined by the author's choice of Creative Commons user license. See our [open access license policy](#) for more information.

Terms & Conditions applicable to all Open Access articles published with Elsevier:

Any reuse of the article must not represent the author as endorsing the adaptation of the article nor should the article be modified in such a way as to damage the author's honour or reputation. If any changes have been made, such changes must be clearly indicated.

The author(s) must be appropriately credited and we ask that you include the end user license and a DOI link to the formal publication on ScienceDirect.

If any part of the material to be used (for example, figures) has appeared in our publication with credit or acknowledgement to another source it is the responsibility of the user to ensure their reuse complies with the terms and conditions determined by the rights holder.

Additional Terms & Conditions applicable to each Creative Commons user license:

CC BY: The CC-BY license allows users to copy, to create extracts, abstracts and new works from the Article, to alter and revise the Article and to make commercial use of the Article (including reuse and/or resale of the Article by commercial entities), provided the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, indicates if changes were made and the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. The full details of the license are available at <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>.

CC BY NC SA: The CC BY-NC-SA license allows users to copy, to create extracts, abstracts and new works from the Article, to alter and revise the Article, provided this is not done for commercial purposes, and that the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, indicates if changes were made and the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. Further, any new works must be made available on the same conditions. The full details of the license are available at <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>.

CC BY NC ND: The CC BY-NC-ND license allows users to copy and distribute the Article, provided this is not done for commercial purposes and further does not permit distribution of the Article if it is changed or edited in any way, and provided the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, and that the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. The full details of the license are available at

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. Any commercial reuse of Open Access articles published with a CC BY NC SA or CC BY NC ND license requires permission from Elsevier and will be subject to a fee.

Commercial reuse includes:

- Associating advertising with the full text of the Article
- Charging fees for document delivery or access
- Article aggregation
- Systematic distribution via e-mail lists or share buttons

Posting or linking by commercial companies for use by customers of those companies.

20. Other Conditions:

v1.10

Questions? E-mail us at customercare@copyright.com.



ELSEVIER LICENSE TERMS AND CONDITIONS

Nov 22, 2023

This Agreement between Mrs. Gabriella Ribeiro ("You") and Elsevier ("Elsevier") consists of your license details and the terms and conditions provided by Elsevier and Copyright Clearance Center.

License Number	5670370220272
License date	Nov 15, 2023
Licensed Content Publisher	Elsevier
Licensed Content Publication	International Journal of Biological Macromolecules
Licensed Content Title	Colorimetric food spoilage monitoring with carbon dot and UV light reinforced fish gelatin films using a smartphone application
Licensed Content Author	Beyza Kilic,Vakkas Dogan,Volkan Kilic,Leyla Nesrin Kahyaoglu
Licensed Content Date	Jun 1, 2022
Licensed Content Volume	209
Licensed Content Issue	n/a
Licensed Content Pages	11
Start Page	1562
End Page	1572
Type of Use	reuse in a thesis/dissertation
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	1
Format	electronic
Are you the author of this Elsevier article?	No
Will you be translating?	No
Title of new work	Application of Carbon Dots in food packaging: A review
Institution name	federal university of santa catarina
Expected presentation date	Dec 2023
Portions	Figure 6
Requestor Location	Mrs. Gabriella Ribeiro Servidão Heleno Peixoto Costa Florianópolis, 88049357 Brazil Attn: Mrs. Gabriella Ribeiro
Publisher Tax ID	GB 494 6272 12
Total	0.00 USD
Terms and Conditions	

INTRODUCTION

1. The publisher for this copyrighted material is Elsevier. By clicking "accept" in connection with completing this licensing transaction, you agree that the following terms and conditions apply to this transaction (along with the Billing and Payment terms and conditions established by Copyright Clearance Center, Inc. ("CCC"), at the time that you opened your RightsLink account and that are available at any time at <https://myaccount.copyright.com>).

GENERAL TERMS

- Elsevier hereby grants you permission to reproduce the aforementioned material subject to the terms and conditions indicated.
- Acknowledgement: If any part of the material to be used (for example, figures) has appeared in our publication with credit or acknowledgement to another source, permission must also be sought from that source. If such permission is not obtained then that material may not be included in your publication/copies. Suitable acknowledgement to the source must be made, either as a footnote or in a reference list at the end of your publication, as follows:
"Reprinted from Publication title, Vol /edition number, Author(s), Title of article / title of chapter, Pages No., Copyright (Year), with permission from Elsevier [OR APPLICABLE SOCIETY COPYRIGHT OWNER]." Also Lancet special credit - "Reprinted from The Lancet, Vol. number, Author(s), Title of article, Pages No., Copyright (Year), with permission from Elsevier."
- Reproduction of this material is confined to the purpose and/or media for which permission is hereby given. The material may not be reproduced or used in any other way, including use in combination with an artificial intelligence tool (including to train an algorithm, test,

process, analyse, generate output and/or develop any form of artificial intelligence tool), or to create any derivative work and/or service (including resulting from the use of artificial intelligence tools).

5. **Altering/Modifying Material: Not Permitted.** However figures and illustrations may be altered/adapted minimally to serve your work. Any other abbreviations, additions, deletions and/or any other alterations shall be made only with prior written authorization of Elsevier Ltd. (Please contact Elsevier's permissions helpdesk [here](#)). No modifications can be made to any Lancet figures/tables and they must be reproduced in full.

6. If the permission fee for the requested use of our material is waived in this instance, please be advised that your future requests for Elsevier materials may attract a fee.

7. **Reservation of Rights:** Publisher reserves all rights not specifically granted in the combination of (i) the license details provided by you and accepted in the course of this licensing transaction, (ii) these terms and conditions and (iii) CCC's Billing and Payment terms and conditions.

8. **License Contingent Upon Payment:** While you may exercise the rights licensed immediately upon issuance of the license at the end of the licensing process for the transaction, provided that you have disclosed complete and accurate details of your proposed use, no license is finally effective unless and until full payment is received from you (either by publisher or by CCC) as provided in CCC's Billing and Payment terms and conditions. If full payment is not received on a timely basis, then any license preliminarily granted shall be deemed automatically revoked and shall be void as if never granted. Further, in the event that you breach any of these terms and conditions or any of CCC's Billing and Payment terms and conditions, the license is automatically revoked and shall be void as if never granted. Use of materials as described in a revoked license, as well as any use of the materials beyond the scope of an unrevoked license, may constitute copyright infringement and publisher reserves the right to take any and all action to protect its copyright in the materials.

9. **Warranties:** Publisher makes no representations or warranties with respect to the licensed material.

10. **Indemnity:** You hereby indemnify and agree to hold harmless publisher and CCC, and their respective officers, directors, employees and agents, from and against any and all claims arising out of your use of the licensed material other than as specifically authorized pursuant to this license.

11. **No Transfer of License:** This license is personal to you and may not be sublicensed, assigned, or transferred by you to any other person without publisher's written permission.

12. **No Amendment Except in Writing:** This license may not be amended except in a writing signed by both parties (or, in the case of publisher, by CCC on publisher's behalf).

13. **Objection to Contrary Terms:** Publisher hereby objects to any terms contained in any purchase order, acknowledgment, check endorsement or other writing prepared by you, which terms are inconsistent with these terms and conditions or CCC's Billing and Payment terms and conditions. These terms and conditions, together with CCC's Billing and Payment terms and conditions (which are incorporated herein), comprise the entire agreement between you and publisher (and CCC) concerning this licensing transaction. In the event of any conflict between your obligations established by these terms and conditions and those established by CCC's Billing and Payment terms and conditions, these terms and conditions shall control.

14. **Revocation:** Elsevier or Copyright Clearance Center may deny the permissions described in this License at their sole discretion, for any reason or no reason, with a full refund payable to you. Notice of such denial will be made using the contact information provided by you. Failure to receive such notice will not alter or invalidate the denial. In no event will Elsevier or Copyright Clearance Center be responsible or liable for any costs, expenses or damage incurred by you as a result of a denial of your permission request, other than a refund of the amount(s) paid by you to Elsevier and/or Copyright Clearance Center for denied permissions.

LIMITED LICENSE

The following terms and conditions apply only to specific license types:

15. **Translation:** This permission is granted for non-exclusive world **English** rights only unless your license was granted for translation rights. If you licensed translation rights you may only translate this content into the languages you requested. A professional translator must perform all translations and reproduce the content word for word preserving the integrity of the article.

16. **Posting licensed content on any Website:** The following terms and conditions apply as follows: Licensing material from an Elsevier journal: All content posted to the web site must maintain the copyright information line on the bottom of each image; A hyper-text must be included to the Homepage of the journal from which you are licensing at <http://www.sciencedirect.com/science/journal/xxxxx> or the Elsevier homepage for books at <http://www.elsevier.com>; Central Storage: This license does not include permission for a scanned version of the material to be stored in a central repository such as that provided by Heron/XanEdu.

Licensing material from an Elsevier book: A hyper-text link must be included to the Elsevier homepage at <http://www.elsevier.com>. All content posted to the web site must maintain the copyright information line on the bottom of each image.

Posting licensed content on Electronic reserve: In addition to the above the following clauses are applicable: The web site must be password-protected and made available only to bona fide students registered on a relevant course. This permission is granted for 1 year only. You may obtain a new license for future website posting.

17. **For journal authors:** the following clauses are applicable in addition to the above:

Preprints:

A preprint is an author's own write-up of research results and analysis, it has not been peer-reviewed, nor has it had any other value added to it by a publisher (such as formatting, copyright, technical enhancement etc.).

Authors can share their preprints anywhere at any time. Preprints should not be added to or enhanced in any way in order to appear more like, or to substitute for, the final versions of articles however authors can update their preprints on arXiv or RePEc with their Accepted Author Manuscript (see below).

If accepted for publication, we encourage authors to link from the preprint to their formal publication via its DOI. Millions of researchers have access to the formal publications on ScienceDirect, and so links will help users to find, access, cite and use the best available version. Please note that Cell Press, The Lancet and some society-owned have different preprint policies. Information on these policies is available on the journal homepage.

Accepted Author Manuscripts: An accepted author manuscript is the manuscript of an article that has been accepted for publication and which typically includes author-incorporated changes suggested during submission, peer review and editor-author communications. Authors can share their accepted author manuscript:

- immediately
 - via their non-commercial person homepage or blog
 - by updating a preprint in arXiv or RePEc with the accepted manuscript
 - via their research institute or institutional repository for internal institutional uses or as part of an invitation-only research collaboration work-group
 - directly by providing copies to their students or to research collaborators for their personal use
 - for private scholarly sharing as part of an invitation-only work group on commercial sites with which Elsevier has an agreement
- After the embargo period
 - via non-commercial hosting platforms such as their institutional repository
 - via commercial sites with which Elsevier has an agreement

In all cases accepted manuscripts should:

- link to the formal publication via its DOI
- bear a CC-BY-NC-ND license - this is easy to do
- if aggregated with other manuscripts, for example in a repository or other site, be shared in alignment with our hosting policy not be added to or enhanced in any way to appear more like, or to substitute for, the published journal article.

Published journal article (JPA): A published journal article (PJA) is the definitive final record of published research that appears or will appear in the journal and embodies all value-adding publishing activities including peer review co-ordination, copy-editing, formatting, (if relevant) pagination and online enrichment.

Policies for sharing publishing journal articles differ for subscription and gold open access articles:

Subscription Articles: If you are an author, please share a link to your article rather than the full-text. Millions of researchers have access to the formal publications on ScienceDirect, and so links will help your users to find, access, cite, and use the best available version.

Theses and dissertations which contain embedded PJAs as part of the formal submission can be posted publicly by the awarding institution with DOI links back to the formal publications on ScienceDirect.

If you are affiliated with a library that subscribes to ScienceDirect you have additional private sharing rights for others' research accessed under that agreement. This includes use for classroom teaching and internal training at the institution (including use in course packs and courseware programs), and inclusion of the article for grant funding purposes.

Gold Open Access Articles: May be shared according to the author-selected end-user license and should contain a [CrossMark logo](#), the end user license, and a DOI link to the formal publication on ScienceDirect.

Please refer to Elsevier's [posting policy](#) for further information.

18. **For book authors** the following clauses are applicable in addition to the above: Authors are permitted to place a brief summary of their work online only. You are not allowed to download and post the published electronic version of your chapter, nor may you scan the printed edition to create an electronic version. **Posting to a repository:** Authors are permitted to post a summary of their chapter only in their institution's repository.

19. **Thesis/Dissertation:** If your license is for use in a thesis/dissertation your thesis may be submitted to your institution in either print or electronic form. Should your thesis be published commercially, please reapply for permission. These requirements include permission for the Library and Archives of Canada to supply single copies, on demand, of the complete thesis and include permission for Proquest/UMI to supply single copies, on demand, of the complete thesis. Should your thesis be published commercially, please reapply for permission. Theses and dissertations which contain embedded PJAs as part of the formal submission can be posted publicly by the awarding institution with DOI links back to the formal publications on ScienceDirect.

Elsevier Open Access Terms and Conditions

You can publish open access with Elsevier in hundreds of open access journals or in nearly 2000 established subscription journals that support open access publishing. Permitted third party re-use of these open access articles is defined by the author's choice of Creative Commons user license. See our [open access license policy](#) for more information.

Terms & Conditions applicable to all Open Access articles published with Elsevier:

Any reuse of the article must not represent the author as endorsing the adaptation of the article nor should the article be modified in such a way as to damage the author's honour or reputation. If any changes have been made, such changes must be clearly indicated.

The author(s) must be appropriately credited and we ask that you include the end user license and a DOI link to the formal publication on ScienceDirect.

If any part of the material to be used (for example, figures) has appeared in our publication with credit or acknowledgement to another source it is the responsibility of the user to ensure their reuse complies with the terms and conditions determined by the rights holder.

Additional Terms & Conditions applicable to each Creative Commons user license:

CC BY: The CC-BY license allows users to copy, to create extracts, abstracts and new works from the Article, to alter and revise the Article and to make commercial use of the Article (including reuse and/or resale of the Article by commercial entities), provided the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, indicates if changes were made and the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. The full details of the license are available at <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>.

CC BY NC SA: The CC BY-NC-SA license allows users to copy, to create extracts, abstracts and new works from the Article, to alter and revise the Article, provided this is not done for commercial purposes, and that the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, indicates if changes were made and the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. Further, any new works must be made available on the same conditions. The full details of the license are available at <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>.

CC BY NC ND: The CC BY-NC-ND license allows users to copy and distribute the Article, provided this is not done for commercial purposes and further does not permit distribution of the Article if it is changed or edited in any way, and provided the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, and that the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. The full details of the license are available at

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. Any commercial reuse of Open Access articles published with a CC BY NC SA or CC BY NC ND license requires permission from Elsevier and will be subject to a fee.

Commercial reuse includes:

- Associating advertising with the full text of the Article
- Charging fees for document delivery or access
- Article aggregation
- Systematic distribution via e-mail lists or share buttons

Posting or linking by commercial companies for use by customers of those companies.

20. Other Conditions:

v1.10

Questions? E-mail us at customercare@copyright.com.

