



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Campus Macaé



NANOCELULOSE APLICADA À ÁREA DE ALIMENTOS

Aluna: Paula Mothé Gonçalves

Macaé, RJ

Março, 2022

PAULA MOTHÉ GONÇALVES

NANOCELULOSE APLICADA À ÁREA DE ALIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Bacharelado em Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, *Campus* Macaé, para obtenção do grau de Bacharel em Química.

Orientador: Prof. Dr. Robson Valentim Pereira

Macaé, RJ

Março, 2022

CIP - Catalogação na Publicação

G635

Gonçalves, Paula Mothé

Nanocelulose aplicada à área de alimentos / Paula Mothé Gonçalves - Macaé,
2022.
58 f.

Orientador(a): Robson Valentim Pereira.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Multidisciplinar de Química, Bacharel em Química, 2022.

1. Nanocelulose. 2. Alimentos. 3. Química. I. Pereira, Robson Valentim, orient. II. Título.

CDD 664.07

PAULA MOTHÉ GONÇALVES

NANOCELULOSE APLICADA À ÁREA DE ALIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Bacharelado em Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, *Campus* Macaé, para obtenção do grau de Bacharel em Química.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Kênia da Silva Freitas

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6984890774462877>



Prof. Dr. Aparecido Junior de Menezes

Prof. Dr. Aparecido Junior de Menezes

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0484426340349483>

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Rio de Janeiro, *campus* Macaé por ter me proporcionado um ensino de qualidade.

Aos professores da instituição pelo comprometimento com o ensino, preocupação e cuidado com os alunos.

Ao professor Robson Valentim Pereira pela orientação e sugestões.

À minha família e amigos pela compreensão e apoio.

RESUMO

A nanocelulose tem uma grande diversidade de aplicações na área de alimentos devido às suas propriedades, tais como biodisponibilidade, baixa toxicidade, biodegradabilidade, biocompatibilidade, alta resistência, estabilidade térmica, transparência, entre outras. Existem três tipos de nanocelulose: os nanocristais de celulose (CNC), as nanofibrilas de celulose (CNF) e a celulose bacteriana (BC). Eles diferem em suas formas de extração/produção e em suas estruturas, porém, todos eles têm aplicabilidades dentro do setor alimentício e têm sido muito estudados como agente estabilizador, alimentos funcionais e em embalagens, filmes e revestimentos de alimentos. Sua capacidade em estabilizar emulsões óleo em água tornou a nanocelulose um foco de pesquisadores com o objetivo de substituir estabilizantes sintéticos na produção de alimentos emulsionados, como molhos, coberturas, sorvetes, entre outros. A nanocelulose também desempenha um papel muito importante como aditivo na produção de alimentos funcionais, pois, por ser um ótimo substituto de gorduras, ela pode ser adicionada em alimentos, com o objetivo de reduzir a ingestão da mesma, colaborando para a saúde humana; além disso, ela é um tipo de fibra alimentar que atua como um prebiótico, melhorando o crescimento de células probióticas, reduzindo, então, doenças relacionadas ao trato gastrointestinal. Sua principal e mais estudada e utilizada aplicação é na constituição de embalagens, filmes e revestimentos, onde a nanocelulose, devido à sua estrutura, melhora as propriedades mecânicas (como tração, compressão etc) e de barreira ao oxigênio, melhorando a vida útil de alimentos embalados ou revestidos com filmes ou revestimentos de nanocelulose, oferecendo uma solução para a redução do desperdício de vários produtos alimentícios, incluindo frutas e legumes, bem como à deterioração microbiana dos alimentos durante várias etapas, como armazenamento e transporte.

Palavras-chave: nanocelulose, alimentos, embalagens

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Estrutura da fibra vegetal (SILVA <i>et al.</i> , 2009).....	12
FIGURA 2	Estrutura molecular da celulose (adaptado de KLEMM <i>et al.</i> , 2005).....	14
FIGURA 3	Representação das ligações hidrogênio intra e intermoleculares das cadeias de celulose (DO NASCIMENTO, 2017).....	14
FIGURA 4	Representação esquemática da parede celular vegetal (adaptado de MENON & RAO, 2012).....	15
FIGURA 5	Representação das estruturas que formam a parede celular vegetal (adaptado de SANTOS <i>et al.</i> , 2012).....	16
FIGURA 6	Regiões das moléculas de celulose e nanocristais de celulose (adaptado de MOON <i>et al.</i> , 2011).....	16
FIGURA 7	Escala nanométrica (NATÁRIO, 2011).....	17
FIGURA 8	Micrografia de transmissão de CNC (a); e aspecto visual de suspensão de CNC (b) (adaptada de DUFRESNE, 2013).....	19
FIGURA 9	Micrografia de transmissão de CNF (a); e aspecto visual do gel de CNF (b) (adaptada de DUFRESNE, 2013).....	20
FIGURA 10	Celulose bacteriana: <i>Acetobacter Xylinus</i> (a); microscopia eletrônica de transmissão da BC (b); e produção da BC (c) (adaptada de SHI <i>et al.</i> , 2014).....	23
FIGURA 11	Hidrogel de celulose bacteriana (Embrapa, 2019).....	23
FIGURA 12	Diferenças visual e estrutural do pão produzido sem BC e com BC (CORRAL <i>et al.</i> , 2017).....	29
FIGURA 13	Hambúrguer contendo 100% de carne antes e depois de fritar (a, c); hambúrguer contendo 0,24% de nanocelulose e 10% de água antes e depois de fritar (b, d) (STRÖM <i>et al.</i> , 2013).....	32
FIGURA 14	Cerejas embaladas com filme PVA-CS-CNC (LUZI <i>et al.</i> , 2017)....	39

FIGURA 15 Testes de alimentos após dias sem embalagem, em caixa de papelão e em caixa de papelão revestido (BIDEAU <i>et al.</i> , 2018).....	40
FIGURA 16 Efeitos de filmes nanocompósitos na extensão da vida de prateleira, aparência de frutos e manutenção da qualidade de frutos de manga durante o armazenamento pós-colheita: Frutos embalados com filme nanocompósito no dia 0 (a); frutos embalados com filme nanocompósito no 19º dia (b); fruto controle (sem embalagem) no dia 0 (c); e fruto controle (sem embalagem) no 10º dia (PERUMAL <i>et al.</i> , 2018).....	41
FIGURA 17 Mudanças na aparência do cogumelo durante o armazenamento, sem uso de filme, com uso de filme de nanofibrilas e com uso de filme de nanofibrilas com óleo essencial de canela (NIU <i>et al.</i> , 2020).....	43
FIGURA 18 Simulação de embalagens de alimentos após serem cobertas com o filme de celulose nanofibrilada (a e d); filme de celulose nanofibrilada/quitosana (b e e); e filme de celulose nanofibrilada/quitosana/polipirrol (c e f) por 10 dias (GAO <i>et al.</i> , 2020).....	45
FIGURA 19 A qualidade visual com armazenamento do 6º ao 10º dia de tomate cereja sem embalagem, embalados com filme de konjac glucomanano/nanocelulose e embalados com filmes tradicionais de polietileno (XIANG <i>et al.</i> , 2021).....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ABIA	Associação Brasileira da Indústria de Alimentos
PIB	Produto Interno Bruto
FAO	Organização da Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
OMS	Organização Mundial da Saúde
CNC	Nanocristais de celulose
CNF	Nanofibrilas de celulose
BC	Celulose bacteriana
GRAS	“Geralmente reconhecido como seguro”
UR	Umidade relativa
OE	Óleo essencial
PLA	Poli(ácido láctico)
PHBV	Poli(3-hidroxi butirato- co-3-hidroxi valerato)
Ag	Prata
PVA	Poli(álcool vinílico)
CS	Quitosana
AH	Hemicelulose acetilada
PCL	Policaprolactona
CMC	Carboximetilcelulose
UV	Ultravioleta
EFP	Embalagens de alimentos comestíveis
PBAT	Poli (butileno adipato- co - tereftalato)

SUMÁRIO

1. Introdução.....	10
2. Metodologia.....	13
3. Celulose.....	13
4. Nanocelulose.....	17
4.1. Nanocristais de celulose.....	18
4.2. Nanofibrilas de celulose.....	20
4.3. Celulose bacteriana.....	22
5. Aplicações da nanocelulose.....	24
6. Aplicações da nanocelulose em alimentos.....	25
6.1. Nanocelulose como agente estabilizador.....	26
6.2. Nanocelulose como ingrediente alimentar funcional.....	31
6.3. Nanocelulose em embalagens, filmes e revestimentos.....	34
7. Conclusão.....	47
8. Referências Bibliográficas.....	48

1. Introdução

A produção de alimentos faz parte de uma área bastante extensa, abrangente e de grande essencialidade, que compreende diversos setores que são direta e indiretamente relacionados, como o agrícola, o de serviços e o de insumos, aditivos, fertilizantes, agrotóxicos, bens de capital e embalagens, sendo assim, a área de alimentos corresponde a um dos pilares de qualquer economia (GOUVEIA, 2006).

De acordo com a Comissão Nacional de Classificação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a indústria de alimentos, ou fabricação de produtos alimentícios, “(...) compreende o processamento e transformação de produtos da agricultura, pecuária e pesca em alimentos para uso humano e animal. (...) compreende também a fabricação de alimentos dietéticos, alimentos enriquecidos, complementos alimentares e semelhantes.” (IBGE, 2022).

Apesar de grande parte da produção agropecuária se destinar a outros setores, como florestas destinadas à produção de carvão vegetal e papel/celulose, algodão e lã para a indústria têxtil, látex para a borracha etc., a indústria de alimentos está diretamente ligada ao campo, de onde vem a maior parte dos insumos que será transformada em produtos para a alimentação humana e animal (BNDES, 2018).

Segundo a ABIA (Associação Brasileira da Indústria de Alimentos), a indústria de alimentos e bebidas é a maior do Brasil, processando 58% de tudo o que é produzido no campo, reunindo mais de 37 mil empresas, gerando 1,72 milhão de empregos formais e diretos e representando 10,6% do PIB do País (ABIA, 2021).

A industrialização de alimentos é vantajosa e, em alguns casos, se faz necessária. Alguns alimentos necessitam passar por processos, realizados pela indústria, para se tornarem disponíveis para consumo pois, sem eles, poderiam trazer riscos à saúde humana, não seriam palatáveis ou de fácil

digestão. A industrialização também colabora para o aumento da disponibilidade, facilitando o acesso à comida de qualidade em qualquer época e lugar. Outra vantagem da industrialização de alimentos é poder atender necessidades e preferências do consumidor, pois ela consegue desenvolver alimentos com menos calorias e/ou com adição de proteínas, fibras, vitaminas e minerais; alimentos enriquecidos ou fortificados, alimentos *light*, *diet*, sem glúten ou lactose, assim como alimentos à base de vegetais: os *plant based*. E essa variedade de produtos se deve a muitos investimentos em pesquisa, tecnologia e ciência, permitindo que a indústria produza alimentos seguros, saudáveis e acessíveis, com sustentabilidade (ABIA, 2021; AHANKARI *et al.*, 2021; FRANCO *et al.*, 2015).

Na produção de alimentos, a utilização de aditivos é de suma importância, pois são substâncias seguras, aprovadas com rigor, que garantem a oferta de produtos capazes de permanecer por um tempo razoável nas prateleiras sem microrganismos causadores de doenças e sem perder seu valor nutricional e características de aparência, textura e sabor. O uso desses aditivos vem desde os primórdios da civilização, quando os caçadores usavam sal para aumentar o tempo de duração das carnes. E, ainda hoje, se utiliza o sódio para preservação de alimentos, como em conservas, e evitar o desenvolvimento de microrganismos que podem ser prejudiciais à saúde. Outro aditivo usado pela indústria com objetivo de conservação de alimentos é o ácido cítrico, presente em frutas como o limão e a laranja, que permite que produtos como a margarina, por exemplo, tenham um tempo de duração maior, facilitando a vida tanto do produtor quanto do consumidor (ABIA, 2021, FRANCO *et al.*, 2015; GÓMEZ *et al.*, 2016).

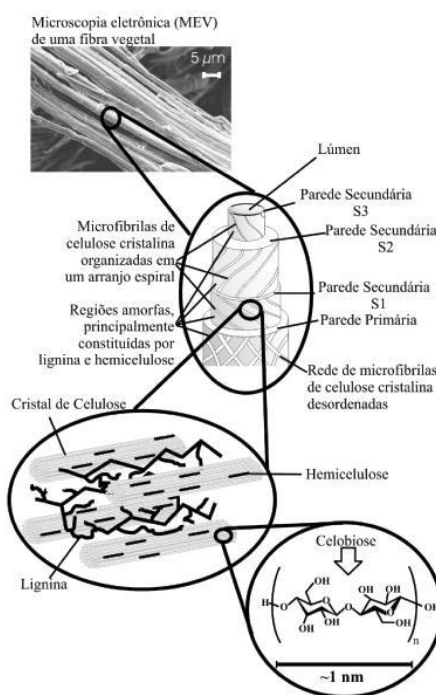
A segurança dos aditivos é trabalhada por pesquisadores desde meados do século XX. E, por esse motivo, a FAO (Organização da Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) e a OMS (Organização Mundial da Saúde) criaram o Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA), comitê científico que avalia o risco e a eficácia desses ingredientes, sempre considerando a segurança alimentar da população (ABIA, 2021; FAO, 2021).

As preocupações com o meio ambiente e a sustentabilidade faz com que novos materiais, que gerem um menor impacto ambiental, sejam desenvolvidos

com propriedades que se assemelham às dos materiais existentes e utilizados anteriormente (ALEMDAR & SAIM, 2008; CHERIAN *et al.*, 2011; LAVORATTI, 2015). Um exemplo disso são as nanoestruturas de celulose, ou nanocelulose, que consiste em fibrilas ou cristalitos de celulose com pelo menos uma dimensão na nanoescala e combina as propriedades da celulose com características específicas de nanomateriais (GÓMEZ, *et al.*, 2016; LAVORATTI, 2015).

“Sob o ponto de vista químico, de sua fórmula estrutural básica, a celulose ou a nanocelulose são idênticas. O que muda é a maneira como as moléculas estão agrupadas. Nas fibras de madeira, as moléculas de celulose estão agrupadas formando feixes chamados de microfibrilas, fortemente aderidas umas às outras e todas enroladas na parede celular de maneira espiralada como se fosse um cabo de aço oco (Figura 1). As nanofibrilas de celulose podem ser separadas dessa célula de forma individualizada e, depois disso, não se consegue mais ordená-las para formar a célula de madeira, e então elas perdem as ligações ordenadas entre si, formando um emaranhado, com água entre elas formando um gel, como uma gelatina. Cada nanofibrila de celulose individualmente tem uma resistência mecânica muito alta, maior que os aços comuns conhecidos,” explica Washington Luiz Esteves Magalhães, pesquisador da Embrapa Florestas (APRE, 2020).

Figura 1: Estrutura da fibra vegetal



Fonte: SILVA *et al.*, 2009.

Devido às suas diversas propriedades e também por ser obtida através de resíduos agrícolas, madeiras e fibras vegetais, como por exemplo, coco, bananeira, eucalipto e abacaxi, a nanocelulose tem sido cada vez mais estudada pela comunidade científica e por indústrias de diversos setores, como o de alimentos. Ela apresenta uma infinidade de aplicações no setor alimentício e, a cada dia que passa, mais estudos vão sendo realizados e mais descobertas sobre o uso da nanocelulose vão sendo feitas. Esta revisão busca mostrar a grande diversidade de aplicabilidades que a nanocelulose possui dentro da área de alimentos.

2. Metodologia

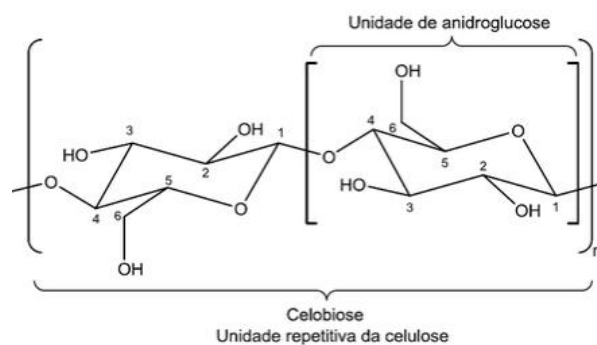
Este trabalho consiste em uma revisão da literatura sobre as aplicações da nanocelulose na área de alimentos. Para isto, foram utilizadas as bases de dados: Periódicos (Portal da CAPES), SciELO, Web of Science e Google Acadêmico. Para a pesquisa foram utilizadas as palavras-chave “celulose” e “nanocellulose” para os tópicos sobre a celulose e a nanocelulose, respectivamente, e foram usadas “nanocellulose application”, “CNC application”, “CNF application” e “BC application” para o tópico de aplicações da nanocelulose em geral e “nanocellulose application food”, “CNC application food”, “CNF application food” e “BC application food” para encontrar artigos sobre aplicações da nanocelulose em alimentos e fazer o levantamento bibliográfico, sem restringir faixa temporal.

3. Celulose

A celulose é um componente da parede celular e é o biopolímero mais abundante do planeta, compondo aproximadamente 40% da biomassa das plantas (CHEN *et al.*, 2011). Ela é constituída por unidades de β -D-glucohexapiranosil-(1 \rightarrow 4)-beta-D-gluco-hexapiranose (celobiose, $C_{12}H_{22}O_{11}$), que são formadas pela ligação β -1,4-D-glicosídica entre duas unidades de anéis

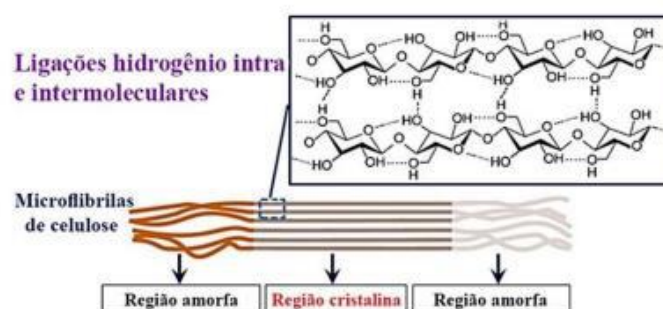
anidroglicose, como pode ser observado na Figura 2 (LAVORATTI, 2015; DO NASCIMENTO, 2017). Suas cadeias poliméricas são unidas principalmente por ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila e o oxigênio dos anéis adjacentes das moléculas de celulose. Ligações essas que se estabilizam resultando em uma configuração linear das moléculas e, durante a biossíntese, um empilhamento paralelo de múltiplas cadeias de celulose é promovido por essas ligações de hidrogênio, formando fibrilas elementares, que se agregam e originam estruturas que são chamadas de microfibrilas (CHEN *et al.*, 2011; MOON *et al.*, 2011, LAVORATTI, 2015). Essas redes de ligações intra e intermoleculares tornam a celulose um polímero relativamente estável, dando às fibrilas uma rigidez na direção axial, como pode ser observado na Figura 3 (MOON *et al.*, 2011; LAVORATTI, 2015).

Figura 2: Estrutura molecular da celulose.



Fonte: adaptado de KLEMM *et al.*, 2005.

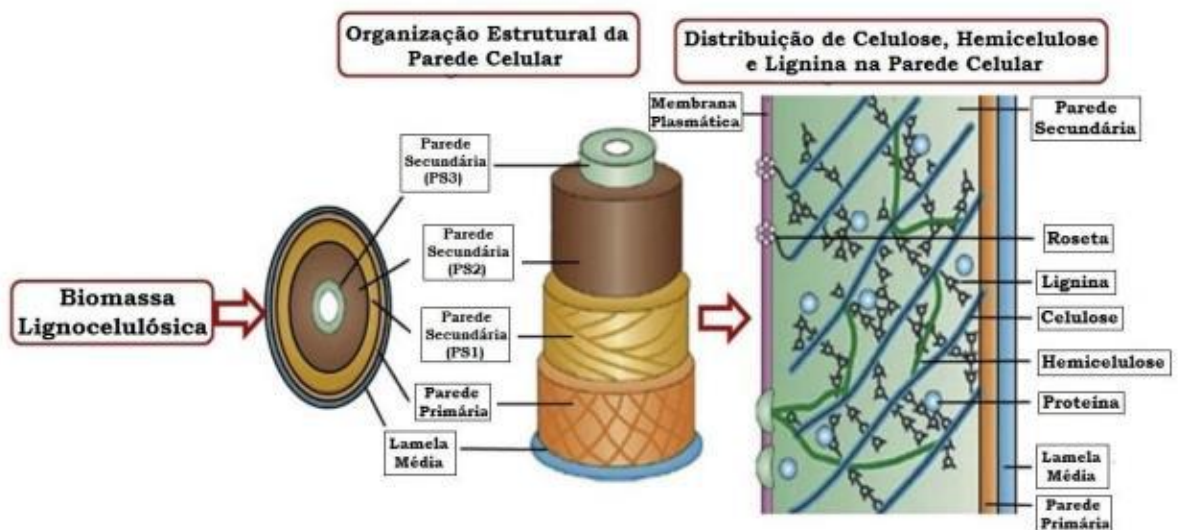
Figura 3: Representação das ligações hidrogênio intra e intermoleculares das cadeias de celulose.



Fonte: DO NASCIMENTO, 2017.

Como dito anteriormente, a celulose é um componente da parede celular. Na estrutura da parede celular de plantas lignocelulósicas tem-se, mais externamente, uma parede primária e, na parte interna, há uma parede secundária dividida em três camadas. E, na segunda camada, são encontradas as microfibrilas, com unidades de celulose unidas por uma matriz de hemicelulose e lignina, como pode ser observado na Figura 4 (DUFRESNE, 2013; ABDUL KHALIL *et al.*, 2014).

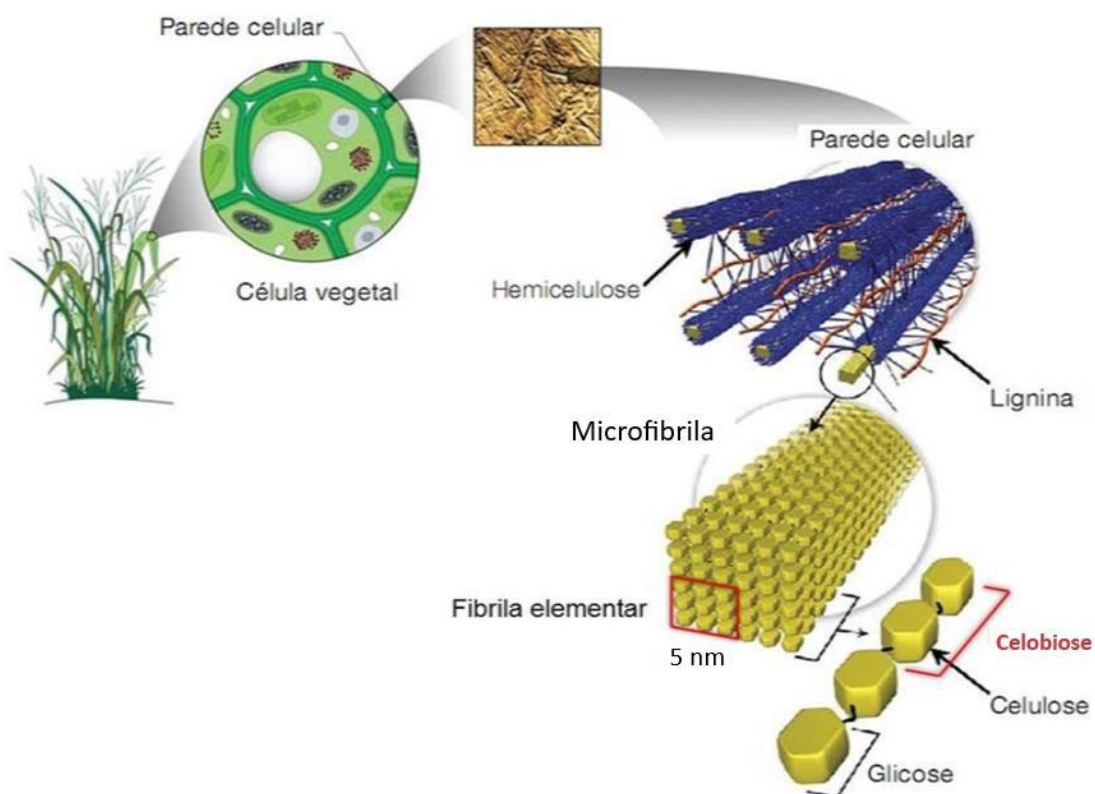
Figura 4: Representação esquemática da parede celular vegetal



Fonte: adaptado de MENON & RAO, 2012.

A célula vegetal é composta em sua maior parte por cadeias de celulose, que se agrupam formando fibrilas elementares. Essas fibrilas, de diâmetro de aproximadamente 5 nm, se agregam em microfibrilas, são empacotadas em unidades maiores, chamadas de microfibrilas de celulose, cujo diâmetro fica em torno de 20 a 50 nm e que, entremeadas por hemiceluloses e lignina, formam as macrofibrilas, dando origem à parede celular, como pode ser observado na Figura 5 (D'ALMEIDA, 1988; SANTOS *et al.*, 2012; LAVOINE *et al.*, 2012).

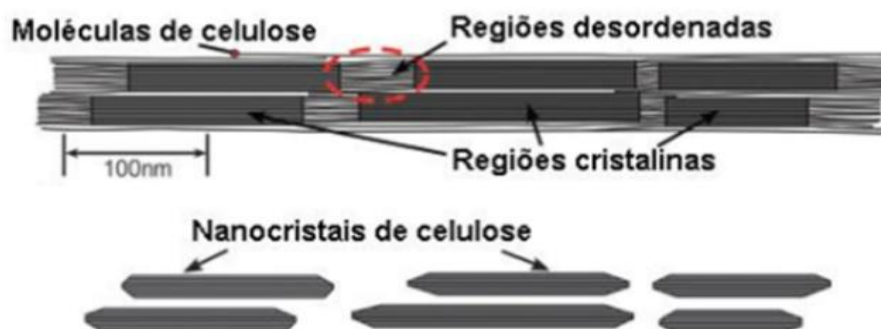
Figura 5: Representação das estruturas que formam a parede celular vegetal



Fonte: adaptado de SANTOS *et al.*, 2012.

As microfibrilas de celulose compreendem regiões cristalinas ou ordenadas e regiões amorfas ou desordenadas, estabilizadas por uma complexa rede de ligações de hidrogênio, como pode se observar na Figura 6 (LAVOINE *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2021).

Figura 6: Regiões das moléculas de celulose e nanocristais de celulose

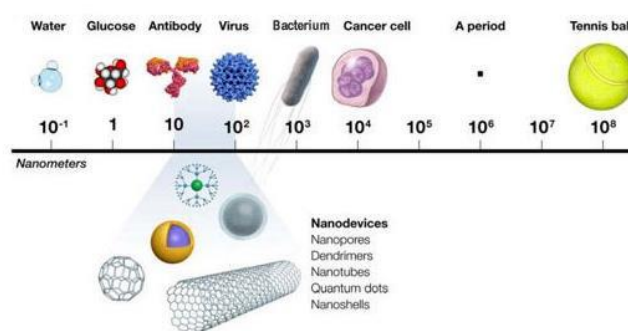


Fonte: adaptado de MOON *et al.*, 2011.

4. Nanocelulose

A nanocelulose é a parte dos materiais lignocelulósicos que envolve a celulose cristalina e a celulose amorfa, cuja unidade fundamental está na ordem de 1 a 100 nanômetros, como se pode observar na Figura 5 e na escala nanométrica apresentada na Figura 7.

Figura 7: Escala nanométrica.



Fonte: NATÁRIO, 2011.

Ela pode ser extraída e produzida a partir de diversas fontes naturais de biomassa, sendo a principal delas, a polpa de madeira, que tem 50% de celulose em sua composição. Outras fontes que podem ser utilizadas para obtenção da nanocelulose são materiais não alimentares como juta, fibra de coco, palha do milho, folha de bananeira, folhas de abacaxi, sisal, rami, linho, cânhamo, abacá, algodão, que podem ter diferentes percentuais de celulose, de acordo com a fonte. Alguns resíduos de materiais alimentares, como borra de café, bagaço de cana, casca de uva, trigo, cevada, amêndoas e cenoura também podem ser utilizados para o isolamento da nanocelulose, agregando valor ao cultivo dessas culturas, pois utiliza partes não aproveitadas de materiais alimentares, como pedaços de plantas deixadas no campo para apodrecer, cascas de sementes e polpa restantes após a extração dos sucos. E outra forma de obtenção da nanocelulose é através de algumas bactérias (AFRIN & KARIN, 2017).

A nanocelulose se divide em três tipos de acordo com a origem, formato, razão de aspecto e da composição cristalina e amorfa: os nanocristais de celulose (CNC), as nanofibrilas de celulose (CNF) e a celulose bacteriana (BC). Os dois primeiros têm como fonte principal as plantas e sua preparação é feita pela desintegração de materiais vegetais, pelo método *top-down*. E o terceiro é preparado pela biossíntese de microrganismos pelo método *bottom-up* (ZHANG *et al.*, 2021; LAVORATTI, 2015). Os três tipos de nanocelulose são, normalmente, considerados biocompatíveis e não são tóxicos, não inflamatórios, não imunogênicos, não alérgicos e, auxiliam também na proliferação, adesão, crescimento, migração e diferenciação de células, isoladas ou em forma de compósitos com outros materiais (ESLAHI *et al.*, 2020; KHAN *et al.*, 2021).

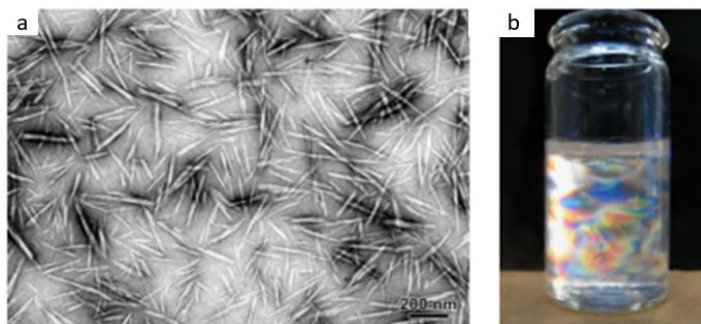
4.1. Nanocristais de celulose (CNC)

Os nanocristais de celulose (CNC) também chamados de *nanowhiskers* de celulose (CNW), nanobastões de celulose (CNR) ou celulose nanocristalina (NCC) são formados apenas pelas regiões cristalinas ou ordenadas das moléculas de celulose, como se pode observar na Figura 6 e apresentam-se, geralmente, na forma de cristais em forma de agulhas, como pode ser observado na Figura 8(a), com diâmetro entre 5 e 70 nm, e comprimento variando de 100 a 250 nm quando a origem são plantas lignocelulósicas, e de 100 nm a vários micrômetros quando as fontes são bactérias, algas e animais marinhos. As propriedades dos CNC dependem do material de origem. Os CNC oriundos da madeira, algodão e da celulose microcristalina comercial possuem alta cristalinidade (90%) e tamanho relativamente uniforme, com diâmetro entre 5 e 10 nm e comprimento até 300 nm. Já os CNC obtidos de bactérias, algas e animais marinhos são mais polidispersos, com diâmetro de 5 a 60 nm e comprimento que varia desde 100 nm até vários micrômetros (KLEMM *et al.*, 2011; LAVORATTI, 2015).

Devido ao fato de possuírem alta cristalinidade, os CNC apresentam propriedades mecânicas rígidas (como tração, compressão etc) muito fortes. E como em dispersão, eles contêm muitos grupos hidroxila, há uma facilidade de

produzir ligações de hidrogênio consigo mesmo ou com outras moléculas, gerando grandes possibilidades para modificação da superfície dos CNC (ZHANG *et al.*, 2021).

Figura 8: Micrografia de transmissão de CNC (a); e aspecto visual de suspensão de CNC (b).



Fonte: adaptada de DUFRESNE, 2013.

Um dos principais métodos de obtenção dos CNC é a hidrólise ácida. A celulose cristalina é mais resistente a produtos químicos do que a seção amorfa. Então é realizado um processo químico do tipo *top-down*, que consiste em submeter a celulose pré-tratada a ácido sob várias condições controladas (tipo e concentração de ácido, temperatura, intervalo de tempo, concentração de fibras de celulose etc.), resultando na quebra das regiões amorfas da estrutura cristalina da celulose, seguido pela remoção dos ácidos residuais e impurezas, e sonicação para separação dos cristais (LAVORATTI, 2015; AFRIN & KARIN, 2017; HEGGSET *et al.*, 2017). O processo se inicia com a remoção dos polissacarídeos ligados à superfície das fibrilas e segue com a clivagem e destruição das regiões amorfas, restando a maior parte dos CNC (LAVOINE *et al.*, 2012; KARGARZADEH *et al.*, 2015). Os CNC obtidos por este método apresentam-se, geralmente, como uma suspensão homogênea visível a olho nu e, quando exposta à luz polarizada, exibe birrefringência, característica da fase cristalina, como mostra a Figura 8(b) (LAVORATTI, 2015).

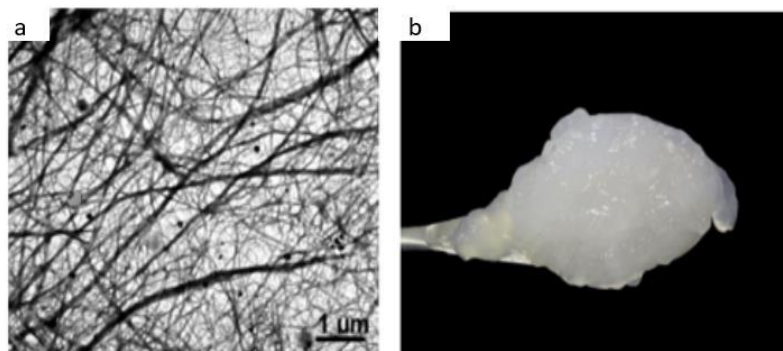
As principais aplicações dos CNC envolvem a produção de papéis mais resistentes, filmes com boas propriedades ópticas (transparência) e aerogéis.

Também pode ser utilizado como reforço em compósitos de matriz polimérica, para melhorar o desempenho mecânico dos materiais (KLEMM *et al.*, 2011; LAVOINE *et al.*, 2012). Na área de alimentos, eles podem ser usados em aplicações de embalagens e em filmes e revestimentos comestíveis (ZHANG *et al.*, 2021).

4.2. Nanofibrilas de celulose (CNF)

As nanofibrilas de celulose (CNF), também conhecidas como microfibrilas de celulose (CMF), celulose microfibrilada ou microfibrilar (MFC) e celulose nanofibrilada ou nanofibrilar (NFC), diferente dos CNC, possuem regiões cristalinas e amorfas, o que faz com que a razão de aspecto das CNF seja maior, tornando suas fibras maiores em comprimento, mas com um diâmetro reduzido (LAVOINE *et al.*, 2012; LAVORATTI, 2015; ZHANG *et al.*, 2021). Portanto, as CNF consistem em nanofibrilas de celulose longas, flexíveis e emaranhadas, com diâmetro variando entre 1 e 100 nm, e comprimento entre 1 e 10 micrômetros (ZHANG *et al.*, 2021; LAVORATTI, 2015). Sua morfologia se assemelha a uma rede de fibras rígida e seu aspecto visual é o de um gel viscoso, de coloração esbranquiçada (KLEMM *et al.*, 2011; ABDUL KHALIL *et al.*, 2014), como apresentado na Figura 9.

Figura 9: Micrografia de transmissão de CNF (a); e aspecto visual do gel de CNF (b).



Fonte: Adaptada de DUFRESNE, 2013.

Os principais métodos para preparação das CNF são os que envolvem tratamento mecânico da fibra, tais como homogeneização de alta pressão/alto cisalhamento, explosão a vapor, micronização ou trituração ultrafina, nos quais as fibrilas são quebradas e/ou descascadas em pequenas unidades de nanocelulose (LAVOINE *et al.*, 2012; LAVORATTI, 2015; ZHANG *et al.*, 2021; AFRIN & KARIN, 2017). E, para obter a fibrilação da celulose, é necessária a entrada de alta energia. Em alguns casos, há a necessidade de se fazer um pré-tratamento (enzimático, químico ou mecânico) para preparar as CNF para reduzir a entrada de energia ou melhorar a qualidade das CNF. Em fibras pré-tratadas que não foram submetidas à suspensões de ácidos fortes, é realizado um tratamento químico suave para aumentar a fibrilação das fibras de celulose antes da moagem mecânica, porém a utilização de produtos químicos na produção de nanocelulose gera algumas desvantagens, como um alto grau de toxicidade e uma menor biocompatibilidade, fazendo com que essas nanoceluloses isoladas quimicamente não possam ser usadas para aplicações biomédicas e em alimentos (AFRIN & KARIN, 2017).

Um exemplo de produção de CNF é através do processo de explosão a vapor, no qual uma vaporização em alta pressão é feita, seguida de uma descompressão rápida. O material seco vegetal é saturado com vapor de água sob elevadas pressão e temperatura e, em seguida, há uma liberação abrupta da pressão, fazendo com que a evaporação da água do material exerça uma força termomecânica, causando a ruptura do material, formando as CNF (KAUSHIK & SINGH, 2011).

Outra maneira de se produzir CNF é a partir do processo de micronização, no qual a polpa passa por duas pedras que formam um moinho. As forças centrípetas fazem com que a polpa de celulose passe por uma fenda entre as pedras, que é ajustada de forma a ocorrer contato, ocasionando assim a fibrilação da polpa (YOUSEFI *et al.*, 2013).

As CNF podem ser usadas em várias aplicações, como em papel, painéis, móveis, automóveis, eletrônicos, alimentos, produtos farmacêuticos, cosméticos e produtos de construção. Elas podem substituir materiais como o plástico, e também determinados produtos químicos e alumínio. Na área de alimentos, por exemplo, uma película de embalagem feita de CNF pode ser utilizada em

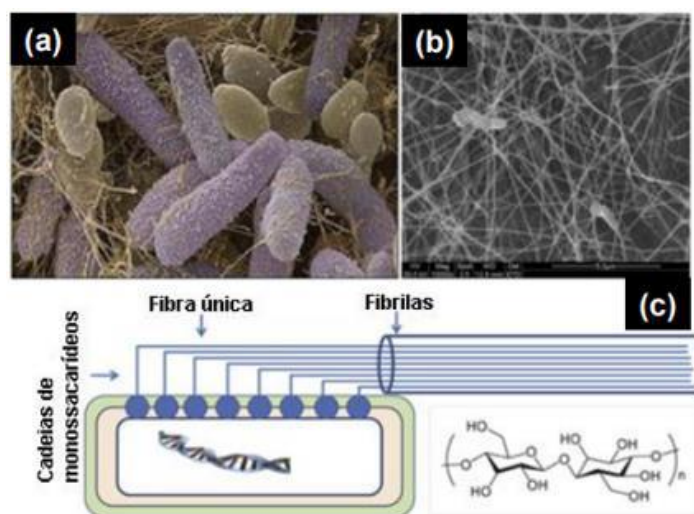
embalagens de alimentos, ao invés de plástico, para manter os produtos frescos (CUNHA, 2017).

4.3. Celulose bacteriana (BC)

A celulose bacteriana (BC), também chamada de nanocelulose bacteriana (BNC), celulose microbiana (MC) ou biocelulose (CB), é um biopolímero com uma estrutura morfológica de uma rede 3D que pode ser produzida por diferentes bactérias Gram-negativas, como as *Acetobacter*, *Azotobacter*, *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Alcaligenes*, e também por espécies bacterianas Gram-positivas, como *Sarcina ventriculi*, sendo as mais eficazes para a produção de celulose bacteriana, as do gênero *Gluconacetobacter*, como *G. xylinum*, *G. hansenii* e *G. pasteurianus* (KLEMM *et al.*, 2006; ZHANG *et al.*, 2021; LAVORATTI, 2015; CORRAL *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2019). O processo de produção da celulose bacteriana é classificado como *bottom-up*, pois a celulose, nesse caso, é sintetizada a partir de pequenas unidades, formando as fibrilas na escala nanométrica (FU *et al.*, 2013; LIN & DUFRESNE, 2014). O cultivo é feito em meio rico em glicose, sob condições aeróbias e com temperatura controlada (KLEMM *et al.*, 2011; AHREM *et al.*, 2014). Durante a biossíntese, as cadeias de glicose produzidas são perfiladas pelos poros que compõem a parede celular do microrganismo. A combinação dessas cadeias origina estruturas fibrilares, que se agregam formando uma rede de nanofibrilas cujo diâmetro compreende uma faixa entre 20 e 100 nm (LIN & DUFRESNE, 2014; SHI *et al.*, 2014), conforme esquema da Figura 10. A bactéria *G. xylinum* possui a maior taxa de produção de BC entre todos os tipos de bactérias. Esta cepa de bactérias aeróbicas não é fotossintética e pode transformar glicose e outros substratos orgânicos em celulose em alguns dias. Segundo Wang *et al.*, uma bactéria pode converter 108 moléculas de glicose por hora em celulose (WANG *et al.*, 2019). O resultado desse processo é um hidrogel estável, composto por uma estrutura de rede de nanofibras ultrafinas contendo até 99% de água, como mostrado na Figura 11. Essa estrutura fina torna a BC diferente

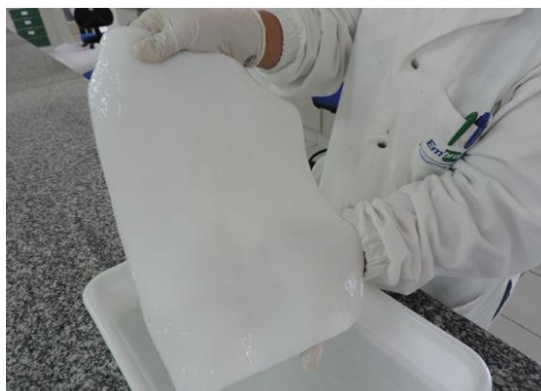
de outros polissacarídeos microbianos, produzindo alta capacidade de retenção de água, alta resistência à tração, alta pureza e flexibilidade (CORRAL *et al.*, 2017). BC é quimicamente pura, livre de hemicelulose, lignina ou pectina e, portanto, não é tóxica e é biocompatível (MOON *et al.*, 2011), sendo um ótimo material para utilizações alimentícias.

Figura 10: Celulose bacteriana: *Acetobacter Xylinus* (a), microscopia eletrônica de transmissão da BC (b) e produção da BC (c).



Fonte: Adaptada de SHI *et al.*, 2014.

Figura 11: Hidrogel de celulose bacteriana.



Fonte: Embrapa, 2019.

A celulose bacteriana possui várias aplicações em diversas áreas, sendo as principais dentro do setor de biomateriais, tais como curativos para

recuperação de tecidos, enxertos vasculares e implantes cartilagosos (KLEMM *et al.*, 2011; AHREM *et al.*, 2014, NIMESKERN *et al.*, 2013, MORITZ *et al.*, 2014). Há também aplicações na área de alimentos, na qual a BC foi regulamentada e classificada como GRAS (“geralmente reconhecido como seguro”) e foi aceita pela Food and Drug Administration (FDA) em 1992 (SHI *et al.*, 2014; STROM *et al.*, 2013). Ela pode ser usada como espessante, agente estabilizador, gelificante ou de suspensão para produzir uma variedade de alimentos, como sobremesas, tofu, sorvete e bebidas de chocolate (SHI *et al.*, 2014). Ela também pode ser usada como um substituinte da gordura aceitável na produção de produtos cárneos emulsionados (LIN & LIN, 2004, LIN *et al.*, 2011, CORRAL, 2017).

5. Aplicações da nanocelulose

Devido às suas propriedades, como leveza, alta resistência mecânica, baixa densidade, alta disponibilidade, biodegradabilidade, biocompatibilidade, baixa toxicidade, condutividade elétrica, termoestabilidade, maleabilidade, entre outras, a nanocelulose possui aplicações quase ilimitadas (CLARO & JORDÃO, 2013). Ela pode ser transformada em folhas e estruturas como laminados ou películas transparentes, pode ser incorporada em diversos materiais de alto desempenho industrial e também em alimentos e aplicações biomédicas (CUNHA *et al.*, 2017).

Há diversos setores com potencial aplicação da nanocelulose em grande escala, dentre eles estão o de papel e cartão, têxtil, agricultura (principalmente como aditivos em agroquímicos), cosméticos, alimentos e embalagens, construção civil (em concreto e painéis reconstituídos), tintas e vernizes, eletrônico (na fabricação de grandes telas de TV e painéis solares, por exemplo), aeroespacial e automotivo, farmacêutico (em materiais para administração de fármacos e diagnóstico e biossensores), biomédico e biotecnológico, entre outros (SILVA *et al.*, 2009; WANG *et al.*, 2019).

No setor eletrônico, chips de computador biodegradáveis feitos de nanocelulose podem ser usados para substituir chips usados para comunicação

sem fio, com a mesma capacidade e funcionalidade, porém com a vantagem de colaborar para a redução dos resíduos eletrônicos gerados, principalmente por muitos deles conterem materiais potencialmente tóxicos. A nanocelulose é também uma alternativa atraente para o plástico usado na superfície de materiais eletrônicos flexíveis (CUNHA, 2017; MENON *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2009).

Um exemplo de uso da nanocelulose na área têxtil é de um bio-tecido altamente impermeável, renovável e muito resistente criado por cientistas e estudantes do Centro de Biomateriais e Biotecnologia (CBN) da Universidad del Biobio, no Chile, que possui tempo de degradação de cerca de cinco meses e é um grande substituto ao plástico (CUNHA, 2017, WANG *et al.*, 2019).

Nos produção de componentes para aviões e automóveis, assim como em cadeiras e latas de lixo, por exemplo, os compósitos de nanocelulose podem ser usados, pois são uma alternativa forte, leve e barata para a fibra de carbono e a fibra de vidro não renováveis, e uma alternativa sustentável para os plásticos produzidos através de combustíveis fósseis (MENON *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2009, CUNHA, 2017).

A área biomédica e biotecnológica é, atualmente, um dos setores de maior crescimento em aplicações de nanocelulose. Nela, devido às suas propriedades de biocompatibilidade e biodegradabilidade, a nanocelulose tem utilizações como curativos, substituto temporário de pele, reconstrução de tecidos e também pode ser usada em tratamentos renais (CLARO & JORDÃO, 2013).

6. Aplicações da nanocelulose em alimentos

A nanocelulose possui várias características que facilitam seu uso em produtos alimentícios. Sua alta área de superfície específica e razão de aspecto, o comportamento reológico, a capacidade de absorção de água, a cristalinidade, a química de superfície ajustável do ponto de vista químico/físico e a ausência de propriedades citotóxicas e genotóxicas, dentre outras propriedades, tornam a nanocelulose um material de grande potencial de utilização em diversas áreas do setor alimentício. Além disso, sua estrutura compactada baseada em uma

rede ordenada de ligações hidrogênio, também a faz um importante componente para aplicações alimentícias, pela barreira a gases que essa característica traz a ela (YANG & PAULSON, 2000). Com isso, a nanocelulose pode ser utilizada como carga de reforço em embalagens, filmes e revestimentos, melhorando suas propriedades térmicas e mecânicas e colaborando para a conservação e aumento da vida de prateleira dos alimentos, pois reduz a permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio, além de inibir patógenos (PERUMAL *et al.*, 2019). Ela também tem aplicações como agente estabilizador em emulsões e suspensões alimentares, como fibra alimentar, espessante, carreador de sabor e também pode ser usada para reduzir o valor calórico dos alimentos.

Outra aplicação possível da nanocelulose é no setor de tecnologia de encapsulamento, que tem sido muito utilizada em empresas alimentícias na preparação de novos produtos. A nanocelulose é utilizada como agente encapsulante, fazendo a proteção de compostos bioativos e melhorando a sua biodisponibilidade e bioacessibilidade, ou seja, ela oferece compostos que fornecem características importantes, como sabor, cor e textura a esses produtos (REQUE & BRANDELLI, 2021).

No início da década de 80, a nanocelulose começou a ser utilizada em aplicações alimentícias, como aditivo alimentar, porém, devido ao alto custo energético dos métodos de isolamento utilizados na época, não era viável a comercialização deste produto. Atualmente, a evolução dos métodos e melhorias na produção, tornam a comercialização mais fácil (GÓMEZ *et al.*, 2016).

Pode-se, então, dividir as aplicações da nanocelulose na área de alimentos em três principais tipos: nanocelulose como agente estabilizador, nanocelulose como ingrediente alimentar funcional e nanocelulose em embalagens, filmes e revestimentos. (GÓMEZ *et al.*, 2016).

6.1. Nanocelulose como agente estabilizador

Uma das aplicações da nanocelulose em alimentos que tem ganhado cada vez mais interesse no setor alimentício é como agente estabilizador em

diversos produtos como molhos, cremes, glacês, espumas, sopas, pudins, produtos lácteos congelados, entre outros (WINUPRASITH & SUPHANTHARIKA, 2015 ; ZANCHETTA *et al.*, 2017). Por ser um material obtido de fontes naturais, e devido às suas diversas propriedades como a biocompatibilidade, por exemplo, a nanocelulose é um ótimo substituinte para estabilizantes sintéticos, além disso, diversos estudos, patentes e publicações científicas tem sido realizadas desde a década de 80 e demonstraram que a nanocelulose tem a capacidade de estabilizar emulsões óleo-em-água (o/w), além de ser um ótimo meio de suspensão para outros sólidos e uma base emulsificante para líquidos orgânicos. Isso mostra que a nanocelulose pode ser usada como aditivo para estabilizar óleos e gorduras em alimentos e também para aumentar a homogeneidade deles.

Algumas dessas patentes, estudos e publicações realizados desde a década de 80 estão descritas, por ordem cronológica, abaixo:

-1982: Publicação de patente (US 4341807) para o uso de CNF em produtos alimentícios, como recheios, sopas, molhos, pudins, coberturas e outros. Nesse processo, a nanocelulose é preparada *in situ* durante a preparação do produto alimentar para formar uma suspensão homogênea estável e, este processo é vantajoso, pois, devido as preparações da nanocelulose e do produto alimentício serem uma operação de estágio único, o custo se torna mais baixo (TURBAK *et al.*, 1982).

-1983: Descoberta de que a nanocelulose tem a capacidade de aumentar a homogeneidade e a estabilidade de diversos tipos de suspensões. Com isso, uma patente (US 4378381) foi publicada para o uso de CNF em suspensões usadas tanto em alimentos, quanto em cosméticos, produtos farmacêuticos e produtos industriais, como tintas e lamas de perfuração (TURBAK *et al.*, 1983a, TURBAK *et al.*, 1983b).

-1983: Publicação de duas patentes (JP58190352, JP58190369) após estudos realizados por empresas japonesas, como a Daicel, Procter & Gamble e Asahi Foods Co., Ltd. Na primeira, foi preparado um doce de feijão com a adição de uma quantidade extremamente pequena de nanocelulose (0,005-0,5% em massa), pois, devido às propriedades de alta capacidade de ligação à água

e facilidade de dispersão em água, a adição de uma pequena quantidade de nanocelulose à geléia de feijão crua, melhora as propriedades físicas e de retenção de água do produto resultante, gerando um produto final sem alterações na crocância, textura e sabor, sem a necessidade de alteração na quantidade de açúcar adicionado (MIZUGUCHI *et al.*, 1983a). Na segunda patente, foram preparados molho e sopa de soja com adição de uma quantidade muito pequena de nanocelulose (0,02-0,7% em massa), gerando um produto final com propriedade tixotrópica necessária e estabilidade de armazenamento (MIZUGUCHI *et al.*, 1983b).

- 2002: Publicação de patente (US 6485767) para o uso de CNF na forma seca em formulações de alimentos. Foi criada uma combinação de nanocelulose com, pelo menos, um composto poli-hidratado, em uma forma seca, com boas propriedades texturizantes, estabilizantes e espessantes, para uso como um aditivo para formulações alimentares (CANTIANI *et al.*, 2002).

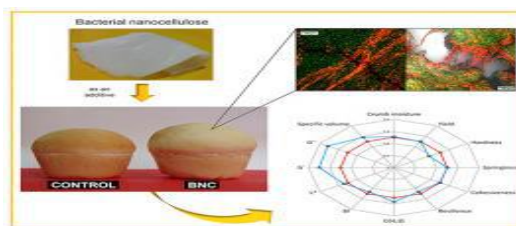
- 2012: Publicação de patente (EP 2756762 A1) para o uso da nanocelulose para melhorar a retenção de forma de sobremesa congelada e aumentar o tempo até derreter, sem alteração da viscosidade, textura e sabor dos alimentos (YANO *et al.*, 2012).

- 2013: Publicação do relatório “nanocelulose como aditivo em alimentos” em cooperação entre o Instituto Sueco de Alimentos e Biotecnologia (SIK) e a Innventia AB, no qual foi concluído pelos autores que a nanocelulose tem um potencial interessante como agente estabilizador para emulsões (STRÖM *et al.*, 2013).

- 2015: Pesquisa realizada para avaliar se o uso da nanocelulose como estabilizador de alimentos permite manter a forma de uma sobremesa congelada por um tempo de duração maior. O uso de um maior número de estabilizantes de alimentos melhora o tempo de duração da forma da sobremesa, porém isso afeta a textura e o sabor da mesma. Os resultados da pesquisa mostraram que a incorporação da nanocelulose vegetal em substituição de estabilizantes, prolongou o tempo de retenção da estrutura da sobremesa congelada sem que houvesse mudanças nas características sensoriais do alimento (WINUPRASITH & SUPHANTHARIKA, 2015).

- 2017: Estudo realizado para analisar a qualidade de produtos de panificação com o uso de farinha de trigo com adição de celulose bacteriana. O resultado mostrou que a incorporação de uma quantidade específica da celulose bacteriana na farinha reduziu o índice de escurecimento, melhorou a retenção de umidade e deu um comportamento elástico a diversas massas, porém a firmeza do miolo do pão foi reduzida, como observado na Figura 12 (CORRAL *et al.*, 2017).

Figura 12: Diferenças visual e estrutural do pão produzido sem BC e com BC



Fonte: CORRAL *et al.*, 2017.

- 2019: Pesquisa analisou e obteve resultados positivos para o uso da nanocelulose como um agente estabilizador de polifenóis, um antioxidante natural, em substituição a aditivos antioxidantes sintéticos em alimentos. O uso de produtos de origem natural tem sido priorizados pelos consumidores atualmente, principalmente quando se fala de alimentos. Portanto, apesar dos antioxidantes sintéticos serem capazes de estender com sucesso a vida de prateleira dos alimentos, a indústria alimentícia e os pesquisadores de alimentos têm focado seus esforços na busca de novas fontes naturais de moléculas antioxidantes com potencial uso como aditivos alimentares. Como a capacidade antioxidante dos polifenóis naturais presentes em vegetais, bebidas e frutas é conhecida, eles começaram a ser estudados como uma alternativa para substituir os antioxidantes sintéticos nos alimentos, porém se não forem armazenados de forma adequada, a atividade antioxidante dos polifenóis pode causar instabilidade nas condições ambientais (temperatura, luz e presença de oxigênio), além de durante o processamento, os antioxidantes naturais serem expostos a altas temperaturas (superiores a 100 ° C), sendo assim necessário um uso de um agente estabilizador. A nanocelulose tem sido usada como um agente estabilizador de ingredientes funcionais, bem como em materiais de

embalagem (GÓMEZ *et al.*, 2016) e, por ser obtido por fontes naturais e ter propriedades como biodisponibilidade e biocompatibilidade, é um atrativo tanto para a indústria, como para os consumidores. Assim, nessa pesquisa, a nanocelulose foi usada para carregar polifenóis para preservação antioxidante de alimentos. E, após várias análises, o complexo polifenólico de nanocelulose apresentou alta estabilidade térmica e também alta capacidade oxidante, inibindo modificações oxidativas e prolongando a vida útil dos alimentos (ALZATE-ARBELÁEZ *et al.*, 2019).

- 2019: Pesquisa de análise da influência da incorporação das CNF na estrutura e no desempenho de sorvetes. Foi observado que o impacto da adição da nanocelulose no produto congelado está relacionado à sua adsorção na estrutura da gordura, porém o estudo mostrou que mesmo em amostras com baixo teor de gordura, a incorporação das CNF melhorou aspectos sensoriais do produto, mantendo a dureza, a reologia do sorvete e o crescimento dos cristais de gelo em temperaturas abaixo de -2°C inalterados (VELÁSQUEZ-COCK *et al.*, 2019).

-2019: Estudo realizado utilizando CNF para preparar uma emulsão Pickering óleo em água. O resultado do uso das CNF como emulsificante de partículas mostrou uma adsorção irreversível, gerando uma emulsão pickering óleo em água de alta estabilidade e, sem que os parâmetros ambientais, como temperatura, pH e força iônica impactassem na estabilidade da emulsão (LI *et al.*, 2019).

- 2020: Pesquisas realizadas para analisar o uso de CNC como agente estabilizador óleo-água, principalmente para o desenvolvimento de emulsões *Pickering*. Elas são estabilizadas por partículas coloidais sólidas que adsorvem à interface das gotículas da emulsão e, quando comparadas à emulsões convencionais, elas têm uma melhor estabilidade e são ecologicamente corretas, além de apresentarem um grande potencial de aplicações em indústrias de alimentos, já que possuem um bom comportamento reológico, capacidade de digestão e estabilidade de congelamento-descongelamento. Em uma das pesquisas os cristais de nanocelulose foram usados para criar esferas de poliestireno contendo microgotas de água monodispersas, através do método de emulsão Pickering água em óleo, seguido de polimerização em suspensão. E o

resultado mostrou que os CNC presentes na parede celular agem como uma espécie de proteção, evitando a ruptura da parede e aumentando a resistência da matriz de poliestireno à fusão, retardando assim a difusão da água para fora dos grânulos (ESPARZA *et al.*, 2020; AJELOU, *et al.*, 2019).

6.2. Nanocelulose como ingrediente alimentar funcional

Outra possibilidade de aplicação da nanocelulose em alimentos é como ingrediente alimentar funcional. Esse termo “ingrediente alimentar funcional” se refere a qualquer ingrediente que além da nutrição básica gerada pelo alimento, traga alguma melhora à saúde. A nanocelulose é um ingrediente natural, um tipo de fibra alimentar e, como qualquer fibra alimentar, desempenha um papel benéfico para a saúde humana. Ela pode ser usada para produzir alimentos de baixa caloria para tratar distúrbios de peso (CANTIANI *et al.*, 2002; TURBAK *et al.*, 1983b) e também pode ser usada para tratar distúrbios intestinais (ANDRADE *et al.*, 2015; INNAMI & FUKUI, 1987). Assim, ela ajuda a reduzir o risco de doenças crônicas como diabetes, obesidade, doenças cardiovasculares e diverticulite, e também pode promover efeitos fisiológicos benéficos, incluindo laxação, atenuação do colesterol no sangue e atenuação da glicose no sangue (ANDRADE *et al.*, 2015; SHI *et al.*, 2014; GÓMEZ *et al.*, 2016). Com isso, vários estudos foram realizados com o objetivo de incluir a nanocelulose em alimentos como um ingrediente funcional. Alguns desses estudos estão descritos abaixo, em ordem cronológica:

- 1983: Cientistas identificaram o potencial da nanocelulose para preparar formulações com baixo teor de gordura e assim, após estudos, publicaram uma patente (US 4378381) que demonstrou que a nanocelulose pode substituir o óleo para produzir um molho de salada de baixa caloria. Misturando vinagre, nanocelulose e um envelope de uma mistura seca de salada italiana, eles chegaram a uma dispersão estável das especiarias, com cor e textura muito semelhantes a um molho italiano autêntico (TURBAK *et al.*, 1983b).

- 1987: Inventores da Daicel Chemical Industries desenvolveram alimentos e medicamentos com o uso da nanocelulose para tratar distúrbios

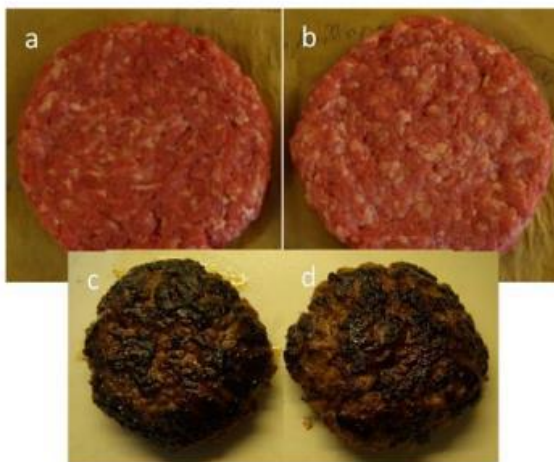
intestinais. Foram desenvolvidos alimentos secos e medicamentos em pó, com uma composição de 15 a 65% em massa de nanocelulose e 85 a 35% em massa de um sacarídeo solúvel em água para prevenir a aglomeração de nanocelulose. E esse material em pó pode ser adicionado a alimentos, tendo resultados satisfatórios no tratamento de distúrbios intestinais (INNAMI & FUKUI, 1987; GÓMEZ *et al.*, 2016).

- 1988: Desenvolvimento de biscoitos recheados de frutas com atividade de água próxima a 0,2, com adição de 0,3% a 2% em massa de nanocelulose. Os resultados foram produtos crocantes, sem a formação de texturas indesejadas ou o colapso do produto cozido (KLEINSCHMIDT *et al.*, 1988).

- 2002: Publicação de patente (US 6485767) para o uso da nanocelulose como substituta total ou parcial de gorduras em preparações com baixo teor de gordura, como em coberturas, devido a ela representar apenas um pequeno suprimento de calorias (CANTIANI *et al.*, 2002).

- 2013: desenvolvimento de hambúrgueres adicionados de nanocelulose. A nanocelulose com alto teor de água pode ser utilizada para reduzir a densidade energética de muitos alimentos processados. Apesar de reter mais água, os hambúrgueres produzidos com nanocelulose não tinham um sabor aguado, seu sabor e textura eram semelhantes ao produto sem nanocelulose, como observado na Figura 13 (STRÖM *et al.*, 2013).

Figura 13: Hambúrguer contendo 100% de carne antes e depois de fritar (a, c); hambúrguer contendo 0,24% nanocelulose e 10% água antes e depois de fritar (b, d)



Fonte: STRÖM *et al.*, 2013.

- 2015: Estudos realizados com CNC mostraram que eles podem ser usados como um aditivo alimentar substituindo gorduras e óleos parcialmente hidrogenados, melhorando a segurança e qualidade dos alimentos, pois eles diminuem a ingestão de produtos com alto teor de gordura, colaborando para o bem-estar humano (FRANCO & DE MUNIZ, 2015).

- 2017: Pesquisa realizada para determinar o potencial uso da nanocelulose bacteriana como aditivo em produtos de panificação. O resultado foi positivo para a incorporação da celulose bacteriana no pão, pois gerou um produto final com uma qualidade melhor do que um sem adição de BC, apresentando maior volume específico, porosidade, luminosidade e retenção de umidade, além de um miolo mais macio e menos firme, devido a presença de filamentos de glúten entrelaçados mais espessos do que uma formulação sem BC, o que auxilia na retenção de gás, produzindo um miolo mais macio e poroso, o que torna o produto mais aceitável para o consumidor (CORRAL *et al.*, 2017).

- 2018: Estudo realizado para analisar o uso da nanocelulose em alimentos como um modificador da digestão e absorção da gordura ingerida. A digestão dos triglicerídeos (principal constituinte das gorduras comestíveis) não ocorre pela absorção direta deles pelo trato gastrointestinal. Primeiramente, no intestino delgado, os ácidos graxos nas posições 1 e 3 da estrutura do glicerol devem ser removidos pela lipase pancreática. E esse estudo observou que a nanocelulose derivada de uma fibra de madeira natural, interage com alimentos gordurosos, colaborando com a atividade da lipase pancreática e reduzindo substancialmente a digestão e absorção de gordura. Ou seja, os resultados desses estudos indicam fortemente que a nanocelulose reduz a hidrólise de triglicerídeos no intestino delgado e, portanto, diminui a absorção de gordura (DELOID *et al.*, 2018).

- 2018: Pesquisa mostrou que a nanocelulose adicionada a alimentos reduziu pela metade a hidrólise de triglicerídeos no trato gastrointestinal, devido à adesão de gotículas de gordura à nanocelulose, levando a uma redução da gordura acessível para a atividade da lipase ou a uma interrupção na solubilidade dos produtos da digestão de gordura (DELOID *et al.*, 2018).

- 2019: Estudo sobre a influência das CNF e dos CNC na digestão do amido e do leite e na adsorção de minerais. Os resultados para as pesquisas com as CNF mostraram que nas análises mediadas pelo tempo houve uma redução substancial na difusão da glicose e na quantidade de ácidos graxos sintetizados durante o período de digestão da gordura do leite, também mostraram que uma quantidade de ferro considerável foi adsorvido, porém não foi observada adsorção de cálcio, magnésio, zinco, cobre e prata. Para as pesquisas com CNC, os resultados mostraram que uma adição de grande quantidade da nanocelulose gerou uma redução considerável na difusão da glicose e quando mediado por tempo, houve redução na quantidade de ácidos graxos sintetizados durante o período de digestão da gordura do leite, também foi observado que os CNC prejudicaram a taxa de nitrogênio amino durante a digestão da proteína do leite. Assim como as CNF, os CNC adsorveram uma grande quantidade de ferro, mas também houve adsorção de zinco para esta análise, porém cálcio, magnésio, cobre e prata não foram adsorvidos substancialmente. Essa pesquisa mostrou, então, que a adição da nanocelulose pode influenciar na absorção de nutrientes e na digestão dos alimentos (LIU & KONG, 2019).

- 2020: Desenvolvimento de um creme de biscoito saudável com adição de CNC. Esse creme de biscoito foi produzido com óleo de girassol, gordura vegetal e CNC. O resultado mostrou que a introdução da nanocelulose no creme colaborou para sua estabilidade, mantendo as propriedades sensoriais do mesmo (ASGHARI *et al.*, 2020).

6.3. Nanocelulose em embalagens, filmes e revestimentos

A última, e mais utilizada, aplicação da nanocelulose em alimentos é em embalagens, filmes e revestimentos comestíveis. Como a nanocelulose possui capacidade de funcionar como carreador de alguns compostos bioativos, como antioxidantes, probióticos e antimicrobianos, a introdução dela em filmes e revestimentos alimentícios reduzem ou inibem a deterioração microbiana dos alimentos, aumentando sua vida de prateleira. Os filmes, geralmente são

produzidos separadamente do alimento, por um método de moldagem por solvente, extrusão ou eletrofiação e, em seguida, são usados para embalar os produtos alimentícios (NAMBIAR *et al.*, 2019; APPENDINI & HOTCHKISS, 2002). Já os revestimentos são geralmente aplicados diretamente na superfície do alimento por imersão ou pulverização na forma líquida, formando um filme de micro-camada na superfície do alimento (ZHANG *et al.*, 2021).

Uma embalagem eficaz protege as mercadorias não somente prevenindo danos físicos, mas ajuda na conservação da qualidade e segurança dos alimentos durante o transporte e o armazenamento, evitando contaminação externa e deterioração (WANG & WANG, 2017). Para aumentar a vida de prateleira de produtos alimentícios deve-se diminuir a permeabilidade de umidade e de gases como oxigênio e dióxido de carbono, por exemplo; também deve-se reduzir a exposição à luz; e por último, mas não menos importante, deve haver a prevenção da deterioração por microorganismos (AHANKARI *et al.*, 2021).

A busca, na atualidade, por materiais mais naturais e menos nocivos ao meio ambiente, fez com que a demanda por embalagens que não fossem à base de petróleo crescesse, sendo então procurados recursos sustentáveis e renováveis para produção de embalagens biodegradáveis (HAN *et al.*, 2018). A nanocelulose é um material natural, biodisponível e biodegradável, que possui diversas propriedades que a tornam um vantajoso material para ser usado na produção de embalagens, colaborando para aumentar a vida útil, a segurança e a capacidade nutricional dos produtos alimentícios, e também comunicar a qualidade dos alimentos aos consumidores (GÓMEZ *et al.*, 2016). A alta cristalinidade da nanocelulose aliada a uma estrutura de rede mantida unida por meio de ligações de hidrogênio inter e intramoleculares fortes, uma estrutura de nanofibra lamelar e um empacotamento de fibra densa, fazem com que filmes feitos de nanocelulose tenham propriedades como uma alta barreira de ar e oxigênio, tornando-os atrativos para uso em embalagem de produtos alimentícios (SVAGAN *et al.*, 2016). Mas essa permeabilidade ao oxigênio que os filmes de nanocelulose tem, depende da umidade relativa (UR). Uma baixa UR (0%) torna os filmes de nanocelulose menos permeáveis ao oxigênio, já altas URs aumentam a permeabilidade ao oxigênio devido à plastificação e inchaço

da nanocelulose pelas moléculas de água (AULIN *et al.*, 2010, GÓMEZ *et al.*, 2016).

Pesquisas vem sendo realizadas para a criação de novos tipos de embalagens, filmes e revestimentos com o uso da nanocelulose. Algumas delas estão descritas, por ordem cronológica, abaixo:

- 2013: Duas pesquisas foram realizadas para criação de filmes a partir de CNC. Na primeira, foi produzido um filme de difusão antimicrobiana de três camadas, composto por duas camadas externas de policaprolactona e uma camada interna de matriz de metilcelulose reforçada com CNC, para utilização em pacotes de vegetais (BOUMAIL *et al.*, 2013). No segundo, filmes bionanocompósitos de alginato foram criados a partir da incorporação de CNC em um biopolímero de alginato para embalagens de alimentos. Os resultados mostraram que a solubilidade em água e a permeabilidade ao vapor de água dos nanocompósitos diminuíram consideravelmente com o aumento do teor de nanocelulose adicionado, houve também o aumento da hidrofobicidade da superfície do filme de alginato, que quase dobrou, devido à estrutura cristalina da nanocelulose, outra propriedade que aumentou foi a resistência à tração dos filmes compósitos, porém a transparência do filme foi reduzida com a incorporação dos cristais de nanocelulose (ABDOLLAHI *et al.*, 2013).

- 2014: Estudo realizado para analisar a necessidade de substituição de polímeros sintéticos à base de petróleo por polímeros biodegradáveis como matéria-prima para embalagens (BURGOS *et al.*, 2014). Como os polímeros biodegradáveis possuem propriedades de barreira, térmicas e mecânicas inferiores as dos polímeros sintéticos, aditivos que melhoram essas propriedades tiveram que ser incluídos na produção das embalagens, principalmente do setor alimentício. A nanocelulose é um material que, se adicionado aos biopolímeros, ajuda a melhorar as propriedades de barreira, termomecânicas e reológicas das embalagens de alimentos (AHANKARI *et al.*, 2021).

- 2014: Criação de uma embalagem de alimentos a partir de nanocompósito feitos de pó de quitosana (um composto biodegradável com bom desempenho na formação de filmes) de alta massa molecular e partículas de

nanocelulose cristalina (que possui densidades baixas e são mais baratas do que outras nanocargas). O nanocompósito produzido apresentou propriedades mecânicas superiores em comparação com alguns filmes sintéticos, como bons alongamento à ruptura e resistência à tração, além de sua permeabilidade ao vapor de água ter sido muito menor do que da maioria dos biofilmes. (DEHNAD *et al.*, 2014).

- 2014: Produção de filmes nanocompósitos antimicrobianos contendo óleo essencial de orégano (OE) com matriz composta por nanocompósitos supramoleculares de poli(ácido láctico)-celulose nanocristalina (PLA-CNC) para uso em embalagens aplicadas em vegetais misturados armazenados por 14 dias a 4°C. Os resultados mostraram que a adição do óleo essencial de orégano (OE) como agente antimicrobiano não afetou a permeabilidade ao vapor de água dos filmes, mas aumentou seu alongamento à ruptura e reduziu a resistência à tração e o módulo de tração no primeiro dia de análise, porém, após os 14 dias de armazenamento, os valores dessas propriedades foram ligeiramente aumentados. As análises microbiológicas indicaram que os filmes produzidos induziram uma inibição quase total de bactérias nos vegetais misturados no último dia de armazenamento. Portanto, os resultados demonstraram uma forte capacidade antimicrobiana dos filmes de PLA-CNC-orégano para aplicações em embalagens de alimentos para produtos vegetais (SALMIERI *et al.*, 2014).

- 2014: Produção de um filme nanocompósito de celulose a partir de CNF de bagaço de cana-de-açúcar para uso em embalagens de alimentos. O resultado mostrou que o filme produzido tem um grande potencial para aplicação em embalagens de alimentos devido a ser de base biológica, biodegradável, possuir uma boa resistência e apresentar níveis aceitáveis de permeabilidade ao vapor de água (GHADERI *et al.*, 2014).

- 2014: Criação de um revestimento de papéis com nanocompósitos biodegradáveis preparados a partir da incorporação de fibras de nanocelulose modificada hidrofóbica em uma matriz biodegradável de poli (ácido láctico) para testar a capacidade de uso deste revestimento para produção de embalagens de alimentos frescos. Os resultados mostraram que os papéis revestidos de nanocompósitos biodegradáveis modificados apresentaram baixa

permeabilidade de vapor de água, sendo um promissor material de embalagem de base verde (SONG *et al.*, 2014).

- 2014: Produção de filmes para embalagens de alimentos a partir de nanocompósitos de amido com CNC obtidos a partir de bagaço de cana-de-açúcar. Foram formulados filmes de amido e filmes de amido/CNC e suas propriedades de barreira à água foram estudadas e comparadas. Os resultados indicaram que os filmes reforçados de amido/CNC possuem uma afinidade menor com as moléculas de água do que os filmes de amido, mostrando que a adição de CNC na produção de embalagens para alimentos melhora suas propriedades de barreira à água (SLAVUTSKY & BERTUZZI, 2014).

- 2014: Desenvolvimento de um filme de embalagem de alimentos transparente e totalmente biodegradável à base de nanocompósitos composto de poli(3-hidroxi-butirato-co-3-hidroxi-valerato) (PHBV) e nanocristais de celulose funcionalizados (éster metílico de nanocristais de celulose, CNC-me). Os resultados mostraram que o efeito heterogêneo de nucleação do CNC-me fizeram com que a temperatura de cristalização e a cristalinidade da matriz de PHBV fossem aumentadas. O aumento da concentração de CNC-me gerou melhorias significativas no desempenho mecânico, estabilidade térmica, propriedades de barreira e migração, devido à interação interfacial melhorada e ao aumento da cristalinidade. Além disso, a resistência à tração e a temperatura máxima de decomposição dos nanocompósitos também foram aumentados, indicando uma boa aplicabilidade desses filmes para embalagem de alimentos (YU *et al.*, 2014).

- 2015: Produção de um filme nanocompósito de carboximetilcelulose de sódio (CMC) usando nanofibrilas de celulose (CNF) como carga de reforço. As CNF foram distribuídas uniformemente na matriz polimérica para formar filmes lisos e flexíveis, o que indica uma alta compatibilidade entre as CNF com o filme de carboximetilcelulose de sódio. O resultado mostrou que os filmes nanocompósitos CMC/CNF têm um grande potencial para serem usados como revestimento comestível ou filmes de embalagem para prolongar a vida útil de frutas e hortaliças in natura e minimamente processados (OUN & RHIM, 2015).

- 2015: Preparação de um nanocompósito à base de poli(ácido láctico) (PLA), reforçado por nanofibrilas de celulose (CNF) com alto potencial de uso em embalagens de alimentos (ALMASI *et al.*, 2015).

- 2016: fabricação de nanocompósitos multifuncionais de nanocristais de celulose/poli(ácido láctico) com nanopartículas de prata. Primeiramente foram preparados os nanocompósitos de poli (ácido láctico) (PLA)/nanocristais de celulose funcionalizados (CNC) e, em seguida, foram pulverizadas soluções aquosas de amônia de prata, formando os nanocompósitos ternários de PLA/CNC/Ag. As análises verificaram que tanto as nanopartículas de prata (Ag) depositadas, quanto os CNCs mostraram um efeito reforçador eficiente nas propriedades térmicas, mecânicas, de barreira e na atividade antibacteriana da matriz de PLA, revelando que os novos filmes nanocompósitos oferecem uma boa perspectiva para aplicações em embalagens de alimentos (YU *et al.*, 2016).

- 2017: Extração, pela primeira vez, de nanocristais de celulose de alto desempenho (CNC) de resíduos da poda de Kiwi *Actinidia* através da aplicação de um tratamento de branqueamento seguido de um processo de hidrólise ácida. As nanoestruturas celulósicas foram utilizadas como fases de reforço em poli(álcool vinílico) (PVA) misturado com filmes à base de quitosana natural (CS) e também combinado, pela primeira vez, com carvacrol, que foi usado como agente ativo. Os resultados mostraram que não houve alterações na transparência e cor da mistura PVA e PVA-CS pela presença de CNC e carvacrol e foram detectadas inibições no desenvolvimento bacteriano, o que sugere uma função protetora contra a contaminação por microrganismos, apresentando então, uma boa capacidade para ser usada em filmes de embalagens para armazenamento de alimentos perecíveis, como cerejas, por exemplo, como pode ser observado na Figura 14 (LUZI *et al.*, 2017).

Figura 14: Cerejas embaladas com filme PVA-CS-CNC

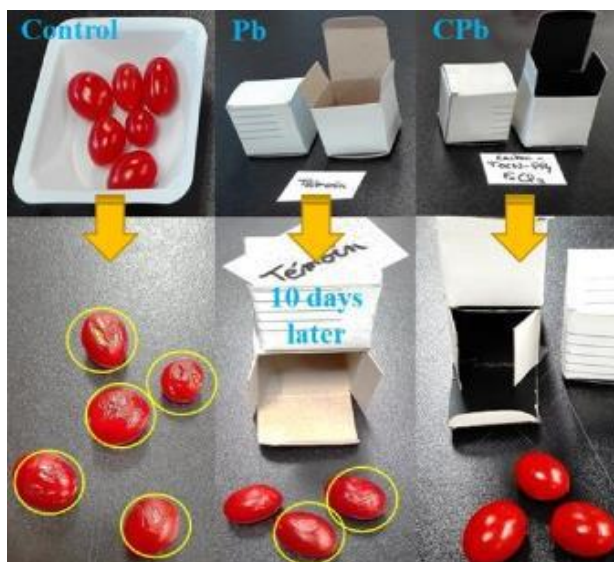


Fonte: LUZI *et al.*, 2017.

- 2018: Produção de um revestimento com nanocelulose cristalina e maltodextrina para aumentar a vida útil do açafrão durante seu armazenamento. O resultado dessa pesquisa mostrou que este revestimento feito de cristais de nanocelulose teve uma boa eficácia, impedindo que compostos bioativos presentes no açafrão, como a crocina, fossem perdidos (JAFARI *et al.*, 2018).

- 2018: Produção de um cartão revestido com nanocelulose-polipirrol para aplicação em embalagens de alimentos. Por serem biodegradáveis e recicláveis, as embalagens de papel cartão tem sido bastante exploradas na atualidade, pois além de reduzir os resíduos produzidos no descarte, melhoram a vida útil de alimentos perecíveis. Os resultados desta pesquisa mostraram que o cartão revestido teve suas propriedades mecânicas e a permeabilidade à gás significativamente melhoradas devido à densa rede formada pelos CNC e partículas de polipirrol, sendo uma ótima alternativa verde para aplicação em embalagens de alimentos, podendo-se observar na Figura 15 (BIDEAU *et al.*, 2018).

Figura 15: Testes de alimentos após 10 dias sem embalagem, em caixa de papelão e em caixa de papelão revestido



Fonte: BIDEAU *et al.*, 2018

- 2018: Desenvolvimento de filmes bionanocompósitos ecologicamente corretos à base de álcool polivinílico/quitosana (PVA/CS) reforçados com

nanocristais de celulose (CNC) isolados de palha de arroz. Os resultados mostraram que a resistência à tração e a estabilidade térmica dos filmes de PVA/CS aumentaram com a adição de palha de arroz-CNC. Também foi observado que o nível de transparência foi mantido, sugerindo que os CNC foram dispersos na faixa de nanoescala. E o filme bionanocompósito PVA/CS/CNC também apresentou boa atividade antifúngica e antibacteriana. Assim, o estudo mostrou que o filme bionanocompósito ecologicamente correto tem um grande potencial em aplicações de embalagens de alimentos (PERUMAL *et al.*, 2018).

- 2018: Análise dos efeitos do uso de CNC de palha de arroz como carga de reforço em filme de embalagem biocompósito de montmorilonita-álcool polivinílico para melhorar a capacidade de armazenamento de manga pós-colheita. As análises mostraram que as propriedades de tração e a estabilidade térmica dos filmes biocompósitos melhoraram e a manga selada com o filme apresentou uma extensão na vida de prateleira. Com isso, o estudo revelou uma eficiência do filme bionanocompósito para melhorar a capacidade de armazenamento de mangas recém-colhidas, como observado na Figura 16 (PERUMAL *et al.*, 2018).

Figura 16: Efeitos de filmes nanocompósitos na extensão da vida de prateleira, aparência de frutos e manutenção da qualidade de frutos de manga durante o armazenamento pós-colheita: Frutos embalados com filme nanocompósito no dia 0 (a); frutos embalados com filme nanocompósito no 19º dia (b); fruto controle (sem embalagem) no dia 0; e fruto controle (sem embalagem) no 10º dia.



Fonte: PERUMAL *et al.*, 2018.

- 2018: Utilização de nanofibrilas de celulose (CNF) modificadas como carga de reforço dentro de uma matriz de ácido polilático (PLA) e revestimento de quitosana (CS) para preparar um filme composto de duas camadas para embalagens de alimentos antimicrobianos. Os testes mostraram que o filme composto resina-CNF/PLA/CS apresentou propriedades mecânicas ótimas e também um excelente desempenho antimicrobiano, revelando um bom potencial para embalagem de alimentos (NIU *et al.*, 2018).

- 2019: Preparação de filmes antifúngicos à base de quitosana reforçados com nanocristais de celulose (CNC). Foram realizadas análises sensoriais em amostras de arroz embalados com esses filmes bioativos, e elas mostraram que não houve alteração significativa no odor, sabor, cor e apreciação geral em comparação com um arroz não tratado. Foi observado que a incorporação de CNC com a matriz de quitosana desempenhou um papel importante na estabilização das propriedades físico-químicas e de liberação dos filmes nanocompósitos. Além disso, a combinação dos filmes bioativos de quitosana mostrou boas propriedades antifúngicas e mecânicas (HOSSAIN *et al.*, 2019).

- 2019: Produção de aerogéis para aplicações em embalagens de alimentos através de CNC obtidos de cascas de arroz e aveia. Os resultados mostraram que os resíduos agroindustriais têm aplicações promissoras como aerogéis para uso em embalagens de alimentos com boas propriedades estruturais, de cristalinidade e de absorção de água (DE OLIVEIRA *et al.*, 2019).

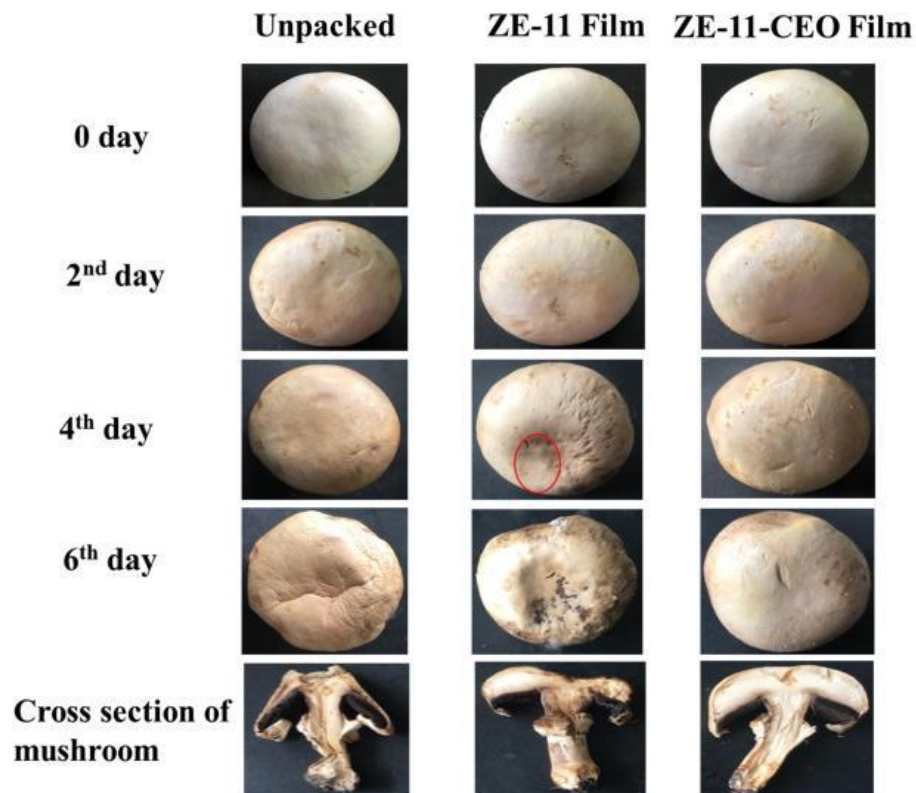
- 2020: Desenvolvimento de um bionanocompósito multifuncional usando a nanocelulose juntamente com polímeros derivados de ovo, com o objetivo de revestir frutas frescas, como abacate, banana, mamão e morango, e retardar a deterioração, a desidratação, o amadurecimento, além de reduzir a invasão microbiana nesses alimentos. Este revestimento produzido a partir de resíduos e materiais de baixo custo, se mostrou uma ótima alternativa para revestimento de frutas comercialmente disponíveis, pois é comestível, lavável e também colabora para o problema de desperdício de alimentos (JUNG *et al.*, 2020).

- 2020: Criação de um revestimento comestível à base de hidroxipropilmetilcelulose com lipossomas que encapsulam rutina, glicerol e CNF

para utilização em alimentos gordurosos, como amêndoas e chocolate. Os resultados mostraram que a adição desses lipossomas aos revestimentos comestíveis produziu alterações favoráveis e significativas na densidade e tensão superficial e aumentou a viscosidade aparente do revestimento comestível. Foi observado também que esses revestimentos comestíveis estudados hidratam parcialmente as superfícies de amêndoa e chocolate (LOPEZ-POLO *et al.*, 2020).

- 2020: Produção de embalagens feitas de nanofibrilas híbridas de zeína-etilcelulose com óleo essencial de canela para preservação de cogumelos durante seu armazenamento. Os testes apresentaram ótimos resultados, como boa resistência à água, redução da perda de massa e firmeza dos cogumelos sendo mantida, além de melhora na qualidade do produto durante o armazenamento do mesmo, mostrando um ótimo potencial para embalagem para preservação de cogumelos, como pode ser observado na Figura 17 (NIU *et al.*, 2020).

Figura 17: Mudanças na aparência do cogumelo durante o armazenamento, sem uso de filme, com uso de filme de CNF e com uso de filme de CNF com óleo essencial de canela.



Fonte: NIU *et al.*, 2020.

- 2020: Produção de filmes de hemicelulose acetilada (AH)-nanocelulose (CNC) revestidos com filmes de policaprolactona (PCL), para uso em embalagens ativas para alimentos aquosos, alcoólicos, gordurosos e ácidos. Os resultados dos testes realizados foram bem sucedidos e mostraram que esses filmes tem um grande potencial de uso como embalagens ativas para alimentos gordurosos (MUGWAGWA & CHIMPHANGO, 2020).

- 2020: Desenvolvimento de um filme nanocompósito probiótico à base de carboximetilcelulose (CMC) contendo nanofibra de celulose (CNF) e inulina para prolongamento da vida útil do filé de frango. Esse filme que foi desenvolvido é uma embalagem bioativa, uma nova tecnologia alternativa para preservar a qualidade e segurança de produtos alimentícios com benefícios à saúde. Os resultados das análises mostraram que os filmes probióticos à base de CMC contendo CNF e inulina exibiram propriedades de tração e de barreira à água satisfatórias e, devido a característica prebiótica da inulina, sua adição aumentou significativamente a viabilidade de bactérias probióticas nos filmes durante o tempo de armazenamento. Foi observado também que a amostra de filme probiótico mostrou atividade antibacteriana contra nove patógenos e também estendeu a vida útil do filé de frango quando envolvido no mesmo (ZABIHOLLAHI *et al.*, 2020).

- 2020: Criação de filmes de alginato carregados com nanocristais de celulose (CNC) contra a oxidação lipídica do peito de frango. Os resultados mostraram efeitos promissores de barreira UV e redução de permeabilidade ao oxigênio. O revestimento comestível em peitos de frango também demonstrou uma diminuição do valor de peróxido lipídico e das substâncias reagentes do ácido tiobarbitúrico, além de não ter sido indicada nenhuma alteração oxidativa pela cor do frango (CRIADO *et al.*, 2020).

- 2020: Preparação de um filme nanofibrilado de celulose/quitosana/polipirrol para embalagem ativa de alimentos. Através de uma abordagem verde, eficaz e completa, os pesquisadores prepararam filmes compostos com propriedades antioxidantes e antibacterianas aprimoradas e propriedades de barreira ao oxigênio. Após várias análises, considerando diversas propriedades, o filme compósito nanocelulose/quitosana/polipirrol foi utilizado com sucesso na embalagem ativa de tomate cereja fresco, prolongando

efetivamente a vida de prateleira, como se pode observar na Figura 18 (GAO *et al.*, 2020).

Figura 18: Simulação de embalagens de alimentos após serem cobertas com o filme de celulose nanofibrilada (a e d), filme de celulose nanofibrilada/quitosana (b e e) e filme de celulose nanofibrilada/quitosana/polipirrol (c e f) por 10 dias



Fonte: GAO *et al.*, 2020.

- 2021: Estudo realizado para analisar as vantagens da incorporação de nanocristais de celulose (CNC) e nanofibrilas de celulose (CNF) em filmes de embalagens de alimentos comestíveis (EFP). Após várias análises, foi observado que, suas ótimas propriedades de tração e estabilidade fazem com que tanto a incorporação de CNC, quanto a de CNF gerem efeitos positivos nas propriedades físicas, mecânicas, de barreira e estruturais em filmes de embalagens de alimentos comestíveis. Apesar dos CNC e das CNF não serem excelentes agentes antioxidantes e antibacterianos, como são estabilizadores e agentes de liberação controlada, eles melhoram as propriedades antioxidantes e antibacterianas do filme, o que é crucial para a preservação de alimentos (ZHANG *et al.*, 2021).

- 2021: Preparação de filmes à base de konjac glucomanano reforçados com nanopartículas para preservação de tomates cereja. Os resultados mostraram que os filmes produzidos apresentaram propriedades satisfatórias, sugerindo um alto potencial para aplicação em embalagens para conservação de tomate cereja, como pode ser observado na Figura 19 (XIANG *et al.*, 2021).

Figura 19: A qualidade visual com armazenamento do 6º ao 10º dia de tomate cereja sem embalagem, embalados com filme de konjac glucomanano/nanocelulose e embalados com filmes tradicionais de polietileno.



Fonte: XIANG *et al.*, 2021.

- 2021: Preparação de filmes ativos de poli (butileno adipato- co - tereftalato) (PBAT) carregados com nanofibrilas de celulose (CNF) incorporados com óleo essencial de canela (OE) para aplicação em embalagens ativas biodegradáveis para morango. Influenciados pelos problemas existentes associados ao alto consumo de produtos plásticos e seu descarte incorreto, resultando em graves problemas sociais, econômicos e ambientais que foram agravados durante a pandemia do covid-19, pesquisadores resolveram desenvolver embalagens biodegradáveis, prezando pela demanda por segurança e qualidade alimentar. E, após diversas análises, os resultados obtidos indicaram que os filmes desenvolvidos melhoraram as qualidades dos morangos e possuem propriedades antimicrobianas contra *Salmonellae* *Listeria monocytogenes*, sendo uma potencial alternativa aos materiais sintéticos como embalagens de alimentos (MONTERO *et al.*, 2021).

7. Conclusão

Devido às suas diversas propriedades como biodegradabilidade, biocompatibilidade, não toxicidade e a ser obtida de fonte renovável, a nanocelulose tem sido muito estudada para uso em diversas áreas, como por exemplo, a de alimentos, na qual os nanocristais de celulose (CNC), as nanofibrilas de celulose (CNF) e a celulose bacteriana (BC) têm várias aplicações possíveis, podendo ser usadas como agente estabilizador, em alimentos funcionais e em embalagens, filmes e revestimentos de alimentos. As pesquisas sobre as aplicabilidades da nanocelulose no setor alimentício e os desenvolvimentos de novos produtos usando este material são muitos e a cada dia surgem mais estudos sobre ele, pois é um material fácil de ser encontrado e extraído, contribui para a sustentabilidade do meio ambiente e é rico em propriedades que colaboram para a saúde humana.

8. Referências Bibliográficas

ABDOLLAHI, M.; ALBOOFETILEH, M. BEHROOZ, R.; REZAEI, M.; MIRAKI, R. Reducing water sensitivity of alginate bio-nanocomposite film using cellulose nanoparticles. **International Journal of Biological Macromolecules**, v.54, p. 166-173, 2013.

ABDUL KHALIL, H.P.S.; DAVOUDPOUR, Y.; ISLAM, M.I.; MUSTAPHA, A.; SUDESH, K.; DUNGANI R.; JAWAID, M. Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 99, p. 649-665, 2014.

ABIA - Associação Brasileira da Indústria de Alimentos, 2021. Disponível em: <https://www.abia.org.br>. Acesso em: 02/12/2021.

AFRIN, S.; KARIN, Z. Isolation and Surface Modification of Nabicellulose: Necessity os Enzymes over Chemicals. **ChemBioEng Reviews**, v. 4, n. 5, p. 289-303, 2017.

AHANKARI, S.S.; SUBHEDAR, R.S.; BHADAURIA, S.S.; DUFRESNE, A. Nanocellulose in food packaging: A review. **Carbohydrate Polymers**, v.255, p. 117479, 2021.

AHREM, H.; PRETZEL, D.; ENDRES, M.; CONRAD, D.; CORSEAU, J.; et al. Laser-structured bacterial nanocellulose hydrogels support ingrowth and differentiation of chondrocytes and show potential as cartilage implants. **Acta Biomaterialia**, v. 10, n.3, p. 1341-1353, 2014.

AJELOU, Z.; NIKFARJAM, N.; DENG, Y.; TAHERI-QAZVINI, N. Expanded polystyrene via stabilized water droplet by in-situ modified starch nanocrystals. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.582, p. 123863, 2019.

ALEMDAR, A.; SAIN, M. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues – Wheat straw and soy hulls. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 6, p. 1664-1671, 2008.

ALMASI, H.; GHANBARZADEH, B.; DEGHANNYA, J.; ENTEZAMI, A.A.; KHOSROSHAHI, A. Novel nanocomposites based on fatty acid modified cellulose nanofibers/poly (lactic acid): Morphological and physical properties. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 5, p. 21-31, 2015.

- ALZATE-ARBELÁEZ, A. F.; DORTA, E.; LÓPEZ-ALARCÓN, C.; CORTÉS, F. B., ROJANO, B. A. Immobilization of Andean berry (*Vaccinium meridionale*) polyphenols on nanocellulose isolated from banana residues: A natural food additive with antioxidant properties. **Food Chemistry**, v. 294, p. 503-517, 2019.
- ANDRADE, D.R.M.; MENDONÇA, M.H.; HELM, C.V.; MAGALHÃES, W.L.E.; MUNIZ, G.I.B., KESTUR, S.G. Avaliação da nanocelulose de resíduo de pupunheira como potencial aditivo alimentar: parte II: estudos preliminares. **Jornal da Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.52, p. 5641-5650, 2015.
- APPENDINI, P.; HOTCHKISS, J.H. Review of antimicrobial food packaging. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.3, n. 2, p.113-126, 2002.
- APRE Florestas – Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal. Os múltiplos usos da nanocelulose, 2020. Disponível em: <https://apreflorestas.com.br/noticias/os-multiplos-usos-da-nanocelulose/>. Acesso em: 18/11/2021.
- ASGHARI, M.; ZARCHI, A.A.K.; TAHERI, R.A. Preparation and characterization nanocrystalline cellulose as a food additive to produce healthy biscuit cream. **Starch-Stärke**, v. 73, n. 3-4, p. 2000033, 2021.
- AULIN, C.; GÄLLSTEDT, M.; LINDSTRÖM, T. Oxygen and oil barrier properties of microfibrillated cellulose films and coatings. **Cellulose**, v.17, n. 3, p. 559-574, 2010.
- BIDEAU, B.; LORANGER, E.; DANEULT, C. Nanocellulose-polypyrrole-coated paperboard for food packaging application. **Progress in Organic Coatings**, v. 123, p. 128-133, 2018.
- BOUMAIL, A.; SALMIERI, S.; KLIMAS, E.; TAWEMA, P.O.; BOUCHARD, J.; LACROIX, M. Characterization of trilayer antimicrobial diffusion films (ADFs) based on methylcellulose-polycaprolactone composites. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.61, n. 4, p. 811-821, 2013.
- BURGOS, N.; TOLAGUERA, D.; FIORI, S.; JIMÉNEZ, A. Synthesis and characterization of lactic acid oligomers: Evaluation of performance as poly(Lactic acid) plasticizers. **Journal of Polymers and the Environment**, v.22, n. 2, p. 227-235, 2014.

CANTIANI, R.; KNIPPER, M.; VASLIN, S. US 6485767. Washington, DC: EUA: Patent and Trademark Office. 2002.

CHEN, W.; YU, H.; LIU, Y.; CHEN, P.; ZHANG, M.; HAI, Y. Individualization of cellulose nanofibers from wood using high-intensity ultrasonication combined with chemical pretreatments. **Carbohydrate Polymers**, v. 83, n. 4, p. 1804-1811, 2011.

CHERIAN, B. M.; LEÃO, A.L.; SOUZA, S.F.; COSTA, L.M.M.; OLYVEIRA, G.M.; KOTTAISAMY, M.; NAGARAJAN, E.R.; THOMAS, S. Cellulose nanocomposites with nanofibres isolated from pineapple leaf fibers for medical applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, n. 4, p. 1790-1798, 2011.

CLARO, F.C.; JORDÃO, C. As inovações tecnológicas do sistema florestal: Nanocelulose. Revista Opiniões. 2013.

CORRAL, M. L.; CERRUTI, P.; VÁSQUEZ, A.; CALIFANO, A. Bacterial nanocellulose as a potential additive for wheat bread. **Food Hydrocolloids**, v. 67, p. 189-196, 2017.

CRIADO, P.; FRASCHINI, C.; SALMIERI, S.; LACROIX, M. Cellulose nanocrystals (CNCs) loaded alginate films against lipid oxidation of chicken breast. **Food Research International**, v. 132, p. 109110, 2020.

CUNHA, Renato. Nanocelulose: um inovador material extraído de plantas que revolucionará a ciência e a tecnologia. StyloUrbano, 2017.

D'ALMEIDA, M. L. O. Composição química dos materiais lignocelulósicos. Celulose e papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1988. v. 1, cap. 3, p. 45 – 106.

DE OLIVEIRA, J.P.; BRUNI, G.P.; EL HALAL, S.L.M.; BERTOLDI, F.C.; DIAS, A.R.G.; ZAVAREZE, E.R. Cellulose nanocrystals from rice and oat husks and their application in aerogels for food packaging. **International journal of biological macromolecules**, v. 124, p. 175-184, 2019.

DEHNAD, D.; EMAM-DJOMEH, Z.; MIRZAEI, H.; JAFARI, S.M.; DADASHI, S. Optimization of physical and mechanical properties for chitosan-nanocellulose biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, v.105, p. 222-228, 2014.

DELOID, G.M.; SOHAL, I.S.; LORENTE, L.R.; MOLINA, R.M.; PYRGOTAKIS, G.; STEVANOVIC, A.; et al. Reducing intestinal digestion and absorption of fat using a nature-derived biopolymer: Interference of triglyceride hydrolysis by nanocellulose. **ASC Nano**, v. 12, n. 7, p. 6469-6479, 2018.

DELOID, G.M.; SOHAL, I.S.; LORENTE, L.R.; MOLINA, R.M.; PYRGIOTAKIS, G.; STEVANOVIC, A.; ZHANG, R.; MCCLEMENTS, D.J.; et al. Reducing Intestinal Digestion and Absorption of Fat Using a Nature-Derived Biopolymer: Interference of Triglyceride Hydrolysis by Nanocellulose. **ACS Nano**, v.12, n. 7, p. 6469-6479, 2018.

DUFRESNE, A. Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial. **Materials Today**, v. 16, n. 6, p. 220-227, 2013.

EMBRAPA– Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Estudo é capaz de baratear produção da celulose bacteriana. Disponível em: [https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/44532141/estudo-e-capaz-de-baratear-producao-da-celulose-bacteriana#:~:text=material%20mais%20acess%C3%ADvel-](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/44532141/estudo-e-capaz-de-baratear-producao-da-celulose-bacteriana#:~:text=material%20mais%20acess%C3%ADvel-,Um%20trabalho%20desenvolvido%20pela%20Embrapa%20pode%20reduzir%20consideravelmente%20o%20custo,nobre%20mas%20ainda%200subexplorado%20industrialmente. Acesso em: 20/11/2021)

,Um%20trabalho%20desenvolvido%20pela%20Embrapa%20pode%20reduzir%20consideravelmente%20o%20custo,nobre%20mas%20ainda%200subexplorado%20industrialmente. Acesso em: 20/11/2021

ESLAHI, N.; MAHMOODI, A.; MAHMOUDI, N. ZANDI, N., SIMCHI, A. Processing and properties of nanofibrous bacterial cellulose-containing polymer composites: A review of recente advances for biomedical applications. **Polymer Reviews**, v.60, n. 1, p. 144-170, 2020.

ESPARZA, Y.; NGO, T.D.; BOLUK, Y. Preparation of powdered oil particles by spray drying of cellulose nanocrystals stabilized Pickering hempseed oil emulsions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.598, p. 124823, 2020.

FRANCO, T. S.; DE MUNIZ, G. I. B. Nanocellulose in food science and technology-potential, advantages and gaps of research. **Interfaces**, v. 29, p. 83-95, 2015.

FU, L.; ZHANG, J.; YANG, G. Present status and applications of bacterial cellulose-based materials for skin tissue repair. **Carbohydrate Polymers**, v. 92, n. 2, p. 1432-1442, 2013.

- GAO, Q.; LEI, M.; ZHOU, K.; LIU, X.; WANG, S.; LI, H. Preparation of a microfibrillated cellulose/chitosan/polypyrrole film for Active Food Packaging. **Progress in Organic Coatings**, v.149, p.105907, 2020.
- GHADERI, M.; MOUSAVI, M.; YOUSEFI, H.; LABBAFI, M. All-cellulose nanocomposite film made from bagasse cellulose nanofibers for food packaging application. **Carbohydrate polymers**, v. 104, p. 59-65, 2014.
- GÓMEZ, C.; SERPA, A.; VELÁSQUES-COOK, J.; GAÑÁN, P.; CASTRO, C.; VÉLEZ, L.; ZULUAGA, R. Vegetable nanocellulose in food Science: A review. **Food Hydrocolloids**, v. 57, p. 178-186, 2016.
- HAN, Y.; YU, M.; WANG, L. Physical and antimicrobial properties of sodium alginate/carboxymethyl cellulose films incorporated with cinnamon essential oil. **Food Packaging and Shelf Life**, v.15, p. 35-42, 2018.
- HEGGSET, E. B.; CARRASCO, G. C.; SYVERUD, K. Temperature stability of nanocellulose dispersions. **Carbohydrate Polymers**, v. 157, p. 114-121, 2017.
- HOSSAIN, F.; FOLLETT, P.; SALMIERI, S.; VU, K.D.; FRASCHINI, C.; LACROIX, M. Antifungal activities of combined treatments of irradiation and essential oils (EOs) encapsulated chitosan nanocomposite films in vitro and in situ conditions. **International journal of food microbiology**, v. 295, p. 33-40, 2019.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. CONCLA - Comissão Nacional de Classificação, 2022. Disponível em: <https://concla.ibge.gov.br/busca-online-cnae.html?view=divisao&tipo=cnae&versao=10&divisao=10>. Acesso em: 20/02/2022
- INNAMI, S.; FUKUI, Y. US 4659388. Washington, DC: EUA: Patent and Trademark Office. 1987.
- JAFARI, S.M.; BAHRAMI, I.; DEHNAD, D.; SHAHIDI, S.A. The influence of nanocellulose coating on saffron quality during storage. **Carbohydrate Polymers**, v.181, p. 536-542, 2018.
- JUNG, S.; CUI, Y.; BARNES, M.; SATAM, C.; ZHANG, S.; CHOWDHURY, R.A.; et al. Multifunctional bio-nanocomposite coatings for perishable fruits. **Advanced Materials**, v.32, n. 26, p. 1908291 2020.

- KARGARZADEH, H.; SHELAMI, R.M.; AHMAD, I.; ABDULLAH, I.; DUFRESNE, A. Cellulose nanocrystal: A promising toughening agent for unsaturated polyester nanocomposite. **Polymer**, v. 15, p. 346-357, 2015.
- KAUSHIK, A.; SINGH, M. Isolation and characterization of cellulose nanofibrils from wheat straw using steam explosion coupled with high shear homogenization. **Carbohydrate Research**, v. 346, n.1, p. 76-85, 2011.
- KHAN, S.; SIDDIQUE, R., HUANFEI, D.; SHEREEN, M.A.; NABI, G.; BAI, Q. et al. Perspective applications and associated challenges of using nanocellulose in treating bone-related diseases. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 9, p. 350, 2021.
- KLEINSCHMIDT, DC, ROBERTS, BA, FUQUA, DL e MELCHION, JR. US 4774095. Washington, DC: EUA: Patent and Trademark Office. 1988.
- KLEMM, D. et al. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. **Angewandte Chemie-International Edition**, v. 44, n. 22, p. 3358-3393, 2005.
- KLEMM, D.; SCHUMANN, D.; KRAMER, N.; HESSLER, N.; HORNING, M.; SCHMAUDER, H. P. et al. Nanocelluloses as innovative polymers in research and application. In: **Polysaccharides II**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. p. 49-96.
- LAVOINE, N.; DESLOGES, I.; DUFRESNE, A.; BRAS, J. Microfibrillated cellulose – Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 90, n. 2, p. 735-764, 2012.
- LAVORATTI, Alessandra. Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos poliéster/nanocelulose. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias – Centro de Ciências Exatas e Tecnologias – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2015.
- LI, Q.; XIE, B.; WANG, Y.; PENG, L.; LI, Y.; et al. Cellulose nanofibrils from Miscanthus floridulus straw as green particle emulsifier for O/W Pickering emulsion. **Food Hydrocolloids**. V.97, p. 105214, 2019.
- LIN, K. W.; LIN, H. Y. Quality characteristics of Chinese-style meatball containing bacterial cellulose (nata). **Journal of Food Science**, v. 69, n. 3, p. 107-111, 2004.

LIN, N.; DUFRESNE, A. Nanocellulose in biomedicine: Current status and future prospect. **European Polymer Journal**, v. 59, p. 302-325, 2014.

LIN, S. B.; CHEN, L. C.; CHEN, H. H. Physical characteristics of surimi and bacterial cellulose composite gel. **Journal of Food Process Engineering**, v. 34, n. 4, p. 1363-1379, 2011.

LIU, L.; KONG, F. In vitro investigation of the influence of nano-cellulose on starch and milk digestion and mineral adsorption. **International Journal of Biological Macromolecules**, v.137, p. 1278-1285, 2019.

LOPEZ-POLO, J.; SILVA-WEISS, A.; ZAMORANO, M.; OSORIO, F.A. Humectability and physical properties of hydroxypropyl methylcellulose coatings with liposome-cellulose nanofibers: Food application. **Carbohydrate Polymers**, v. 231, p. 115702, 2020.

LUZI, F.; FORTUNATI, E.; GIOVANALE, G.; MAZZAGLIA, A.; TORRE, L.; BALESTRA, G.M. Cellulose nanocrystals from *Actinidia deliciosa* pruning residues combined with carvacrol in PVA-CH films with antioxidant/antimicrobial properties for packaging applications. **International journal of biological macromolecules**, v. 104, p. 43-55, 2017.

MENON, V. & RAO, M. Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.38, n. 4, p. 522-550, 2012.

MIZUGUCHI, K.; FUJIOKA, I.; KOBAYASHI, H. JP58190352. Japão: Patent and Trademark Office. 1983a.

MIZUGUCHI, K.; FUJIOKA, I.; KOBAYASHI, H. JP58190369. Japão: Patent and Trademark Office. 1983b.

MONTERO, Y.; SOUZA, A. G.; OLIVEIRA, E. R.; dos SANTOS ROSA, D. Nanocellulose functionalized with cinnamon essential oil: A potential application in active biodegradable packaging for strawberry. **Sustainable Materials and Technologies**, v.29, p. e00289, 2021.

MOON, R.J.; MARTINI, A.; NAIRN, J.; SIMONSEN, J.; YOUNGBLOOD, J. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. **Chemical Society Reviews**, v. 40, n. 7, p. 3941-3994, 2011.

- MORITZ, S.; WIEGAND, C.; WESARG, F.; HESSLER, N.; MÜLLER, F.A.; KRALISCH, D.; HIPLER, U.; FISCHER, D. Active wound dressings based on bacterial nanocellulose as drug delivery system for octenidine. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 471, n. 1-2, p. 45- 55, 2014.
- MUGWAGWA, L. R. & CHIMPHANGO, A. F. Enhancing the functional properties of acetylated hemicellulose films for active food packaging using acetylated nanocellulose reinforcement and polycaprolactone coating. **Food Packaging and Shelf Life**, v.24, p. 100481, 2020.
- NAMBIAR, R.B.; SELLAMUTHU, P.S.; PERUMAL, A.B.; SADIKU, E.R.; ADEYEYE, O.A. The use of chitosan in food packaging application. In: **Green biopolymers and their nanocomposites**. Springer, Singapore, 2019. p. 125-136.
- DO NASCIMENTO, DIEGO MAGALHÃES. Hidrogéis verdes reforçados com nanocristais e nanofibrilas de celulose. **Embrapa Agroindústria Tropical-Tese/dissertação (ALICE)**, 2018.
- NIMERSKERN, L.; ÁVILA, H.M.; SUNDBERG, J.; GATENHOLM, P.; MÜLLER, R.; KATHRYN, S.S. Mechanical evaluation of bacterial nanocellulose as an implant material for ear cartilage replacement. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 22, p. 12-21, 2013.
- NIU, B.; ZHAN, L.; SHAO, P.; XIANG, N.; SUN, P.; CHEN, H.; GAO, H. Electrospinning of zein-ethyl cellulose hybrid nanofibers with improved water resistance for food preservation. **International journal of biological macromolecules**, v.142, p. 592-599, 2020.
- NIU, X.; LIU, Y.; SONG, Y.; HAN, J.; PAN, H. Rosin modified cellulose nanofiber as a reinforcing and co-antimicrobial agents in polylactic acid/chitosan composite film for food packaging. **Carbohydrate polymers**, v. 183, p. 102-109, 2018.
- Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação: FAO no Brasil | Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/pt/>. Acesso em: 02/12/2021.
- OUN, A.A.; RHIM, J.W. Preparation and characterization of sodium carboxymethyl cellulose/cotton linter cellulose nanofibril composite films. **Carbohydrate Polymers**, v. 127, p. 101-109, 2015.

PERUMAL, A.B.; SELLAMUTHU, P.S., NAMBIAR, R.B., SADIKU, E.R., ADEYEYE, O.A. Biocomposite reinforced with nanocellulose for packaging applications. In: **Green Biopolymers and their Nanocomposites**. Springer, Singapore, 2019. p. 83-123.

PERUMAL, A.B.; SELLAMUTHU, P.S.; NAMBIAR, R.B.; SADIKU, E.R. Development of polyvinyl alcohol/chitosan bio-nanocomposite films reinforced with cellulose nanocrystals isolated from rice straw. **Applied Surface Science**, v. 449, p. 591-602, 2018.

PERUMAL, A.B.; SELLAMUTHU, P.S.; NAMBIAR, R.B.; SADIKU, E.R. Effects of multiscale rice straw (*Oryza sativa*) as reinforcing filler in montmorillonite-polyvinyl alcohol biocomposite packaging film for enhancing the storability of postharvest mango fruit (*Mangifera indica* L.). **Applied Clay Science**, v. 158, p. 1-10, 2018.

REQUE, P.M.; BRANDELLI, A. Encapsulation of probiotics and nutraceuticals: Applications in functional food industry. **Trends in Food Science & Technology**, v.114, p. 1-10, 2021.

SALMIERI, S.; ISLAM, F.; KHAN, R.A.; HOSSAIN, F.M.; IBRAHIM, H.M.M.; MIAO, C.; et al. Antimicrobial nanocomposite films made of poly(lactic acid)–cellulose nanocrystals (PLA–CNC) in food applications—part B: Effect of oregano essential oil release on the inactivation of *Listeria monocytogenes* in mixed vegetables. **Cellulose**, v.21, n. 6, p. 4271-4285, 2014.

SANTOS, F. A. Potencial da Palha de Cana-de-Açúcar para Produção de Etanol. **Química Nova**. v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SHI, Z.; ZHANG, Y.; PHILLIPS, G.O.; YANG, G. Utilization of bacterial cellulose in food. **Food Hydrocolloids**, v. 35, p. 539-545, 2014.

SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 661-671, 2009.

SLAVUTSKY, A. M.; BERTUZZI, M. A. Water barrier properties of starch films reinforced with cellulose nanocrystals obtained from sugarcane bagasse. **Carbohydrate polymers**, v. 110, p. 53-61, 2014.

- SONG, Z.; XIAO, H.; ZHAO, Y. Hydrophobic-modified nano-cellulose fiber/PLA biodegradable composites for lowering water vapor transmission rate (WVTR) of paper. **Carbohydrate polymers**, v. 111, p. 442-448, 2014.
- STRÖM, G.; ÖHGREN, C.; ANKERFORS, M. Nanocellulose as a food additive. Estolcomo. 2013.
- STRÖM, G.; ÖHGREN, C.; ANKERFORS, M. Nanocellulose as an additive in foodstuff. **Innventia Report**, v. 403, p. 1-25, 2013.
- SVAGAN, A.J.; KOCH, C.B.; HEDENQVIST, M.S.; NILSSON, F.; GLASSER, G.; BALUSCHEV, S. et al. Liquid-core nanocellulose shell capsules with tunable oxygen permeability. **Carbohydrate Polymers**, v.136, p. 292-299, 2016.
- TURBACK, A. F.; SNYDER, F. W.; SANDBERG, K. R. Food products containing microfibrillated cellulose. US 4341807. Washington, DC: EUA: Patent and Trademark Office. 1982.
- TURBACK, A. F.; SNYDER, F. W.; SANDBERG, K. R. Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: Properties, uses and commercial potential. In: Journal of Applied Polymer Science, 1983. p. 815-827.
- TURBACK, A. F.; SNYDER, F. W.; SANDBERG, K. R. US 4378381. Washington, DC: EUA: Patent and Trademark Office. 1983b.
- VELÁSQUEZ-COCK, J.; SERPA, A.; VÉLEZ, L.; GAÑÁN, P.; HOYOS, C.G.; CASTRO, C.; et al. Influence of cellulose nanofibrils on the structural elements of ice cream. **Food Hydrocolloids**, v.87, p. 204-213, 2019.
- WANG, H.; WANG, L. Developing a bio-based packaging film from soya by-products incorporated with valonea tannin. **Journal of Cleaner Production**, v.143, p. 624-633, 2017.
- WANG, J.; TAVAKOLI, J.; TANG, Y. Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods – A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 219, p. 63-76, 2019.
- WINUPRASITH, T.; SUPHANTHARIKA, M. Properties and stability of oil-in-water emulsions stabilized by microfibrillated cellulose from mangosteen rind. **Food Hydrocolloids**, v.43, p. 690-699, 2015.
- XIANG, F.; XIA, Y.; WANG, Y.; WANG, Y.; WU, K.; NI, X. Preparation of konjac glucomannan based films reinforced with nanoparticles and its

effect on cherry tomatoes preservation. **Food Packaging and Shelf Life**, v.29, p. 100701, 2021.

YANG, L.; PAULSON, A.T. Mechanical and water vapour barrier properties of edible gellan films. **Food Research International**, v. 33, n. 7, p. 563-570, 2000.

YANO, H.; ABE, K.; KASE, Y., KIKKAWA, S., ONISHI, Y. US 20140342075 A1. Washington DC: Pedido de Patente US no. 14/344158.

YOUSEFI, H.; FAEZIPOUR, M.; HEDJAZI, S.; MOUSAVI, M.M.; AZUSA, Y.; HEIDARI, A.H. Comparative study of paper and nanopaper properties prepared from bacterial cellulose nanofibers and fibers/ground cellulose nanofibers of canola straw. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p. 732-737, 2013.

YU, H.; YAN, C.; YAO, J. Fully biodegradable food packaging materials based on functionalized cellulose nanocrystals/poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) nanocomposites. **Rsc Advances**, v. 4, n. 104, p. 59792-59802, 2014.

YU, H.Y.; YANG, X.Y.; LU, F.F.; CHEN, G.Y.; YAO, J.M. Fabrication of multifunctional cellulose nanocrystals/poly (lactic acid) nanocomposites with silver nanoparticles by spraying method. **Carbohydrate Polymers**, v. 140, p. 209-219, 2016.

ZABIHOLLAHI, N.; ALIZADEH, A.; ALMASI, H.; HANIFIAN, S.; HAMISHEKAR, H. 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, 2020.

ZANCHETTA, G.; ROCCHI, E.; PIAZZA, L. Seeing is believing: Coupling between liquid crystalline ordering and rheological behaviour in Cellulose Nanocrystals suspensions. **Chemical Engineering Transactions**, v.57, p. 1933-1938, 2017.

ZHANG, W.; ZHANG Y.; CAO, J.; JIANG, W. Improving the performance of edible food packaging films by using nanocellulose as an additive: Review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 166, p. 288-296, 2021.