

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARCELLE LUIZ GOMES

**DESENVOLVIMENTO DE HIDROGEL BIOPOLIMÉRICO PARA APLICAÇÃO EM
SOLUÇÕES AGRÍCOLAS**

**Bagé
2025**

MARCELLE LUIZ GOMES

**DESENVOLVIMENTO DE HIDROGEL BIOPOLIMÉRICO PARA APLICAÇÃO EM
SOLUÇÕES AGRÍCOLAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharelado em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gabriela Silveira da Rosa

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Luisa Bataglin Avila

**Bagé
2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

G633d Gomes, Marcelle Luiz

Desenvolvimento de hidrogel biopolimérico para aplicação em
soluções agrícolas / Marcelle Luiz Gomes.

74 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA QUÍMICA, 2025.

"Orientação: Gabriela Silveira da Rosa".

1. Hidrogel. 2. Liberação sustentada. 3. Condicionante. 4.
Reticulação verde. 5. Agricultura. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

MARCELLE LUIZ GOMES

**DESENVOLVIMENTO DE HIDROGEL BIOPOLIMÉRICO PARA APLICAÇÃO EM SOLUÇÕES
AGRÍCOLAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Química da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Química.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 11 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof.^a Dr.^a Gabriela Silveira da Rosa

Orientadora

Unipampa

Prof.^a Dr.^a Luisa Bataglin Avila

Coorientadora

Unipampa

Prof.^a Dr.^a Caroline Costa Moraes
Unipampa

Dr.^a Vanessa Rosseto
Unipampa



Assinado eletronicamente por **CAROLINE COSTA MORAES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GABRIELA SILVEIRA DA ROSA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 10:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **VANESSA ROSSETO, Técnico de Laboratório Área**, em 11/12/2025, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Luisa Bataglin Avila, Usuário Externo**, em 12/12/2025, às 18:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1924156** e o código CRC **07E436C6**.

Referência: Processo nº 23100.022354/2025-49 SEI nº 1924156

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, Cátia e Luciano. Todo o percurso até aqui só foi possível graças ao amor, ao suporte e inúmeros ensinamentos que sempre me ofereceram. Cada palavra de incentivo, cada gesto de cuidado e cada esforço, permitiram que eu chegasse até esta etapa. A eles devo não apenas a minha formação acadêmica, mas também os valores que carrego comigo. Ao meu irmão, Guilherme, expressei minha gratidão por ser meu melhor amigo e companheiro em todas as etapas da vida. Aos meus familiares, especialmente aos meus avós, Romilda e Joveli, Iara e Gomes, minha gratidão por todo amor e compreensão diante das minhas ausências. À Luna Maria, minha companheira de quatro patas, agradeço pelo carinho e por alegrar meus dias.

Ao meu amor, Leonardo de Oliveira, agradeço pelo amor, pela paciência e pelo apoio emocional que me acompanharam em cada fase desta caminhada acadêmica. Em muitos momentos em que tudo parecia pesado demais, encontrei nele o refúgio que me ajudou seguir. À família Melchhiades de Oliveira, que sempre me recebeu com carinho e acolhimento, deixo também meu agradecimento sincero por fazerem parte dessa trajetória.

Aos meus amigos, Laura, Liandre, Márcio Lucas, Rafael, Raykar, Samuelly e Eduardo, agradeço pela presença, pelas conversas e pelas risadas. A amizade de vocês tornou essa fase muito mais leve e divertida. À Isabella, agradeço especialmente por ter sido meu apoio neste final, pela companhia nos laboratórios, pelas trocas, mates e pela parceria.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Gabriela Silveira da Rosa, e à minha coorientadora, Prof^a. Dr^a. Luisa Bataglin Avila, agradeço de forma especial pela dedicação, paciência e pelas inúmeras contribuições que tornaram este trabalho possível. Obrigada por acreditarem no meu potencial e por conduzirem este processo.

Agradeço também ao GPESP pelo apoio e pelo ambiente de aprendizado durante o desenvolvimento deste estudo, e aos técnicos dos laboratórios de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos pelo suporte e colaboração nas atividades experimentais.

À Unipampa, agradeço pela estrutura disponibilizada e pelas oportunidades que ampliaram minha formação. Ao corpo docente do curso de Engenharia Química, minha gratidão por cada disciplina, orientação e por contribuírem diretamente na profissional que estou me tornando.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, cruzaram meu caminho ao longo desta jornada. Cada gesto, palavra, incentivo ou presença teve importância na construção deste trabalho e nesta etapa tão significativa da minha vida.

RESUMO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios para a agricultura, setor fundamental para a segurança alimentar e desenvolvimento humano. A instabilidade climática tem afetado diariamente a disponibilidade de água, qualidade do solo e a produtividade das culturas. Diante desse cenário, torna-se essencial desenvolver tecnologias que tornem a produção agrícola mais sustentável e resiliente. Os hidrogéis surgem como uma solução promissora devido à sua capacidade de reter grandes quantidades de água e liberá-la gradualmente no solo, assim otimizando a necessidade de irrigação frequente e auxiliando na manutenção da umidade em períodos de seca. Além disso, esses materiais possibilitam a incorporação e a liberação sustentada de nutrientes, otimizando a utilização de insumos como, fertilizantes ou herbicidas, e contribuindo para práticas agrícolas mais eficientes. Com o intuito de tornar essa tecnologia mais acessível e sustentável, o presente estudo possui como objetivo, o desenvolvimento de hidrogéis biopoliméricos, utilizando diferentes tipos de reticulação e agentes reticulantes verdes. Esses compostos não apenas substituem reticulantes tóxicos, mas também oferecem vantagens como biodegradabilidade e biocompatibilidade. Os hidrogéis biopoliméricos foram sintetizados por meio do método de *casting* para a reticulação química e pela reticulação iônica utilizando íons cloreto, com a incorporação de fertilizante ainda na etapa de preparação. As análises realizadas abrangeram intumescimento, liberação sustentada de nutrientes e testes *in vivo* com aplicação em mudas de alface, permitindo verificar o desempenho dos hidrogéis em condições que simulam sua aplicação agrícola. Os hidrogéis sintetizados apresentaram diferenças entre os tipos de reticulação. Nos ensaios de intumescimento, a formulação quimicamente reticulada alcançou $1106,10 \pm 7,50$ %, enquanto a reticulação iônica apresentou $212 \pm 9,97$ %, evidenciando o impacto da densidade de ligações na capacidade de absorção de água. Nos testes de liberação sustentada, ambas as formulações liberaram o fertilizante de forma gradual, embora com comportamentos distintos, a reticulada quimicamente apresentou liberação inicial mais lenta, enquanto a iônica manteve um perfil mais uniforme. No teste *in vivo*, o hidrogel iônico favoreceu o desenvolvimento das mudas, enquanto o químico apresentou leve interferência no crescimento inicial. De modo geral, os hidrogéis demonstraram potencial para uso agrícola, pela capacidade de reter água e liberar nutrientes de forma sustentada, atendendo às demandas por materiais mais sustentáveis no setor.

Palavras-Chave: Hidrogel; Reticulação Verde; Agricultura; Condicionante; Liberação sustentada.

ABSTRACT

Climate change represents one of the greatest challenges to agriculture, a sector that is fundamental to food security and human development. Climate instability has continuously affected water availability, soil quality, and crop productivity. In this context, the development of technologies that promote more sustainable and resilient agricultural production becomes essential. Hydrogels emerge as a promising solution due to their ability to retain large amounts of water and gradually release it into the soil, thereby reducing the need for frequent irrigation and helping to maintain soil moisture during drought periods. In addition, these materials allow the incorporation and sustained release of nutrients, optimizing the use of agricultural inputs such as fertilizers or herbicides and contributing to more efficient farming practices. In order to make this technology more accessible and sustainable, the present study aimed to develop biopolymeric hydrogels using different crosslinking methods and green crosslinking agents. These compounds not only replace toxic crosslinkers but also offer advantages such as biodegradability and biocompatibility. The biopolymeric hydrogels were synthesized using the casting method for chemical crosslinking and ionic crosslinking using chloride ions, with fertilizer incorporation during the preparation stage. The analyses included swelling behavior, sustained nutrient release, and *in vivo* tests with application to lettuce seedlings, allowing the evaluation of hydrogel performance under conditions simulating agricultural use. The synthesized hydrogels exhibited differences according to the type of crosslinking. In swelling tests, the chemically crosslinked formulation reached $1106,10 \pm 7,50\%$, while the ionically crosslinked hydrogel showed $212 \pm 9,97\%$, highlighting the influence of crosslinking density on water absorption capacity. In sustained release tests, both formulations released the fertilizer gradually, although with distinct behaviors: the chemically crosslinked hydrogel showed a slower initial release, whereas the ionic hydrogel exhibited a more uniform release profile. In *in vivo* assays, the ionic hydrogel promoted better seedling development, while the chemically crosslinked hydrogel showed slight interference with early growth. Overall, the hydrogels demonstrated strong potential for agricultural applications due to their water retention capacity and sustained nutrient release, meeting the demand for more sustainable materials in the agricultural sector.

Keywords: Hydrogel; Green Crosslinking; Agriculture; Soil Conditioner; Sustained Release.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Projeção das mudanças de temperatura entre diferentes períodos.....	17
Figura 2- Representação da atuação do hidrogel em sistemas agrícolas.....	19
Figura 3- Comparação da curva de liberação convencional e de liberação lenta de nutriente .	21
Figura 4- Estrutura química da gelatina	25
Figura 5- Estrutura química do alginato de sódio.....	26
Figura 6- Representação da classificação dos principais métodos de reticulação.....	27
Figura 7- Forma estrutural dos métodos (A) físico e (B) químico	29

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Liberação sustentada de fertilizantes e nutrientes a partir de hidrogéis	22
Quadro 2- Aplicações do método de reticulação química em hidrogéis	29
Quadro 3- Aplicações do método de reticulação iônica em hidrogéis	31
Quadro 4- Aplicação de reticulantes verdes em hidrogéis	33

LISTA DE SIGLAS

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

FAO - Organização de Alimentos e Agricultura das Nações Unidas

FTIR – Transformada de Fourier

GPEPS – Grupo de Processos em Engenharia e Sistemas Particulados

MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura

NPK – Nitrogênio, Fósforo e Potássio

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

PNC – Plano Nacional de Adaptação a Mudança do Clima

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral.....	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Desafios da agricultura atual.....	16
3.2 Hidrogéis em aplicações agrícolas.....	18
3.2.1 Hidrogéis e a liberação sustentada de nutrientes	20
3.3 Biopolímeros.....	23
3.3.1 Gelatina.....	24
3.3.2 Alginato de sódio.....	25
3.4 Mecanismos de reticulação em hidrogéis	26
3.4.1 Reticulação por agentes químicos	29
3.4.2 Reticulação iônica	30
3.4.2 Reticulantes Verdes	32
4. DESENVOLVIMENTO	35
4.1 Artigo	35
5 CONCLUSÃO.....	58
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS.....	60
APÊNDICE A- RESUMO SIEPE	72

1 INTRODUÇÃO

A agricultura possui um papel fundamental para o desenvolvimento humano, pois assegura a produção de alimentos, fibras e energia. Sua importância transcende o campo econômico, sendo essencial para a segurança alimentar global e para o equilíbrio ambiental. Contudo, o setor enfrenta desafios cada vez mais críticos, como as mudanças climáticas, a escassez hídrica, degradação do solo e o crescente aumento na demanda por alimentos, que exigem soluções inovadoras e práticas mais sustentáveis para garantir a continuidade da produtividade (Maciel; Tunes, 2021; Nwachukwu, 2023).

Os hidrogéis surgem como uma alternativa promissora, uma vez que são materiais compostos por redes tridimensionais de polímeros hidrofílicos que se destacam por sua capacidade de reter grandes quantidades de água e liberá-la gradualmente no solo. Assim, na agricultura, oferecem vantagens como a melhoria na retenção de umidade no solo, redução da frequência de irrigação e liberação controlada de nutrientes, contribuindo para práticas mais sustentáveis (Narjary *et al.*, 2013). No entanto, o elevado custo para aplicação em larga escala e a utilização de agentes reticulantes químicos tóxicos que podem causar danos ao meio ambiente e tornam-se as maiores dificuldades enfrentadas para sua aplicação (Demitri *et al.*, 2008).

A busca por alternativas sustentáveis tem impulsionado o uso de biopolímeros, como a gelatina, que se destaca por suas propriedades físico-químicas favoráveis para aplicação em hidrogéis, como a alta capacidade de gelificação, biocompatibilidade e disponibilidade (Mushtaq *et al.*, 2022). Com isso, é possível o desenvolvimento de sistemas inteligentes, capazes de reter água de forma eficiente e liberar nutrientes de forma sustentada.

A reticulação é um dos processos fundamentais para síntese de hidrogéis, podendo ser classificada em reticulação química e/ou física. Contudo, esse processo apresenta desafios, uma vez que a reticulação física mostra-se reversível, com baixas propriedades mecânicas e instáveis frente às mudanças térmicas, enquanto a reticulação química possui maior resistência e estabilidade. Entretanto, a reticulação química pode envolver o uso de agentes químicos que em sua maioria são prejudiciais ao meio ambiente. Por isso, a busca por agentes reticulantes naturais, mais seguros e ecológicos, torna-se fundamental. Agentes como extratos vegetais ou compostos derivados de fontes renováveis apresentam grande potencial, pois podem conferir propriedades mecânicas e estabilidade, minimizando os impactos e também contribuindo para a sustentabilidade do processo (Nasution *et al.*, 2022; Maiti; Maji; Yadav, 2024).

O Grupo de Pesquisa Engenharia de Processos em Sistemas Particulados (GPESP), da Universidade Federal do Pampa, desenvolve estudos voltados ao uso de materiais de origem renovável, buscando soluções que reduzam a dependência de polímeros derivados do petróleo, bem como a redução de impactos ambientais. As pesquisas do grupo têm se concentrado no aprimoramento de matrizes biopoliméricas capazes de substituir materiais convencionais poluentes, destacando alternativas mais sustentáveis e ambientalmente seguras.

Nesse contexto, diferentes pesquisas demonstram o potencial dos biopolímeros quando combinados a aditivos naturais ou modificações estruturais. Entre eles, destacam-se o desenvolvimento de curativos bicamada de poliácido láctico (Pedroso, 2023), curativos impregnados com carvão ativado e extrato de noz-pecã (Tholozan, 2023) e membranas bicamadas de quitosana e alginato para tratamento de feridas (Paulino, 2022). Além disso, incluem-se pesquisas voltadas a embalagens sustentáveis, como filmes inteligentes de carragenana com extrato da casca de jabuticaba (Avila *et al.*, 2022) e sensores colorimétricos à base de carragenana para carne suína (Rodrigues, 2023). Esses estudos evidenciam a versatilidade e potencial aplicação de biopolímeros.

Portanto, diante do avanço das pesquisas em alternativas sustentáveis, o presente trabalho se justifica ao desenvolver um hidrogel biopolimérico reticulado com agentes verdes e avaliar seu potencial de aplicação agrícola, contribuindo para a busca de materiais mais seguros e ambientalmente adequados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de hidrogéis biopoliméricos através de reticulação verde, para potencial aplicação como agente condicionante de solo e transportador de nutrientes em sistemas agrícolas, visando contribuir para mitigar os impactos causados pelo aquecimento global e das mudanças climáticas.

2.2 Objetivos específicos

- Síntese do hidrogel biopolimérico à base de gelatina por meio de *casting* e reticulação por agente químico verde;
- Síntese do hidrogel biopolimérico à base de gelatina-alginato por meio de reticulação iônica verde;
- Incorporação de fertilizante NPK nas matrizes poliméricas para liberação sustentada;
- Caracterização dos hidrogéis através das suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e morfológicas;
- Análise da liberação controlada de nutrientes, intumescimento e potencial aplicação em cultivares de alface (*Lactuca sativa*).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Desafios da agricultura atual

A agricultura desempenha um papel fundamental no crescimento global, sendo a principal responsável por garantir o fornecimento de alimentos, fibras e energia para atender as necessidades de nutrição humana e animal (Maciel; De Tunes, 2021). Além de sua importância econômica, a agricultura também é estratégica para a sustentabilidade ambiental e a segurança alimentar em escala global. O Brasil, através da sua grande extensão territorial e diversidade climática, ocupa posição de destaque, sendo o quinto maior país em área cultivada e um dos principais líderes globais na produção e exportação agrícola e de *commodities* (Tanure; Domingues; Magalhães, 2023).

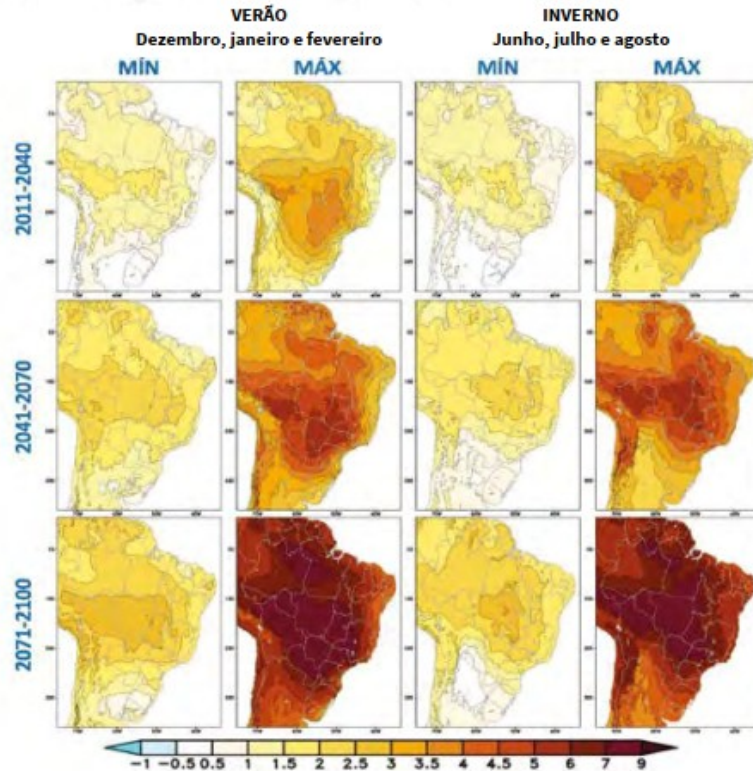
De acordo com a Organização de Alimentos e Agricultura das Nações Unidas (FAO), o Brasil é responsável pelo maior rendimento na produção e exportação de grãos, destacando-se como o maior exportador mundial de soja em 2020, com aproximadamente 50 % do comércio. No entanto, a globalização desenfreada impõe preocupações e desafios ao setor, especialmente em relação aos impactos causados pelo aquecimento global e às constantes mudanças climáticas registradas, que têm afetado drasticamente o setor ao longo do tempo (FAO, 2022; Tanure; Domingues; Magalhães, 2023; Miranda, 2018).

Os impactos no setor agrícola estão diretamente relacionados à escassez de recursos hídricos e à degradação do solo, intensificados pelo aumento contínuo da demanda por alimentos. Esse cenário leva os agricultores a utilizarem cada vez mais agroquímicos, agravando os processos de erosão e lixiviação do solo, resultando em perda significativa de nutrientes e redução da fertilidade. Além disso, a utilização de sistemas de irrigação inadequados, como a irrigação em horários impróprios, falta de manutenção, uso excessivo ou insuficiente de água, e tecnologias não apropriadas para as condições climáticas ou tipos de cultivo, esgota os recursos hídricos e contribui para a salinização do solo. Essas práticas prejudicam a capacidade produtiva das terras e ameaçam a segurança dos alimentos (Santos *et al.*, 2022; Moreira *et al.*, 2023).

Estima-se que o maior impacto do aquecimento global no Brasil ocorra na região Centro-Oeste, ao longo de todas as estações do ano, com efeitos que se estenderão para as demais regiões do país até o final do século XXI, resultando no aumento da temperatura e instabilidades climáticas. Conforme ilustrado na Figura 1, projeções do Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNC), o aumento de 3 °C na temperatura até 2050, poderá ocasionar redução de até 50 % na produção agrícola do país. O risco da perda de safras pode

desencadear crises alimentares, não apenas no mercado interno, mas também no contexto global, elevando os preços dos alimentos e agravando a insegurança alimentar, especialmente para as populações mais vulneráveis (PNC, 2016; Embrapa, 2018).

Figura 1- Projeção das mudanças de temperatura entre diferentes períodos



Fonte: Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (2016).

Diante dos desafios enfrentados no setor, o Brasil com sua vasta produção agrícola, tem a oportunidade de alinhar suas práticas às metas da Agenda 2030 desenvolvida pela Organização das Nações Unidas (ONU), que promove ações sustentáveis em escala global. Como por exemplo na realização dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) na erradicação da fome e agricultura sustentável, no consumo e produção responsáveis, assim contribuindo para garantir a segurança alimentar global enquanto preserva o meio ambiente para futuras gerações (ONU, 2018).

De acordo com Alcamo (2019), a ODS 2 “Fome Zero e Agricultura Sustentável” e a ODS 6 “Água Potável e Saneamento” estão diretamente relacionadas, uma vez que a agricultura demanda grandes volumes de água e interfere na qualidade dos recursos hídricos. O uso intensivo da irrigação e a aplicação excessiva de fertilizantes e pesticidas podem ocasionar escoamento de poluentes, salinização e contaminação dos rios. Assim, promover sistemas

alimentares mais sustentáveis também exige reduzir desperdícios e aprimorar a gestão dos recursos hídricos e dos processos produtivos agrícolas.

Nesse contexto, a implementação de tecnologias agrícolas avançadas é essencial para garantir a sustentabilidade e a eficiência do setor. O uso de sistemas de irrigação inteligentes e o controle da qualidade do solo por sensores em tempo real se destacam como soluções promissoras. Outra técnica inovadora é a utilização de hidrogéis, que funcionam como condicionantes de solo, retendo água e liberando-a gradualmente, o que melhora a retenção de umidade e reduz a necessidade de irrigação. Essas soluções tecnológicas, quando combinadas com práticas sustentáveis de manejo, como a rotação de culturas e o plantio direto, têm o potencial de conservar os recursos naturais e garantir uma agricultura mais produtiva e resiliente (Leite; Massruha; Coral, 2024; Monteiro Neto *et al.*, 2017).

3.2 Hidrogéis em aplicações agrícolas

Os hidrogéis são estruturas compostas por redes tridimensionais de polímeros hidrofílicos, que podem ser obtidos a partir de cadeias poliméricas reticuladas por diferentes mecanismos, como ligações covalentes, interações de hidrogênio, forças de Van der Waals ou emaranhamento físico. Esses materiais se destacam por sua capacidade de reter e absorver grandes quantidades de soluções aquosas em sua estrutura molecular (Alemán *et al.*, 2007; Laftah; Hashim; Ibrahim, 2011).

De acordo com a literatura, a utilização de hidrogéis é extremamente ampla, com destaque em diversos setores. Na indústria farmacêutica, por exemplo, são empregados na liberação sustentada de medicamentos, permitindo uma administração eficaz e prolongada do fármaco (Kulkarni *et al.*, 2011). Na engenharia de tecidos, os hidrogéis atuam como suportes para o crescimento celular, promovendo a regeneração de órgãos e tecidos (Mantha *et al.*, 2019). Na agricultura, podem ser utilizados como condicionadores de solo e na liberação sustentada de nutrientes (Liu *et al.*, 2022). Além disso, também são promissores no setor energético (Wang; Zhao, 2023), tratamento de água (Van Tran; Park; Lee, 2018) e biossensores (Nam *et al.*, 2018).

Com o aumento da demanda por produtos agrícolas, consequência da globalização, a gestão dos recursos hídricos tornou-se uma preocupação mundial crescente. O uso intensivo da água no setor agrícola, combinado à escassez de fontes hídricas em diversas regiões e as intensas mudanças climáticas, ameaçam a sustentabilidade e eficiência das atividades. Nesse

contexto, os hidrogéis surgem como alternativa inovadora, através da sua capacidade de melhorar a retenção de água no solo e reduzir a frequência de irrigação, e podem ser descritos como “mini reservatórios” que fornecem água para as plantas, a partir da diferença de pressão osmótica. Além disso, quando combinados com fertilizantes, promovem a liberação sustentada de nutrientes no solo, contribuindo para a redução do uso excessivo de agroquímicos (Das; Dalei, 2023; Liu *et al.*, 2022; Macedo, 2022).

Os hidrogéis atuam através da absorção de água durante períodos de chuvas ou irrigação, inchando e armazenando o líquido na sua estrutura interna. Em condições de déficit hídrico, como em secas prolongadas, a água armazenada em seu interior é liberada de forma gradual, garantido que as plantas possam suprimento contínuo de umidade necessária para seu desenvolvimento (Navroski *et al.*, 2015), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2- Representação da atuação do hidrogel em sistemas agrícolas



Fonte: Adaptado de Macedo (2022).

Atualmente, o principal desafio do mercado de hidrogéis no setor agrícola envolve uma combinação de fatores que dificultam sua aplicação em larga escala. Entre eles, destacam-se o alto custo de produção e o processo de reticulação, que geralmente utiliza agentes químicos tóxicos, como formaldeído e glutaraldeído, capazes de liberar substâncias prejudiciais ao solo e ao meio ambiente. Além disso, a dependência de polímeros derivados do petróleo, como a poliacrilamida e seus copolímeros, que não são sustentáveis e causam impactos ambientais negativos, limita o potencial de uso dos hidrogéis de maneira mais ampla e sustentável na agricultura (Kaur *et al.*, 2023).

3.2.1 Hidrogéis e a liberação sustentada de nutrientes

No contexto da agricultura moderna, o uso de fertilizantes e herbicidas possuem um papel fundamental no aumento da produtividade e proteção das culturas agrícolas. Os fertilizantes são substâncias químicas ou orgânicas que fornecem nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, às plantas, promovendo um crescimento saudável e aumentando o rendimento agrícola (Amin; Jilani, 2024). Já os herbicidas são produtos químicos projetados para controlar ou eliminar ervas daninhas que competem com as plantas cultivadas por luz, águas e nutrientes, visando reduzir perdas e aumentar a eficiência do cultivo (Norsworthy *et al.*, 2012; Beckie; Ashworth; Flower, 2019). Embora a utilização de ambos permita avanços significativos no cultivo, o uso indiscriminado desses insumos pode gerar impactos ambientais significativos, como a contaminação do solo e da água (Irfan *et al.*, 2018).

Os fertilizantes fornecem nutrientes às plantas na forma de sais altamente solúveis em água. Contudo, essas características podem resultar na perda desses nutrientes, que são deslocados para longe das raízes e liberados no meio ambiente, resultando em menor eficácia e poluição ambiental (Ramli, 2019; Azeem *et al.*, 2023). De maneira semelhante, a utilização de herbicidas também enfrenta desafios relacionados à eficiência e sustentabilidade, grande parte dos herbicidas aplicados no campo é perdida devido à baixa estabilidade química e a processos como adsorção ao solo, lixiviação e volatilização, o que reduz sua eficácia e causa impactos ambientais, como a contaminação de corpos hídricos (Kremer, 2014; El-Nahhal *et al.*, 1999).

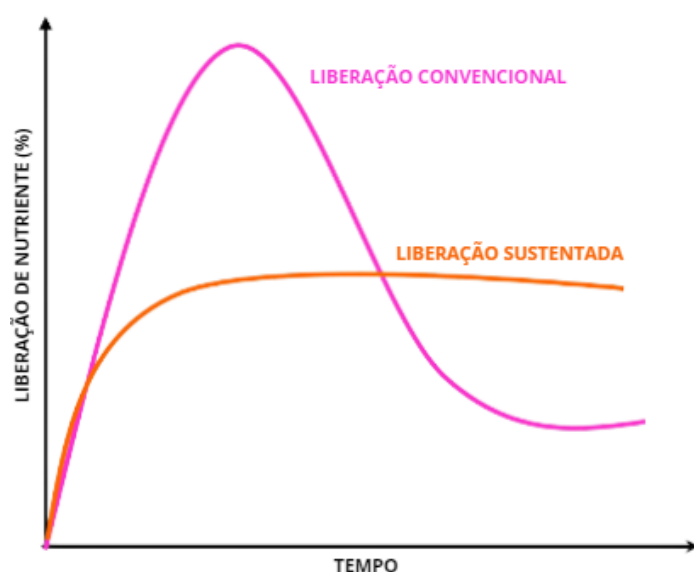
Para mitigar esses problemas, a incorporação de herbicidas ou fertilizantes em hidrogéis apresenta-se como uma solução inovadora, permitindo uma liberação sustentada, minimizando perdas ambientais e reduzindo o uso excessivo de insumos químicos (Nörnberg *et al.*, 2019; Vedovello *et al.*, 2024).

Os hidrogéis aditivados com fertilizantes ou herbicidas para uma liberação lenta têm se destacado como uma abordagem inovadora e sustentável no setor agrícola. Esses materiais consistem em redes tridimensionais hidrofílicas capazes de absorver grandes quantidades de água, ao mesmo tempo em que armazenam fertilizantes em sua estrutura. Ao serem aplicados ao solo, os hidrogéis hidratam-se e, de forma sustentada, liberam os nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas, minimizando desperdícios e impactos ambientais (Tanure; Domingues; Magalhães, 2023; Mohamady Ghobashy, 2020).

A liberação sustentada ocorre por meio de interações físico-químicas entre o hidrogel, os nutrientes incorporados e o ambiente do solo. Inicialmente, o hidrogel absorve água e se expande, formando canais que facilitam a difusão dos nutrientes. Esse processo é regulado por

variáveis como a composição do hidrogel, a solubilidade do fertilizante e as condições ambientais, como pH, temperatura e umidade do solo. Em contraste com os fertilizantes tradicionais, que frequentemente causam picos de concentração e perdas por lixiviação, os hidrogéis garantem uma liberação gradual e uniforme, promovendo maior eficiência no uso de nutrientes (Jabrail; Mutlaq; Al-Ojar, 2023; Lee *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022). A Figura 3 compara esquematicamente como ocorre a liberação gradual de nutrientes contidos em matrizes com aplicados diretamente em um meio.

Figura 3- Comparação da curva de liberação convencional e de liberação lenta de nutriente



Fonte: Adaptado de Mandal *et al.* (2025).

Além disso, esses sistemas oferecem benefícios adicionais, como a retenção de água no solo, o que é especialmente importante em regiões sujeitas à seca ou à escassez hídrica. A capacidade dos hidrogéis de armazenar água e liberá-la lentamente reduz a necessidade de irrigação frequente, contribuindo para a conservação de recursos hídricos. Essa propriedade, aliada à liberação sustentada de nutrientes, cria um ambiente favorável para o desenvolvimento das plantas, mesmo em condições adversas (Mikula *et al.*, 2020).

No contexto do desenvolvimento tecnológico, os hidrogéis podem ser formulados com polímeros biodegradáveis e biocompatíveis, como o alginato, a gelatina e outros materiais naturais. Esses biopolímeros podem ser funcionalizados com aditivos específicos para ajustar a taxa de liberação de nutrientes ou aumentar a interação com o solo. Além disso, avanços no uso de nanomateriais e compostos bioativos nos hidrogéis têm ampliado suas aplicações, permitindo que também atuem como veículos para bioestimulantes ou agentes de proteção contra pragas e doenças (Mohamady Ghobashy, 2020; Aouada *et al.*, 2011).

A aplicação de hidrogéis fertilizantes ou herbicidas na agricultura representa uma solução promissora para os desafios contemporâneos relacionados à sustentabilidade. Ao reduzir perdas de nutrientes por lixiviação, minimizar o uso excessivo de fertilizantes e otimizar o consumo de água, esses materiais contribuem para práticas agrícolas mais eficientes e ambientalmente responsáveis. Além disso, sua utilização pode reduzir a dependência de fertilizantes convencionais, diminuindo o impacto da agricultura sobre os ecossistemas aquáticos (Gustav; Palmqvist, 2017; Mansouri *et al.*, 2023). O Quadro 1 apresenta estudos recentes que investigam a liberação sustentada de fertilizantes e nutrientes por meio de hidrogéis desenvolvidos pelos métodos de reticulação química e iônica, aplicados na agricultura. Esses estudos destacam o potencial dos hidrogéis para melhorar a eficiência no uso de fertilizantes.

Quadro 1- Liberação sustentada de fertilizantes e nutrientes a partir de hidrogéis

Matriz	Características	Reticulante	Aplicações	Fonte
Gelatina, ácido polilático e quitosana	Reticulação química	Glutaraldeído	Fertilizante (N)	Yuan <i>et al.</i> (2023)
Alginato de sódio e poliácridamida	Reticulação iônica	Cloreto de cálcio	Fertilizante (NPK)	Van Der Merwe; Goosen; Pott, (2022)
Goma xantana e óxido de grafeno	Reticulação química	Água ruça	Fertilizante (NPK)	Züge, ([no prelo])
Quitosana e Poli (Álcool vinílico) (PVA)	Reticulação química	N,N' metileno bis-acrilamida (MBA)	Condicionante e Fertilizante (NPK)	Jabrail; Mutlaq; Al-Ojar, (2023)
Alginato de sódio e quitosana quaternizada	Reticulação iônica	Cloreto de cálcio	Atividade antimicrobiana e Fertilizante (ureia)	Arafa <i>et al.</i> (2022)
Amido e quitosana	Reticulação química	Glutaraldeído e glioxal	Herbicida (<i>Atrazina</i>)	Supare; Mahanwar, (2022)
Quitosana	Reticulação química	Glutaraldeído e genipina	Fertilizante (Ferro)	Liu <i>et al.</i> (2024)
Alginato e celulose	Reticulação iônica	Cloreto de cálcio	Herbicida (<i>Imazetapir</i>)	Nörnberg <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Autora (2025).

Liu *et al.*, (2024) desenvolveram um hidrogel de quitosana por meio da reticulação química, visando a liberação sustentada de fertilizante de ferro no cultivo de tomates. Além de

estimular significativamente a germinação e o crescimento das plantas, o hidrogel reduziu o pH do solo, melhorou o microambiente do solo e aumentou a absorção de nutrientes pelas raízes. Apesar de o hidrogel ser reticulado com glutaraldeído, exigindo lavagens sucessivas com etanol para remoção do excesso de reticulante, a solução mostra o potencial para superar as limitações enfrentadas no uso de fertilizantes de ferro.

Em estudos realizados por Nörnberg *et al.*, (2019), foram sintetizados hidrogéis compostos por alginato e celulose por meio de reticulação iônica, os quais foram avaliados como sistemas promissores para o encapsulamento e a liberação sustentada do herbicida *imazetapir*. Os resultados indicaram que a incorporação do herbicida no hidrogel biopolimérico possibilitou uma liberação mais lenta e controlada. Além disso, o uso de biopolímeros biocompatíveis reforça o avanço de tecnologias sustentáveis, reduzindo o impacto ambiental e contribuindo para aplicações mais seguras e eficientes no manejo agrícola.

3.3 Biopolímeros

Os biopolímeros são macromoléculas produzidas a partir de fontes renováveis, como vegetais, animais ou microrganismos, e têm ganhado destaque por suas propriedades sustentáveis e biodegradáveis. Ao contrário dos polímeros sintéticos, que frequentemente geram impactos ambientais significativos, os biopolímeros oferecem uma alternativa mais ecológica (Aggarwal *et al.*, 2020; Nanda *et al.*, 2022).

Biopolímeros de origem vegetal são amplamente encontrados em fontes como amido, celulose, alginato e pectina. O amido, extraído de plantas como milho e batata, é utilizado na produção de embalagens biodegradáveis e filmes comestíveis, especialmente na indústria alimentícia. A celulose, derivada de árvores e outras plantas, é o biopolímero natural mais abundante e tem sido aplicada no desenvolvimento de membranas para filtração, tecidos e papéis. Já a pectina, extraída de frutas cítricas e maçãs, é amplamente utilizada como agente espessante em alimentos e na produção de hidrogéis para uso médico (Flórez; Cazón; Vázquez, 2023; Udayakumar *et al.*, 2021).

Os biopolímeros produzidos por microrganismos, como o ácido polilático (PLA) e o poli-hidroxialcanoato (PHA), são derivados de bactérias. O PLA é sintetizado pela fermentação de açúcares por bactérias e tem aplicação em embalagens biodegradáveis e materiais médicos, como suturas e próteses temporárias. O PHA, produzido por diversas espécies bacterianas, é utilizado em embalagens e dispositivos médicos (Ilyas *et al.*, 2021).

Por outro lado, biopolímeros de origem animal incluem materiais como quitina, colágeno e gelatina. A quitina, obtida principalmente de crustáceos como camarões e caranguejos, é usada na fabricação de bioplásticos e materiais para cicatrização. O colágeno, presente em tecidos animais, é aplicado na produção de biomateriais e produtos para a saúde, como suturas e regeneração tecidual. A gelatina, derivada do colágeno, é um biopolímero versátil amplamente utilizado nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética, além de ser explorada no desenvolvimento de hidrogéis e materiais biodegradáveis (Aggarwal *et al.*, 2020; Negm *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2022).

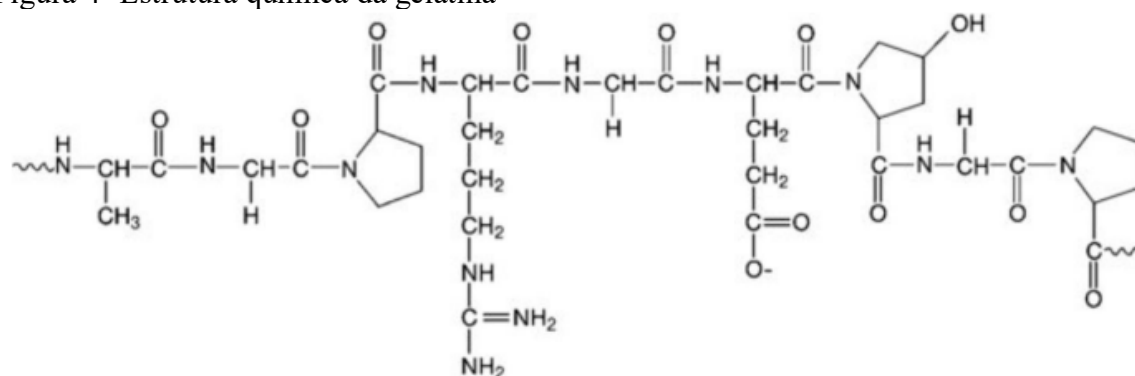
3.3.1 Gelatina

A gelatina é um biopolímero derivado do colágeno desnaturado, conhecida por sua baixa antigenicidade, o que a torna segura para aplicações em que o contato com o organismo é necessário. Composta por uma mistura de polipeptídeos e proteínas, a gelatina é obtida a partir de fonte animal, como pele de porco, couro e ossos bovinos, peixes, entre outros. Sua ampla disponibilidade e baixo custo de produção a tornam uma matéria-prima acessível, sendo extensivamente comercializada e utilizada em diversas aplicações (Yan *et al.*, 2011; Yang; Chaieb; Hemar, 2021).

A gelatina possui características funcionais que contribuem para sua versatilidade de aplicação, como alta capacidade de formação de filmes, gelificação, emulsificação e formação de espuma, além de ser biocompatível e biodegradável (Mushtaq *et al.*, 2022). Essas características a tornam uma escolha promissora para as indústrias farmacêutica e alimentícia. Além disso, sua biocompatibilidade e biodegradabilidade expandem seu uso para áreas como biomateriais e engenharia de tecidos (Piao *et al.*, 2021).

O processo de obtenção da gelatina envolve a desestruturação da hélice tripla do colágeno. Esse processo ocorre através de tratamentos térmicos e químicos, nos quais as cadeias polipeptídicas do colágeno são separadas. Inicialmente, o colágeno passa por um pré-tratamento ácido ou alcalino, que quebra as ligações não covalentes e facilita a solubilização da proteína em água aquecida. Existem dois tipos principais de gelatina resultantes desse processo: a gelatina tipo A, que é produzida por hidrólise ácida, e a gelatina tipo B, obtida por tratamento alcalino. Cada tipo possui características específicas de pH e ponto isoelétrico, influenciando suas propriedades e adequação a diferentes aplicações (Yang; Chaieb; Hemar, 2021; Raether *et al.*, 2022; Alipal *et al.*, 2021). A Figura 4 apresenta a estrutura química da gelatina.

Figura 4- Estrutura química da gelatina



Fonte: Ndlovu *et al.* (2021).

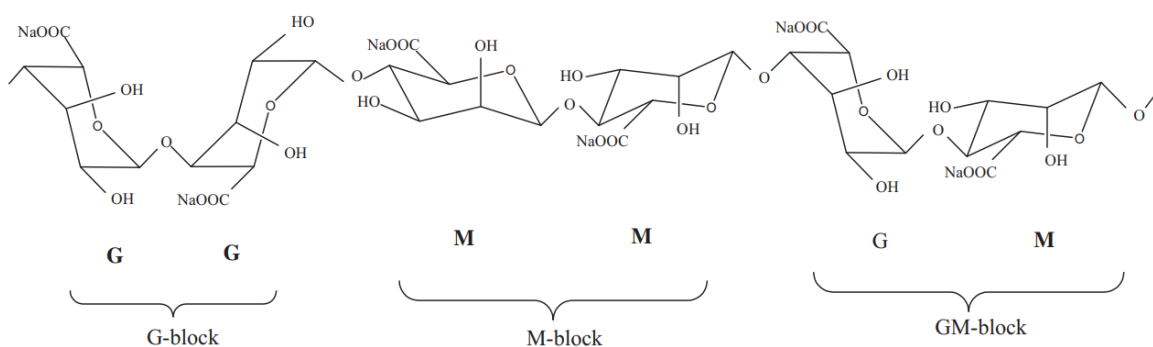
Apesar de suas qualidades e ampla aplicação, a gelatina apresenta uma resistência mecânica relativamente baixa, o que limita sua utilização em alguns contextos. Com a finalidade de contornar essa limitação, técnicas de reticulação são utilizadas, seja por meio de agentes químicos ou enzimáticos, assim aumentando a estabilidade mecânica e resistência estrutural da gelatina (Raether *et al.*, 2022).

3.3.2 Alginato de sódio

O alginato de sódio é um dos polissacarídeos mais abundantes na natureza, obtido principalmente de algas marrons. Destaca-se por propriedades como sensibilidade ao pH, biodegradabilidade, atoxicidade, baixo custo e elevada biocompatibilidade. Além disso, apresenta grande facilidade de gelificação e excelente capacidade de formação de filmes, o que amplia seu potencial de aplicação em diversas áreas (Helmiyati; Aprilliza, 2019; Akbar *et al.*, 2023).

É obtido através da extração do ácido algínico presente em algas marrons, seguido por sua conversão ao sal de sódio. Possui estrutura composta por diferentes proporções dos ácidos β -D-manurônico (M), unidos por ligações 1,4, e α -L-gulurônico (G), epímero em C-5. Esses monômeros distribuem-se ao longo da cadeia, formando blocos estruturais. A Figura 5 apresenta a estrutura química do alginato de sódio.

Figura 5- Estrutura química do alginato de sódio



Fonte: Bekin *et al.*, (2014).

A proporção entre os monômeros M e G influencia diretamente a massa molar, a viscosidade e o tipo de gel formado pelo alginato. Blocos G, por serem mais rígidos, geram géis mais firmes, estáveis e menos suscetíveis ao intumescimento, enquanto maior presença de blocos M resulta em géis mais flexíveis e menos porosos. A organização desses monômeros também importa: sequências MG facilitam a gelificação, junções GG/MG aumentam a rigidez do gel e longas sequências MG/MG podem reduzi-la pela maior fricção entre cadeias (Lima, 2018; Moradali *et al.*, 2015).

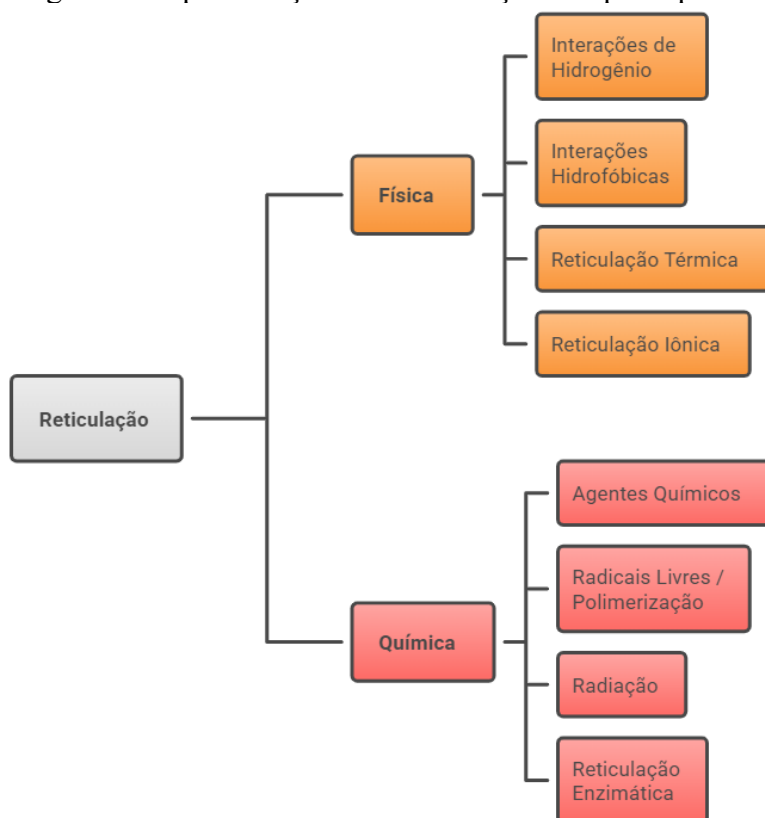
A partir dessas características, compreende-se a ampla aplicação do alginato em diversos setores, incluindo embalagens de alimentos (Singh; Singh; Kaur, 2024), aplicações biomédicas (Da Silva *et al.*, 2024), engenharia de tecidos (Sahoo; Biswal, 2021) e hidrogéis (Feyissa *et al.*, 2023). Contudo, para garantir maior estabilidade e resistência mecânica, o material costuma ser submetido à reticulação, realizada por agentes como o glutaraldeído ou com íons cálcio (Ca^{2+}).

3.4 Mecanismos de reticulação em hidrogéis

A reticulação pode ser definida como um processo químico e/ou físico que adiciona ligações cruzadas entre as cadeias de um polímero, formando uma rede tridimensional, que confere propriedades como resistência mecânica, elasticidade e estabilidade térmica, sendo essenciais em aplicações como embalagens e hidrogéis. O mecanismo pode ocorrer de forma física, onde incluem cadeias emaranhadas e podem ser classificados como ligações de hidrogênio, interação hidrofóbica, térmica e iônica, enquanto de forma química diversos métodos podem ser utilizados, como reticulação por agentes químicos, radiação, polimerização

de radicais livres e enzimática (Maitra; Shukla, 2014; Tariq *et al.*, 2023). A Figura 6 apresenta um esquema de classificação dos principais métodos utilizados para a reticulação.

Figura 6- Representação da classificação dos principais métodos de reticulação



Fonte: Adaptado de Tariq *et al.* (2023).

As técnicas de reticulação física possuem características reversíveis e permitem que o material resultante responda a estímulos ambientais, como variações de temperatura, pH e outros. No método iônico, a reticulação ocorre pela presença de um agente iônico que interage com polímeros carregados, como o alginato de sódio. Esse polímero forma redes tridimensionais ao reagir com íons de carga oposta, chamados de contra-íons (como os íons cálcio). Esses íons ligam-se aos grupos carregados nas cadeias do polímero, estabelecendo ligações iônicas que mantêm a estrutura do gel, sem a formação de ligações covalentes (Ali; Ahmed, 2018; Jha *et al.*, 2024).

As interações hidrofóbicas, por sua vez, ocorrem pela agregação de segmentos hidrofóbicos de cadeias poliméricas em soluções aquosas, sendo promovidas pela exclusão de água ao redor dessas regiões. Altas temperaturas podem favorecer essas interações, auxiliando a formação do hidrogel (Siqueira *et al.*, 2023). Já as ligações de hidrogênio, que envolvem interações entre átomos de hidrogênio e átomos eletronegativos (como oxigênio ou nitrogênio)

nas cadeias do polímero, criam uma rede estrutural que confere elasticidade ao hidrogel, apesar de sua natureza relativamente fraca (Cohen; Du; Wu, 2021).

A reticulação térmica, por fim, utiliza ciclos de congelamento e descongelamento. Nesse método, a solução polimérica é congelada a baixas temperaturas (entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) e, em seguida, descongelada à temperatura ambiente. Durante o congelamento, formam-se cristais de gelo que causam uma concentração localizada do polímero. Com o descongelamento, essas regiões concentradas se conectam, gerando uma rede reticulada física que estabiliza a estrutura do hidrogel (Ali; Ahmed, 2018).

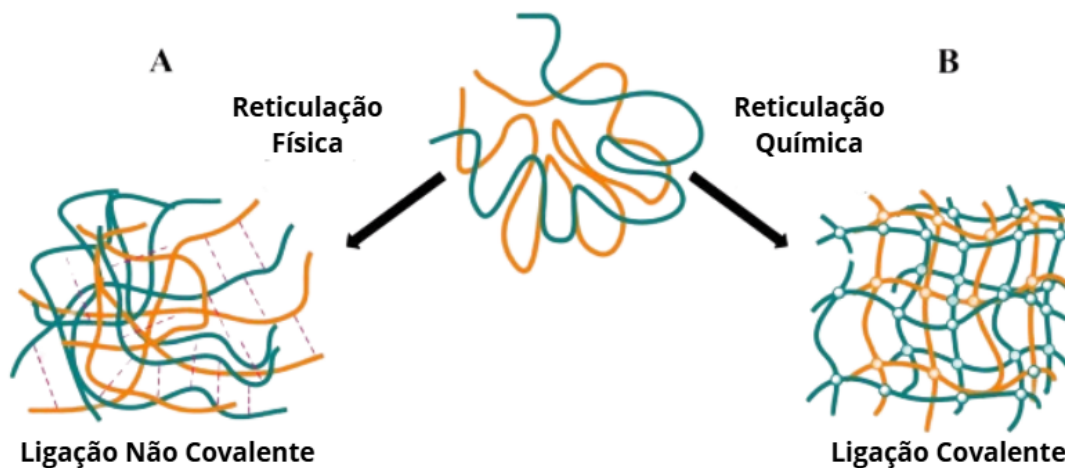
As técnicas de reticulação química caracterizam-se por envolver a formação de ligações covalentes entre as cadeias poliméricas devido à presença de grupos funcionais específicos ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{CONH}$, $-\text{CONH}_2$ e SO_3H), auxiliando na maior estabilidade e resistência do hidrogel. Assim, o método de polimerização ou de radicais livres ocorre através de agentes iniciadores, como a luz ultravioleta, calor ou peróxidos, que geram radicais livres e atacam as duplas ligações dos monômeros, quebrando-as e formando novas ligações covalentes (Sannino; Demitri; Madaghiele, 2009; Siqueira *et al.*, 2023). O método enzimático consiste na utilização de enzimas que podem produzir ligações covalentes entre proteínas, como a transglutaminase (Saricay *et al.*, 2012).

Já o método por radiação, utiliza raios gama e feixes de elétrons para induzir a polimerização das cadeias poliméricas, promovendo a formação de redes tridimensionais resultantes de reações químicas desencadeadas pela energia ionizante (Kimura *et al.*, 2021; Raza; Jeong; Park, 2021). O método por adição de agentes químicos ocorre por meio da introdução de compostos capazes de criar ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, sendo os agentes químicos mais empregados o glutaraldeído, glicoxal e poli(etilenoglicol). Entretanto, devido à alta toxicidade desses agentes químicos torna-se necessário a utilização de processos rigorosos de purificação para garantir a segurança do processo (Sapula; Bialik-Was; Malarz, 2023).

A Figura 7 ilustra a estrutura dos métodos de reticulação químico e físico. Os dois mecanismos, apresentam diferenças significativas em termos de estrutura e propriedades do hidrogel. Enquanto a reticulação física como o método térmico, gera redes estabilizadas por interações, como pontes de hidrogênio e forças de van der Waals, as estruturas resultantes tendem a ser menos resistentes mecanicamente e mais suscetíveis a mudanças ambientais, como temperatura e pH. Por outro lado, a reticulação química forma redes tridimensionais mais robustas e estáveis devido às ligações covalentes permanentes entre as cadeias poliméricas, conferindo maior resistência à degradação e durabilidade. Essas distinções tornam os métodos

físicos mais indicados para aplicações temporárias ou reversíveis, enquanto os métodos químicos são preferidos em casos que exigem estabilidade estrutural a longo prazo, como em dispositivos biomédicos e materiais avançados (Saini; Malve, 2022; Parhi, 2017).

Figura 7- Forma estrutural dos métodos (A) físico e (B) químico



Fonte: Adaptado de Siqueira *et al.* (2023).

3.4.1 Reticulação por agentes químicos

A reticulação química é amplamente utilizada para conferir estabilidade estrutural aos hidrogéis, formando ligações covalentes entre as cadeias poliméricas. Os agentes químicos mais comuns, como glutaraldeído, formaldeído e epóxidos, são reconhecidos por sua eficiência em criar redes tridimensionais robustas. No entanto, essas substâncias apresentam limitações críticas, como alta toxicidade, carcinogenicidade e impactos negativos ao meio ambiente. Essas características não apenas dificultam sua aplicação em sistemas agrícolas e biomédicos, mas também levantam preocupações regulatórias quanto à segurança do uso em larga escala (Ghordpade, 2020; Kikuchi *et al.*, 2008). O Quadro 2 apresenta aplicações do método de reticulação química de hidrogéis e seus respectivos agentes reticulantes.

Quadro 2- Aplicações do método de reticulação química em hidrogéis

(Continua)

Matriz	Reticulante	Aplicação	Fonte
Gelatina e Alginato de sódio	Glutaraldeído	Biomédica	Notodihardjo <i>et al.</i> (2015)

Quadro 2- Aplicações do método de reticulação química em hidrogéis

(Conclusão)

Matriz	Reticulante	Aplicação	Fonte
Quitosana	Formaldeído	Biomédica	Sadeghi <i>et al.</i> (2016)
Alginato de sódio-g-poli(ácido acrílico-co-acrilamida)	N,N' metileno bis-acrilamida (MBA)	Agricultura	Gharekhani <i>et al.</i> (2017)
Goma Xantana e Gelatina	Dialdeído	Agricultura	Das; Dalei, (2023)
Quitosana e PVA	Glutaraldeído	Ambiental	Savaris, (2021)
Quitosana	1,6-diisocianato-hexano	Agricultura	Ladeira, (2020)
Ácido acrílico e acrilamida	N,N' metileno bis-acrilamida (MBA)	Agricultura	Kenawy <i>et al.</i> (2021)

Fonte: Autora (2025).

Diante da problemática da toxicidade da aplicação dos agentes químicos empregados na reticulação, a busca por alternativas naturais tem ganhado destaque. Compostos naturais e bioativos extraídos de plantas, como o ácido gálico, ácido ferúlico, ácido cítrico e outros têm se mostrado promissores para a reticulação de hidrogéis. Como por exemplo, o ácido gálico, um composto fenólico amplamente encontrado em folhas de oliveira, cascas de romã e chás, apresenta propriedades antioxidantes, antimicrobianas e anti-inflamatórias, além de menor toxicidade em comparação aos agentes químicos tradicionais. Essas características tornam o composto uma solução sustentável e alinhada às demandas por materiais menos impactantes ambientalmente (Krishnamoorthy *et al.*, 2014).

3.4.2 Reticulação iônica

A reticulação iônica é amplamente utilizada para a formação de hidrogéis. Esse mecanismo ocorre por meio da interação eletrostática entre as cadeias poliméricas carregadas e íons multivalentes, ou cátions divalentes, como cálcio (Ca^{2+}) e zinco (Zn^{2+}), que interagem com os grupos funcionais das cadeias poliméricas, promovendo ligações e estabelecendo uma matriz

tridimensional capaz de absorver água e conferir propriedades características (Maitra; Shukla, 2014; Said; Olawuyi; Lee, 2023).

Diversos polissacarídeos apresentam grupos ionizáveis em sua estrutura, como alginato, ágar, carragenana e quitosana, o que os torna especialmente adequados para processos de reticulação. A aplicação dessa técnica permite aprimorar propriedades do material, como resistência mecânica, controle de liberação e capacidade de encapsulamento (Alvarez-Lorenzo *et al.*, 2013; Paiva *et al.*, 2024). O Quadro 3 apresenta aplicações do método de reticulação iônica de hidrogéis biopoliméricos e seus respectivos agentes reticulantes.

Quadro 3- Aplicações do método de reticulação iônica em hidrogéis

Matriz	Reticulante	Aplicação	Fonte
Alginato de cálcio	Cloreto de cálcio	Agricultura	Juric <i>et al.</i> (2019)
Alginato de sódio e gelatina	Cloreto de cálcio	Fármaco	Safitri; Purwanti; Soeratri, (2020)
Alginato de sódio e álcool polivinílico (PVA)	Acetato de zinco	Ambiental	Toader <i>et al.</i> (2024)
Quitosana	Trifosfato de sódio, citrato de sódio e ácido oxálico	Ambiental	Józwiak <i>et al.</i> (2017)
Quitosana e amido	Trifosfato de sódio	Agricultura	Perez; Francois, (2016)
Alginato de sódio e quitosana	Sulfato de zinco	Agricultura	Vinceković <i>et al.</i> (2023)
Alginato de sódio	Cloreto de Cálcio	Agricultura	Nooeaid <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Autora (2025).

Em estudos realizados por Safitri, Purwanti e Soeratri (2020), foram avaliados hidrogéis em formato esférico, obtidos por reticulação iônica com cloreto de cálcio, utilizando alginato de sódio e gelatina como biopolímeros. Com objetivo de otimizar formulações para a liberação lenta de fármacos, uma vez que o uso exclusivo de alginato na matriz não se mostrou eficaz para essa finalidade.

Toader *et al.*, (2024) desenvolveram hidrogéis de álcool polivinílico e alginato de sódio por meio de reticulação iônica com acetato de zinco, capazes de adsorver contaminantes provenientes de agentes de guerra química, como o gás mostarda, um composto aquoso altamente perigoso. Os autores destacam que o uso da reticulação iônica, considerada uma rota verde e de baixo impacto ambiental, oferece excelente custo-benefício em comparação a outros métodos de reticulação comumente empregados para essa finalidade, os quais normalmente envolvem agentes tóxicos. Essas características tornam as formulações promissoras para aplicações mais sustentáveis e eficientes em processos de descontaminação.

Tanto Nooeaid *et al.*, (2024) quanto Juric *et al.*, (2019), investigaram hidrogéis esféricos reticulados ionicamente com cloreto de cálcio para uso agrícola, atuando como carregadores de nutrientes para liberação gradual no solo, embora tenham utilizado biopolímeros diferentes em suas formulações. Em ambos os estudos, os hidrogéis mostraram-se não tóxicos, de baixo custo e capazes de liberar nutrientes de forma sustentada, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis e para a redução da poluição ambiental.

3.4.2 Reticulantes Verdes

Os agentes de reticulação verdes derivados de fontes naturais têm ganhado destaque como uma alternativa sustentável aos reticulantes químicos tradicionais, que frequentemente apresentam elevados níveis de toxicidade e impactos ambientais negativos. Esses agentes podem ser utilizados em combinação com biopolímeros para atender a uma ampla gama de requisitos funcionais para os hidrogéis como, elasticidade, resistência mecânica, controle de degradação e capacidade de retenção de água. Esses atributos são particularmente essenciais em aplicações biomédicas, agrícolas e biotecnológicas. Entre os exemplos mais promissores estão o ácido tânico, ácido cítrico, ácido gálico e o ácido ferúlico, que possuem propriedades antioxidantes, biocompatibilidade e baixa toxicidade (Maiti; Maji; Yadav, 2024). O Quadro 4 apresenta as utilizações de reticulantes verdes em hidrogéis.

Quadro 4- Aplicação de reticulantes verdes em hidrogéis

Matriz	Reticulante	Aplicação	Fonte
Quitosana e álcool polivinílico (PVA)	Ácido gálico	Fármaco	Thanyacharoen <i>et al.</i> (2018)
Álcool polivinílico/colágeno	Ácido tânico	Biomédica	Bai <i>et al.</i> (2021)
Amido/goma xantana	Ácido cítrico	Alimentícia e Fármaco	Simões <i>et al.</i> (2020)
Alginato de sódio	Ácido cítrico e ácido tânico	Biomédica	Bucak, (2023)
Alginato de sódio e Gelatina	Ácido ferúlico	Biomédica	Anjali <i>et al.</i> (2022)
Gelatina	Ácido cítrico	Agricultura	Tholozan <i>et al.</i> (2024)
Goma xantana	Ácido cítrico	Agricultura	Sabadini <i>et al.</i> (2022)
Quitosana	Ácido carboxílico e outros compostos (Extrato de algas vermelhas- <i>Gelidium corneum</i>)	Adsorção	Spitzer <i>et al.</i> (2024)
Goma xantana e óxido de grafeno	Compostos polifenólicos (Água ruça)	Agricultura	Züge, ([no prelo])
Gelatina	Compostos polifenólicos (Extrato de <i>Galla chinensis</i>)	Alimentícia e Fármaco	Zhao <i>et al.</i> (2016)
Alginato de sódio e gelatina	Ácido gálico e outros compostos (Extrato de chá verde torrado)	Biomédica	Chavez-Granados <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Autora (2025).

O ácido cítrico, por exemplo, é amplamente utilizado como reticulante natural devido à sua abundância na natureza e produção sustentável por processos de fermentação. Suas características químicas, como a presença de três grupos carboxílicos e um grupo hidroxila,

permitem a formação de ligações cruzadas estáveis com polissacarídeos e outros polímeros hidrofílicos (Sapula; Bialik-Was; Katarzyna, 2023). Simões *et al.*, (2020) desenvolveram hidrogéis de amido e goma xantana realizando a reticulação através do ácido cítrico e observaram que as propriedades mecânicas e alongamento foram promissores para a aplicação do hidrogel.

O ácido gálico (ácido 3,4,5-triidroxibenzoico), presente em plantas ricas em taninos como folhas de oliveira e cascas de romã, possui propriedades antioxidantes, antimicrobianas e anti-inflamatórias, além de potencial anticancerígeno (Zahrani; El-Shishtawy; Asiri, 2020; Jiang *et al.*, 2022). Sua estrutura, com três grupos hidroxila no anel benzênico, permite formar ligações covalentes com biopolímeros como gelatina, quitosana e colágeno, atuando como agente reticulante (Shabani; Rabieli; Amini-Khoei, 2020; Yan *et al.*, 2011). Essa capacidade gera hidrogéis mais estáveis e funcionalizados, com aplicações biomédicas e agrícolas, como bioestimulantes e biopesticidas (Baldwin; Booth, 2022; Gupta *et al.*, 2022).

O ácido tânico é encontrado em nozes, uvas, chá verde, suco de maçã, cacau, café e outras fontes naturais. Sendo um polifenol vegetal com uma estrutura única, onde uma molécula de D-glicose está esterificada com várias unidades de ácido gálico. Essa configuração resulta em um grande número de grupos fenólicos, que permitem interações versáteis, como ligações de hidrogênio com moléculas que contêm grupos carboxílicos, hidroxila, amina e outros. Ele também é amplamente utilizado para reticular biopolímeros como gelatina, colágeno e quitosana, além de polímeros sintéticos (Moghaddam *et al.*, 2022).

Chavez-Granados *et al.*, (2024) desenvolveram um hidrogel de alginato-gelatina reticulado com extrato de chá verde torrado e incorporado com íons de prata, sendo observada uma aplicação promissora do extrato como agente reticulante natural. As análises realizadas por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) identificaram compostos bioativos presentes no extrato, como epigallocatequina, epicatequina, ácido gálico e cafeína. Onde foi possível identificar que os compostos atuaram como agentes redutores e desempenharam um papel essencial na reticulação do hidrogel, evidenciando o potencial da utilização de extratos ricos em compostos bioativos para substituição de agentes químicos tóxicos.

Züge ([no prelo]) explorou o desenvolvimento de hidrogéis biopoliméricos de goma xantana, utilizando a água ruça, resíduo proveniente da fabricação de azeite de oliva, como agente reticulante natural, uma escolha estratégica devido à presença de compostos bioativos que favorecem a reticulação. O fertilizante NPK foi incorporado ao sistema, visando aplicações agrícolas, assim os hidrogéis mostraram a capacidade de liberação sustentada e retenção de

água de até 7 dias, diminuindo para 6 dias na presença do fertilizante. O uso de compostos bioativos naturais, como os presentes na água ruça, oferece uma abordagem sustentável e inovadora para a reticulação desses materiais. Esse estudo demonstra a relevância de desenvolver hidrogéis com propriedades que atendam às demandas agrícolas, explorando a integração entre sustentabilidade e eficiência no manejo de recursos.

4. DESENVOLVIMENTO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi desenvolvido no formato de artigo científico. Portanto, esta seção será apresentada na formatação padrão para posterior submissão para revista a ser definida.

4.1 Artigo

Síntese de Hidrogéis via Reticulação Química e Iônica: Potencial Aplicação Agrícola

Resumo: Este estudo avaliou diferentes formulações de hidrogéis obtidos por reticulação iônica e química, com o objetivo de comparar seu comportamento de intumescimento, sua eficiência como carreadores de nutrientes em testes de liberação sustentada e seu desempenho em aplicação *in vivo*. Os hidrogéis reticulados quimicamente foram produzidos pelo método de *casting*, enquanto aqueles obtidos por reticulação iônica foram preparados pela interação com cloreto de cálcio, empregando o método de gotejamento. A análise do intumescimento permitiu identificar diferenças estruturais entre as matrizes poliméricas. O hidrogel obtido por reticulação iônica (ES-AG) apresentou índice de $212 \pm 9,97$ %, enquanto o hidrogel reticulado quimicamente (GB-G5) alcançou $1106,10 \pm 7,50$ %, evidenciando que cada tipo de reticulação influencia de maneira distinta a capacidade de absorção de água. Nos testes de liberação sustentada, ambas as formulações foram capazes de liberar nutrientes de forma controlada, porém com perfis diferentes. A matriz quimicamente reticulada (GB-G5-F) apresentou uma etapa inicial mais lenta de liberação, aproximando-se do equilíbrio por volta de 1500 min, atingindo aproximadamente 80 %. Já a formulação iônica (ES-AG-F) exibiu maior liberação inicial e alcançou estabilidade mais rapidamente, com cerca de 85 % de liberação em 1000 min. A aplicação *in vivo* possibilitou verificar os efeitos dessas matrizes no desenvolvimento das mudas de alface, permitindo observar diferenças no comportamento de cada tipo de hidrogel. De forma geral, os resultados indicam que ambos apresentam potencial para uso agrícola, cada

um com características específicas que podem ser exploradas conforme as demandas da cultura e as condições de cultivo. Esses achados reforçam a importância do desenvolvimento de hidrogéis funcionais capazes de otimizar o uso de água e fertilizantes, contribuindo para práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

Palavras-chaves: Reticulação iônica; Reticulação química; Liberação; Hidrogel; Fertilizante.

1 Introdução

A intensificação das crises ambientais em escala global, associada às mudanças climáticas, à degradação dos solos, à perda de biodiversidade e processos de devastação, tem evidenciado a vulnerabilidade dos sistemas agrícolas frente à crescente pressão por produção de alimentos. Nesse contexto, estima-se que a população mundial ultrapasse 9,7 bilhões de pessoas em 2050 e projeções recentes indicam que o consumo global de alimentos deve crescer entre 35 % a 56 % entre 2010 e 2050, cenário que coincide com a intensificação das crises hídricas e climáticas de diversas regiões do planeta (Van Dijk *et al.*, 2021).

Além disso, a incapacidade de atender às demandas crescentes por água limpa é reconhecida como uma das maiores ameaças à humanidade, tanto pela elevada probabilidade de ocorrência, quanto pelos impactos sistêmicos, que abrangem à saúde humana, à geração de energia, à produção de alimentos e o funcionamento dos ecossistemas. Estima-se que atualmente cerca de 55 % da população mundial enfrenta a escassez de água pelo menos durante um mês ao ano, percentual que tende a se agravar nas próximas décadas (Jones; Bierkens; Van Vliet, 2024).

Diante dessa perspectiva, a preocupação com a humanidade a longo prazo frente aos riscos globais sistêmicos levou a Organização das Nações Unidas (ONU), a instituir os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), dentre os quais se destaca o ODS 6, voltado à garantia de água potável e saneamento. Esse objetivo busca, entre outras metas, reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água, além de apoiar a identificação de áreas suscetíveis à avaliação de tendências globais e a formulação de políticas e investimentos em soluções adaptativas (ONU, 2018).

Dessa forma, surgem os hidrogéis, materiais constituídos por redes poliméricas contendo grupos funcionais hidrofílicos, responsáveis por sua elevada capacidade de absorção e retenção de água (Alemán *et al.*, 2007). A formação dessa rede é resultado do processo de reticulação, que confere ao material uma estrutura tridimensional estável e controla suas

propriedades de intumescimento e liberação de substâncias. Diversas técnicas de reticulação podem ser empregadas, promovendo interações de natureza covalente, iônica ou física, dependendo do tipo de polímero e do agente utilizado (Maitra; Shukla 2014).

Diferentes estratégias de reticulação têm sido exploradas para o desenvolvimento de hidrogéis com propriedades ajustadas às suas aplicações. Canabarro; Züge; Ferreira, (2025) produziram hidrogéis de goma xantana reticulados com água ruça proveniente do processamento de azeitonas, propondo uma alternativa sustentável para o reaproveitamento de resíduos e avaliando o efeito na germinação de rabanetes. Tomadoni *et al.*, (2020) estudaram esferas de alginato reticuladas com íons cálcio, aplicadas ao controle da umidade do solo e ao cultivo de alfaces sob estresse hídrico. Dudu; Alpaslan; Aktas, (2022) sintetizaram hidrogéis de dimetilacrilamida, ácido maleico e amido, com liberação sustentada de nutrientes e potencial uso no cultivo de alface. Esses estudos demonstram que diferentes métodos de reticulação, sejam químicos, iônicos ou naturais, podem ser empregados para ajustar as propriedades estruturais e funcionais dos hidrogéis.

Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver hidrogéis biopoliméricos por meio de reticulação química e iônica, avaliando suas propriedades de intumescimento, capacidade de liberação sustentada e desempenho em testes *in vivo* com mudas de alface, visando à sua aplicação como materiais funcionais em sistemas agrícolas.

2 Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Foram utilizados gelatina em pó tipo B (bovina) P.A. (Êxodo Científica, Brasil), ácido gálico monoidratado (Sigma-Aldrich, Brasil), alginato de sódio (Êxodo Científica, Brasil), cloreto de cálcio (Êxodo Científica, Brasil) e fertilizante granulado de NPK 10-10-10 (Nutriplast Ind. e Com. Ltda). Para os testes em solo, empregou-se substrato para plantas à base de turfa e perlita (Carolina Soil, Caçapava do Sul/RS, Brasil) e sementes de alface do cultivar Regina (TSV Sementes, *Agristar* do Brasil Ltda., Brasil).

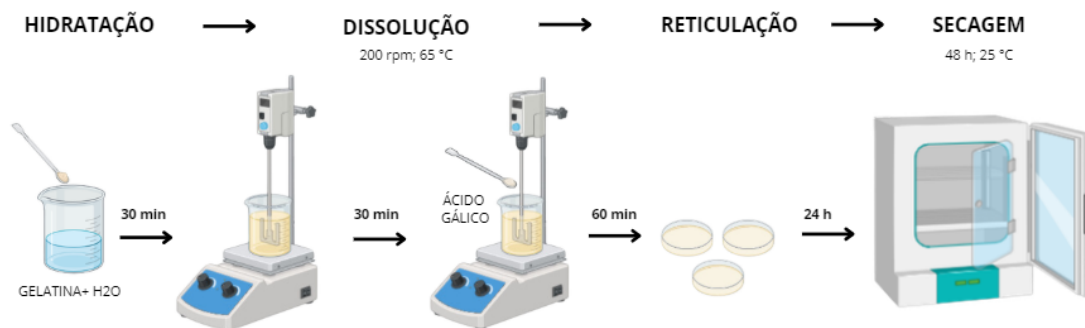
2.2 Síntese do Hidrogel Por Reticulação Química

A síntese dos hidrogéis de gelatina pelo método de casting e reticulação química com ácido gálico foi realizada conforme metodologia adaptada de Bhatia *et al.*, (2022) e Chen *et al.*,

(2022). Foram realizados testes preliminares envolvendo variações no tipo de gelatina utilizada e na quantidade de reticulante empregado, com o objetivo de identificar as condições mais adequadas para a formação dos hidrogéis. Os resultados dessas avaliações iniciais, bem como as formulações testadas, encontram-se apresentados no Apêndice A.

As soluções de gelatina foram preparadas a 10 % (m/v) em água destilada, com hidratação prévia por 30 min à temperatura ambiente. Em seguida, a mistura foi submetida à agitação mecânica a 200 rpm e aquecimento a 65 °C por 30 min, até completa dissolução. Após essa etapa, adicionou-se o ácido gálico como agente reticulante, nas proporções de 1 % (m/m) e 5 % (m/m), além de uma amostra controle sem reticulante, para avaliar o impacto do teor de reticulante, bem como da condição sem reticulante. As soluções foram mantidas sob agitação por 60 min a 65 °C e posteriormente distribuídas em moldes de 25 mm de diâmetro. As amostras permaneceram em repouso por 24 h à temperatura ambiente para permitir o processo de reticulação e, em seguida, foram submetidas à secagem em estufa sem circulação a 25 °C por 48 h. A Figura 1 ilustra o processo de síntese do hidrogel pelo método de *casting* e reticulação química.

Figura 1- Síntese do hidrogel pelo método de *casting* e reticulação química



Fonte: Autora (2025).

A síntese dos hidrogéis contendo fertilizante seguiu o mesmo procedimento descrito anteriormente, utilizando gelatina (10 % m/v) e ácido gálico (5 % m/m) como agente reticulante. O fertilizante NPK foi incorporado à solução, na proporção de 3 % (m/m), conforme otimização experimental relatada por Züge ([no prelo]), que indicou esse teor como ideal para homogeneizar o polímero, pois valores superiores favoreceram a formação de grumos. A adição ocorreu simultaneamente à introdução do agente reticulante, seguindo a metodologia descrita. Após completa homogeneização sob agitação a 65 °C por 60 min, as amostras foram deixadas em repouso por 24 h para reticulação e, posteriormente, secas em estufa sem circulação de ar a 40 °C durante 48 h.

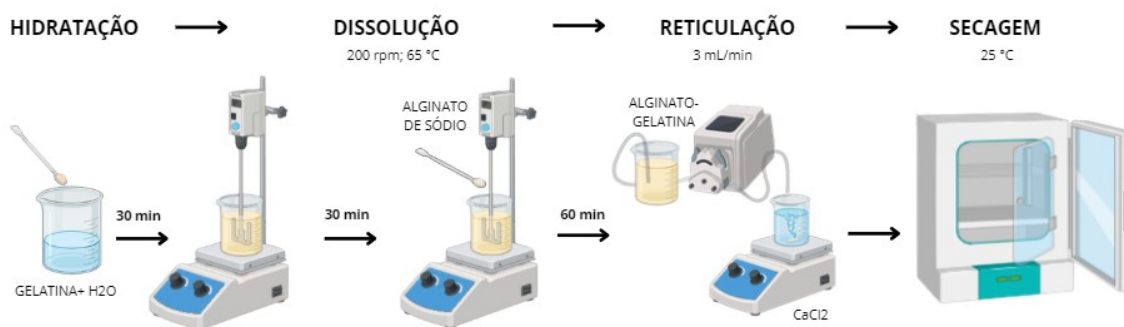
As formulações foram codificadas conforme a composição: GB-C (gelatina tipo B, controle), GB-G1 (gelatina tipo B com 1 % m/m de ácido gálico), GB-G5 (gelatina tipo B com 5 % m/m de ácido gálico) e GB-G5-F (gelatina tipo B com 5 % m/m de ácido gálico com 3 % m/m de fertilizante NPK).

2.3 Síntese do Hidrogel por Reticulação Iônica

Para a síntese das esferas de gelatina, utilizou-se gelatina (5 % m/v) e alginato de sódio (0,5 % m/v), seguindo a metodologia descrita por Liu *et al.*, (2024). Inicialmente, realizou-se a hidratação da gelatina em água destilada à temperatura ambiente por 30 min, conforme procedimento descrito anteriormente. Em seguida, adicionou-se o alginato de sódio à solução e, com auxílio de agitação mecânica (200 rpm) e aquecimento a 65 °C, promoveu-se a solubilização durante 30 min. Seguindo a mesma metodologia, também foi preparada uma formulação controle composta apenas por alginato a 0,5 % (m/v), utilizada para fins de comparação entre as amostras.

A solução reticulante foi preparada com CaCl_2 0,5 M, mantida sob agitação magnética constante. A solução polimérica foi então gotejada na solução reticulante utilizando uma bomba peristáltica (*Watson-Marlow Pumps*) na velocidade de 3 rpm, obtendo os hidrogéis com o formato de esferas. Posteriormente, os hidrogéis foram coletados, lavados com água destilada para remoção do excesso de CaCl_2 e secos em estufa sem circulação de ar a 25 °C, até atingirem seu teor de umidade de equilíbrio, conforme adotado por Jurić *et al.*, (2019). A Figura 2 ilustra o processo de síntese do hidrogel por gotejamento em solução de reticulação iônica.

Figura 2- Síntese do hidrogel por gotejamento e reticulação iônica



Fonte: Autora (2025).

As amostras foram denominadas de acordo com a formulação: ES-AL para as esferas controle, compostas apenas por alginato de sódio; ES-AG para as esferas alginato-gelatina; e

ES-AG-F para as esferas alginato-gelatina contendo fertilizante. Para a formulação ES-AG-F, o procedimento adotado foi o mesmo descrito anteriormente, com a diferença de que se empregou uma blenda de fertilizante NPK, incorporada à solução na proporção de 0,25 % (m/v), concomitantemente à adição do alginato durante o preparo da matriz polimérica (Joshi *et al.*, 2020).

3. Caracterizações dos hidrogéis

3.1 Índice de Intumescimento

O índice de intumescimento foi determinado de acordo com a norma ASTM D570-98 (ASTM, 2005). Para os hidrogéis de reticulação química, utilizou-se a metodologia descrita anteriormente, padronizando-se a massa inicial (m_i) das amostras secas em 0,5 g. Em seguida, as amostras foram imersas em 50 mL de água destilada, em triplicata, sendo retiradas em intervalos de tempo predeterminados. Após a remoção do excesso de água com papel absorvente, registrou-se a massa final (m_f).

Para o hidrogel reticulado ionicamente, o ensaio foi conduzido de acordo com a metodologia de Benhalima; Ferfera-Harrar; Lerari, (2017), utilizando 1 g de esferas em 50 mL de água destilada, seguindo o mesmo procedimento aplicado aos hidrogéis.

O grau de intumescimento (G) foi calculado pela Equação (1), sendo expresso em porcentagem (%), onde m_i e m_f correspondem às massas antes e após o intumescimento, respectivamente.

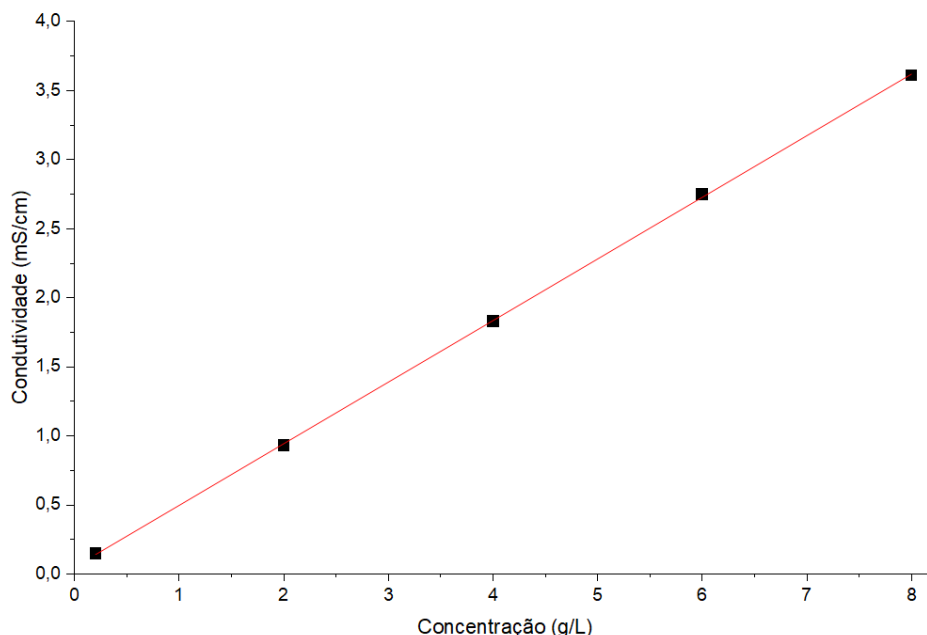
$$G (\%) = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

3.2 Liberação Sustentada do Fertilizante

Para a análise de liberação sustentada do nutriente foram utilizados o fertilizante comercial NPK 10-10-10 Nutriplast Ind. e Com. Ltda, composto por nitrogênio (N), pentóxido de fósforo (P_2O_5) e óxido de potássio (K_2O). Os grânulos de fertilizantes foram macerados, em seguida foram dissolvidos em água destilada nas concentrações de 0,2 a 8 g/L, por fim foram aferidas as medições de condutividade elétrica (Condutímetro *Lovibond SensoDirect 150*) das

soluções para o desenvolvimento da curva de calibração do fertilizante. A curva de calibração obtida pode ser observada na Figura 3.

Figura 3- Curva de calibração do fertilizante NPK (10-10-10)



Fonte: Autora (2025).

Os hidrogéis sintetizados foram pesados e depois imersos em 100 mL de água destilada e com o auxílio do condutímetro, as condutividades foram aferidas em determinados intervalos de tempo de 5 a 2850 min. A liberação de fertilizante foi avaliada a partir das leituras de condutividade elétrica das soluções, sendo os valores convertidos em massa de NPK liberada (g/L) por meio da curva de calibração previamente estabelecida, que apresentou coeficiente de determinação de 0,99, conforme a Equação 2.

A concentração obtida pela equação corresponde à massa de fertilizante presente em 1000 mL de solução. Considerando que, na síntese dos hidrogéis, foram utilizados 100 mL de água destilada, realizou-se o ajuste proporcional por regra de três, obtendo-se assim a massa efetivamente liberada em cada amostra. Posteriormente, esse valor foi normalizado pela massa inicial do hidrogel seco, resultando em valores expressos em gramas de fertilizante por grama de hidrogel (g/g). Em seguida, esses dados foram convertidos para porcentagem, a fim de facilitar a interpretação dos resultados.

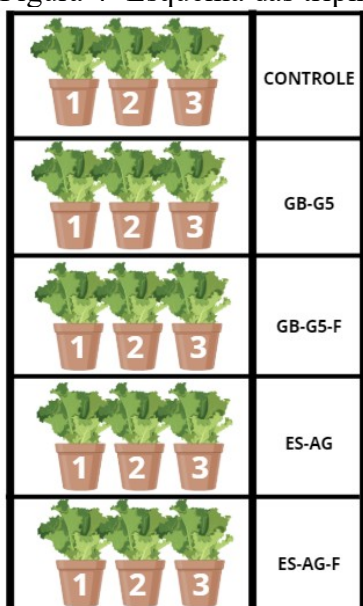
$$\text{Concentração (g/L)} = \frac{\text{Condutividade (mS/cm)} - 0,0539}{0,4457} \quad (2)$$

3.3 Teste *in vivo*

Para o desenvolvimento do teste *in vivo*, adotou-se uma metodologia adaptada de Tomadoni *et al.*, (2020) e Brito (2025). Sementes de alface (*Lactuca sativa*) do tipo Regina foram germinadas em bandejas de germinação, com três sementes por célula, utilizando substrato turfa-perlita durante 20 dias. Após esse período, as mudas foram separadas e transplantadas manualmente para vasos de 800 mL contendo aproximadamente 100 g de substrato.

As plantas foram monitoradas quanto ao aspecto visual e número de folhas por contagem manual. A capacidade de irrigação foi estabelecida de acordo com as Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009), sendo definida inicialmente a capacidade de campo em 100 % e, posteriormente, reduzida para 50 % para indução ao déficit hídrico. Os testes foram realizados em triplicata, contemplando cinco condições experimentais: controle (sem NPK e sem hidrogel); hidrogéis reticulados ionicamente (ES-AG); hidrogéis reticulados ionicamente associados a NPK (ES-AG-F); hidrogéis reticulados por agentes químicos (GB-G5); e hidrogéis reticulados por agentes químicos associados a NPK (GB-G5-F). Em todas as condições que utilizaram hidrogéis, foi empregada a proporção de 1% (m/m). A Figura 4 ilustra o esquema das triplicatas desenvolvidas no teste *in vivo*.

Figura 4- Esquema das triplicatas aplicadas no teste *in vivo*



Fonte: Autora (2025).

3.4 Tratamento de Dados

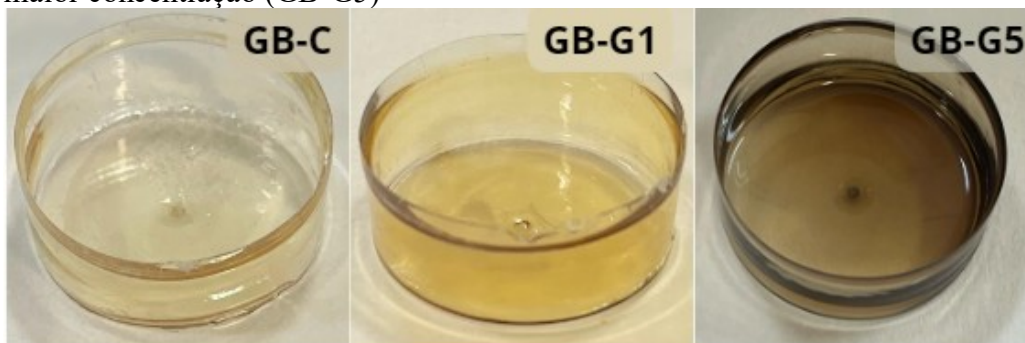
Os dados experimentais foram coletados, analisados e apresentados por meio de gráficos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização visual e estrutural dos hidrogéis sintetizados

A síntese das diferentes formulações dos hidrogéis permitiu observar variações tanto na coloração quanto na integridade estrutural das amostras. No desenvolvimento dos hidrogéis reticulados quimicamente pelo método de *casting*, verificou-se que as estruturas obtidas apresentavam diâmetro aproximado de 25 mm. À medida que a quantidade de reticulante aumentou, a formulação exibiu coloração progressivamente mais escura. A Figura 5 apresenta o aspecto visual dos hidrogéis de gelatina.

Figura 5- Aspecto visual da síntese dos hidrogéis obtidos por reticulação química: Controle (GB-C), a formulação com baixa concentração de ácido gálico (GB-G1) e a formulação com maior concentração (GB-G5)



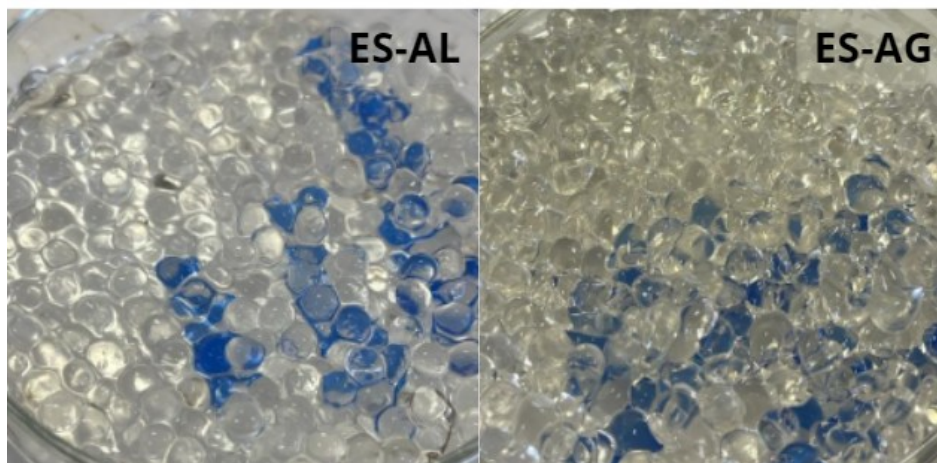
Fonte: Autora (2025).

Carranza *et al.*, (2025) observaram o escurecimento de hidrogéis de gelatina reticulados com ácido gálico, desenvolvidos para aplicações em engenharia de tecidos por impressão 3D. Os autores atribuem essa mudança de coloração, de amarelo para marrom escuro, ao processo de oxidação do ácido gálico. Esse comportamento também é relatado por outros estudos, indicando que a oxidação é uma característica comum em sistemas reticulados com compostos fenólicos (Bhowhowmik; Agyei; Ali, 2024; Hamzah; Ibrahim; Tjahjono, 2024).

Os hidrogéis reticulados ionicamente apresentaram diâmetro aproximado de 2,30 mm, além de variações perceptíveis na coloração. Na formulação com incorporação de gelatina (ES-

AG), observou-se que as esferas adquiriram uma tonalidade mais amarelada. A Figura 6 apresenta o aspecto visual dos hidrogéis obtidos.

Figura 6- Aspecto visual dos hidrogéis obtidos por reticulação iônica: Esfera apenas com alginato (ES-AL) e esfera com alginato-gelatina (ES-AG)



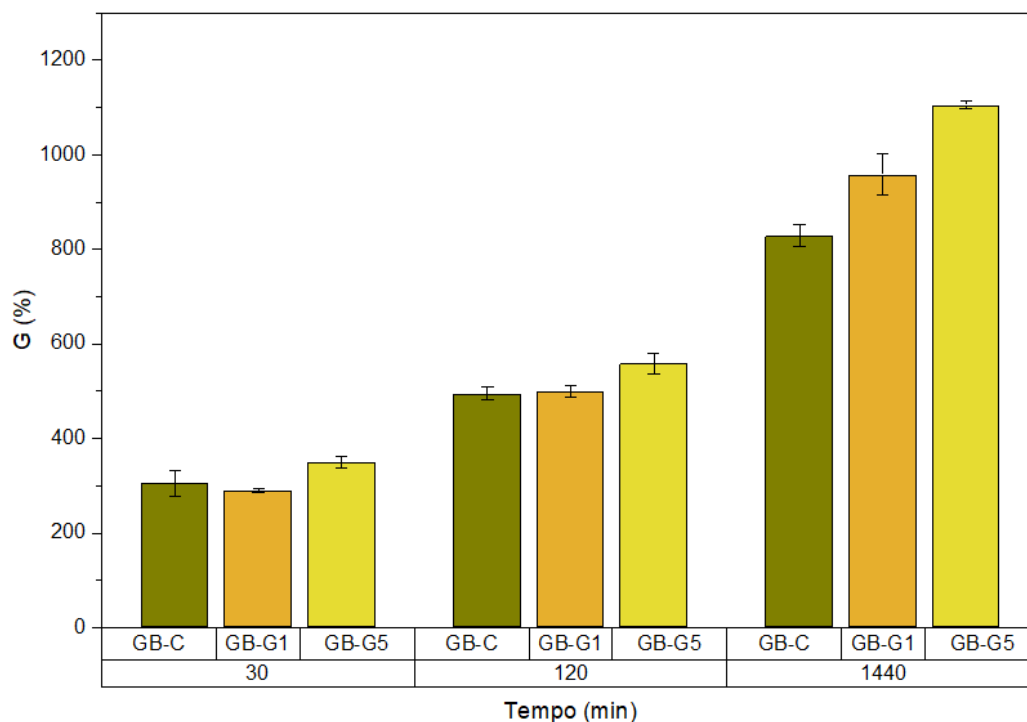
Fonte: Autora (2025).

Conforme descrito na literatura, durante a reticulação iônica com cloreto de cálcio, os íons Ca^{2+} interagem predominantemente com os grupos carboxilato do alginato, promovendo a formação de uma rede tridimensional mais organizada e estável, resultando em hidrogéis visualmente homogêneos e com certo grau de translucidez (Hu *et al.*, 2021; Samchenko *et al.*, 2024). No entanto, mesmo mantendo sua integridade estrutural, a presença da gelatina conferiu uma tonalidade mais amarelada, devido à coloração do biopolímero adicionado, resultando em uma cor mais intensa quando comparadas à formulação controle, composta apenas por alginato de sódio.

4.2 Índice de intumescimento dos hidrogéis

A capacidade de absorção de água é de extrema importância, para aplicação dos hidrogéis, é influenciada por diversos fatores, incluindo pH, força iônica, temperatura e densidade de reticulação. A Figura 7 apresenta o comportamento de intumescimento das formulações de gelatina, abrangendo o controle (GB-C) e as amostras reticuladas com ácido gálico (GB-G1 e GB-G5).

Figura 7- Índice de intumescimento dos hidrogéis obtidos por reticulação química



Fonte: Autora (2025).

Os resultados mostram que, para 30 min, o intumescimento da amostra controle GB-C foi de $304,28 \pm 26,11$ %, enquanto as formulações GB-G1 e GB-G5 apresentaram valores de $288,76 \pm 2,99$ % e $348,45 \pm 12,53$ %, respectivamente. Após 120 min, observou-se um aumento expressivo em todas as amostras, com a GB-C atingindo $494,02 \pm 13,51$ %, a GB-G1 chegando a $498,45 \pm 12,15$ %, e a GB-G5 alcançando $557,46 \pm 22,41$ %. No tempo final de 1440 min, o intumescimento máximo registrado foi de $829 \pm 23,14$ % para GB-C, $959,11 \pm 44,98$ % para GB-G1, e $1106,10 \pm 7,50$ % para GB-G5, indicando que esta última apresentou a maior capacidade de absorção ao longo de todo o período avaliado.

Nos primeiros minutos de imersão, todas as formulações apresentaram rápida absorção de água. Nesse intervalo inicial, os valores obtidos para as amostras reticuladas foram comparáveis aos do controle, indicando que a presença do ácido gálico não reduziu a capacidade de intumescimento do material. Com o avanço do tempo de hidratação, verificou-se aumento contínuo da expansão da rede polimérica para todas as amostras. No período de 120 min, os três hidrogéis apresentaram um comportamento muito próximo entre si, indicando que a difusão de água ainda ocorria de forma progressiva no interior do material.

No tempo final, correspondente ao equilíbrio de intumescimento, as diferenças entre as formulações tornaram-se mais evidentes. O hidrogel controle apresentou menor grau de intumescimento, enquanto as amostras contendo ácido gálico exibiram maior capacidade de

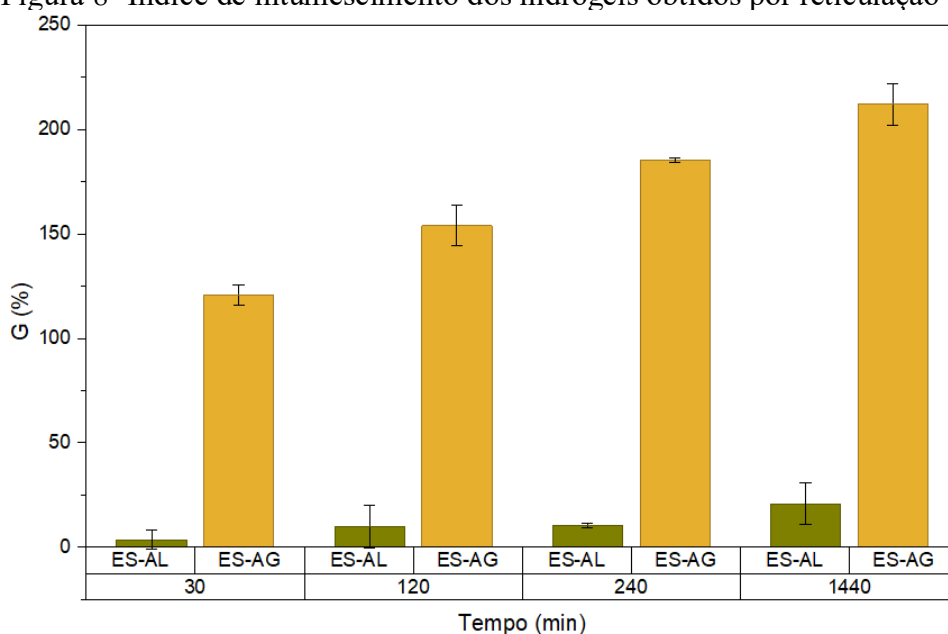
absorção, com destaque para a formulação GB-G5, que apresentou a expansão mais elevada. Esse comportamento sugere que a reticulação promovida pelo ácido gálico não tornou a rede mais rígida, como ocorre com agentes reticulantes tradicionais, mas pode ter gerado uma estrutura mais heterogênea e com maior afinidade por água, especialmente nas formulações com maior concentração do composto fenólico.

A literatura mostra que hidrogéis à base de gelatina apresentam capacidade de intumescimento bastante variável. Por exemplo, hidrogéis de gelatina reticulados com glutaraldeído apresentaram apenas 218 % de intumescimento em água destilada (Pulat; Saglam, 2018). De forma semelhante, outras formulações de gelatina reticuladas quimicamente exibiram valores relativamente baixos, variando entre 228 e 251 % (Tariq *et al.*, 2023). De maneira semelhante, López-Velázquez *et al.*, (2019) relataram valores de intumescimento entre 1080 e 1200 % para hidrogéis de gelatina–quitosana–PVA, independentemente do pH.

Diante desses resultados, a formulação GB-G5 foi selecionada para as etapas subsequentes de incorporação do fertilizante, uma vez que apresentou o maior grau de intumescimento entre as amostras avaliadas, indicando melhor desempenho para aplicação na liberação de nutrientes.

A Figura 8 apresenta o índice de intumescimento das esferas de gelatina ao longo do tempo para as formulações controle de apenas alginato (ES-AL) e contendo alginato-gelatina (ES-AG).

Figura 8- Índice de intumescimento dos hidrogéis obtidos por reticulação iônica



Fonte: Autora (2025).

Os resultados demonstram que, aos 30 min, a formulação controle ES-AL apresentou um intumescimento de $3,68 \pm 4,75$ %, enquanto a formulação ES-AG exibiu um valor superior, atingindo $120,79 \pm 4,75$ %. Em 120 min, observou-se um aumento progressivo em ambas as formulações, com ES-AL alcançando $9,86 \pm 9,96$ % e ES-AG chegando a $154,02 \pm 9,93$ %. Após 240 min, os valores foram de $10,48 \pm 1,15$ % para ES-AL e $185,11 \pm 1,15$ % para ES-AG. No tempo final de 1440 min, correspondente ao equilíbrio de intumescimento, a amostra ES-AL atingiu $20,87 \pm 9,97$ %, enquanto ES-AG apresentou o maior valor, chegando a $212 \pm 9,97$ %, confirmando a superioridade da matriz alginato–gelatina em capacidade de absorção.

Nos primeiros minutos de hidratação, observou-se uma diferença marcante entre as formulações, a amostra ES-AG (alginato–gelatina) apresentou um intumescimento inicial muito superior ao da formulação controle ES-AL. No período de 1440 min, as diferenças tornaram-se ainda mais evidentes.

Em estudos realizados por Rezaei *et al.*, (2016), foram produzidas esferas de alginato reticuladas com cloreto de cálcio que apresentaram um índice de intumescimento de aproximadamente 57 %, enquanto as esferas formuladas com a combinação alginato–gelatina alcançaram cerca de 84 %. Os autores buscaram desenvolver um método de encapsulamento eficiente utilizando hidrogéis biocompatíveis à base desses dois polímeros, com o objetivo de aprimorar a liberação sustentada de compostos para aplicações medicinais.

Shivakumara e Demappa (2019) observaram que hidrogéis de alginato de sódio combinados com álcool polivinílico apresentaram índices de intumescimento variando de 50 a 400 % em diferentes soluções salinas, demonstrando potencial para aplicações agrícolas. Além disso, diversos estudos destacam que o alginato de sódio, embora seja capaz de formar hidrogéis rígidos e relativamente porosos, apresenta propriedades físicas e mecânicas limitadas (Jurić *et al.*, 2021). Entretanto, sua combinação com outros biopolímeros pode melhorar significativamente a retenção de água. Por exemplo, a incorporação de gelatina tem se mostrado eficaz em aumentar a taxa de intumescimento das matrizes, possivelmente devido à maior hidrofiliabilidade desse polímero (Orabi; Ghosh, 2023).

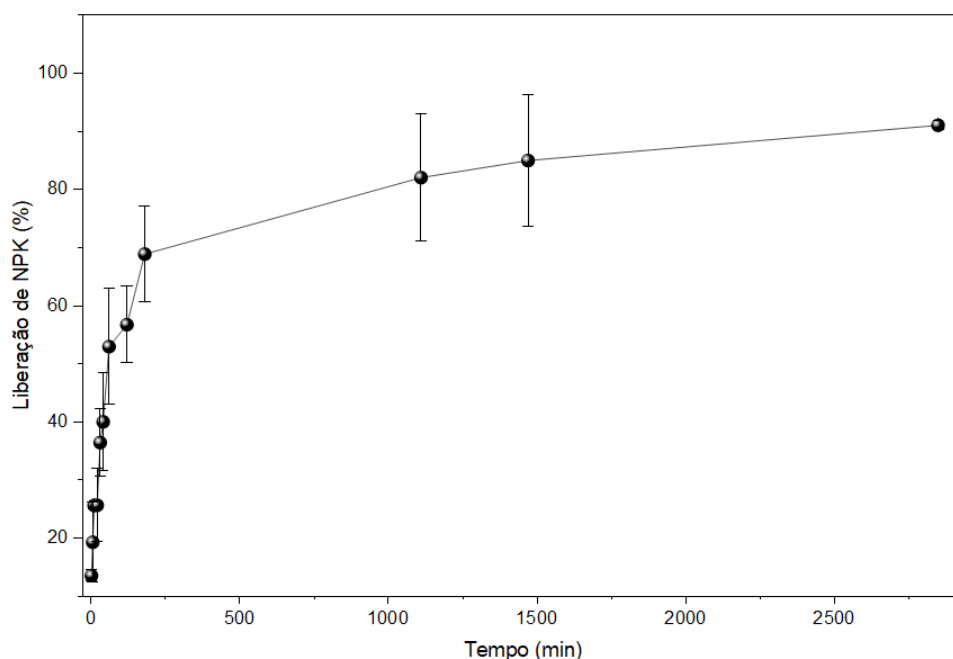
De forma semelhante ao que é descrito na literatura, o presente estudo também mostrou que a adição de gelatina aumenta a capacidade de intumescimento das matrizes de alginato. Enquanto a formulação ES-AL permaneceu abaixo de 25 %, a formulação ES-AG ultrapassou 200 %, comportamento alinhado aos valores observados em sistemas alginato–gelatina reportados por Rezaei *et al.*, (2016) e por outros autores. Portanto, dentre os resultados experimentais, a formulação alginato–gelatina foi selecionada para as etapas subsequentes,

incluindo a incorporação do fertilizante, por apresentar o melhor desempenho entre as amostras avaliadas.

4.3 Liberação sustentada do fertilizante NPK pelos hidrogéis em meio aquoso

A Figura 9 apresenta o perfil de liberação sustentada do fertilizante NPK pelo hidrogel GB-G5-F em meio aquoso, evidenciando um comportamento típico de sistemas difusionais, ou seja, sistemas nos quais a transferência de massa ocorre principalmente por difusão. Nesse tipo de mecanismo, o hidrogel atua como uma matriz semipermeável, permitindo que substâncias entrem ou saiam de sua estrutura conforme gradientes de concentração (Díaz-Marín *et al.*, 2022; Fujiyabu *et al.*, 2019).

Figura 9- Liberação sustentada de fertilizante no hidrogel GB-G5-F



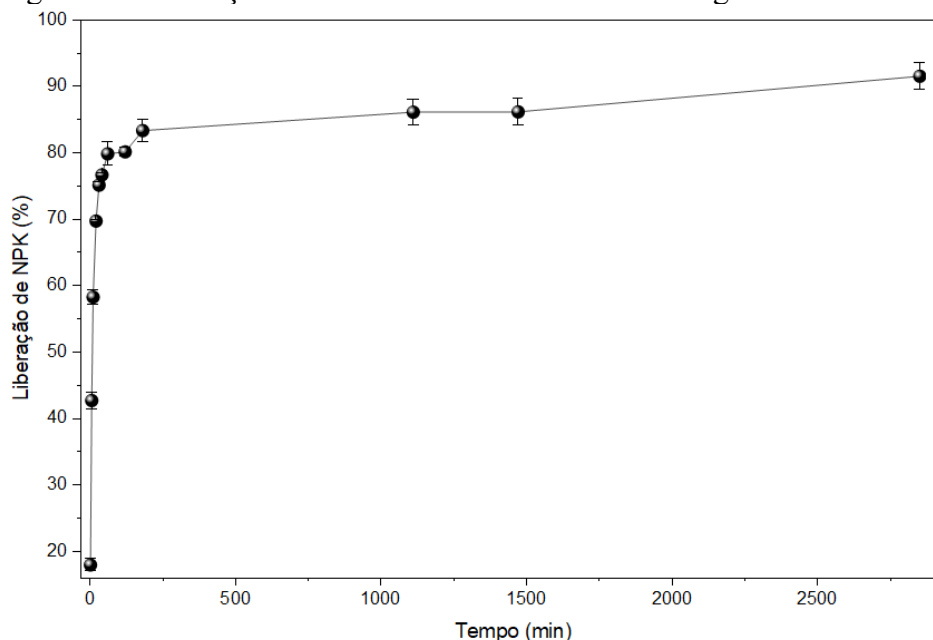
Fonte: Autora (2025).

Observa-se inicialmente uma etapa de liberação rápida, caracterizada pelo aumento da concentração de NPK nos primeiros minutos, o que se deve a liberação inicial do fertilizante localizado na superfície do hidrogel e à rápida hidratação da matriz, que favorece o intumescimento e a mobilidade inicial dos íons (Mandal *et al.*, 2024). Após essa fase inicial, a curva passa a apresentar estabilidade. Esse regime, que se estende até o tempo de 1500 min, quando cerca de 80 % do NPK é liberado, atingindo patamar próximo ao equilíbrio.

Quando o hidrogel entra em contato com a água, ocorre a difusão do meio aquoso para o interior da matriz polimérica, promovendo o intumescimento. Nesse processo, os fertilizantes presentes, principalmente aqueles localizados nas regiões mais externas do material, dissolvem-se rapidamente, resultando em uma liberação inicial acelerada. A liberação gradual dos íons fertilizantes ocorre devido ao gradiente de concentração estabelecido entre o interior do hidrogel e o meio externo. Esse processo prossegue até que seja atingido o equilíbrio de concentrações entre a fase interna e a solução aquosa (Mandal *et al.*, 2024).

Estudos da literatura corroboram o comportamento observado. Laddawan; Auecharoenrat, Tongsook (2025) relataram que hidrogéis de carboximetilcelulose derivados de papel reciclado e serragem também apresentaram uma fase inicial de liberação rápida, seguida por uma etapa de liberação mais lenta e sustentada, em contraste com a dissolução imediata da ureia livre. Da mesma forma, Khanam *et al.*, (2025) demonstraram que hidrogéis de celulose reforçados com palha de arroz promoveram uma liberação marcadamente mais lenta de NPK ao longo de 28 dias, atribuída ao efeito de barreira estrutural da matriz reforçada, responsável por restringir a difusão dos íons. A Figura 10 apresenta o perfil de liberação de NPK pelo hidrogel ES-AG-F.

Figura 10- Liberação sustentada de fertilizante no hidrogel ES-AG-F



Fonte: Autora (2025).

Observa-se uma liberação rápida nos primeiros minutos, indicando que a maior fração do fertilizante presente nas regiões mais externas da matriz é imediatamente solubilizada ao contato com a água. Após essa etapa inicial, a curva se estabiliza e passa a apresentar apenas

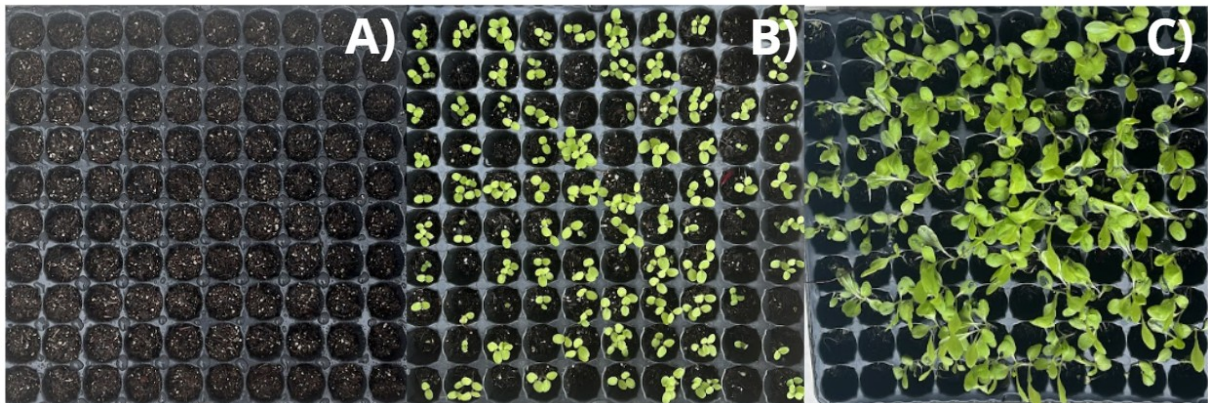
pequenas variações ao longo do tempo, mostrando que a liberação passa a ocorrer de forma lenta e sustentada.

Considerando esses resultados, os hidrogéis desenvolvidos neste estudo situam-se em um regime intermediário em relação aos sistemas reportados, apresentando liberação mais controlada que o fertilizante puro e que a ureia livre observada na literatura, mas mais rápida que hidrogéis com estrutura significativamente reforçada, como os produzidos com palha de arroz. Essa comparação evidencia que as formulações desenvolvidas conseguem modular a liberação do fertilizante sem comprometer a estabilidade do material, apresentando potencial para aplicações que demandem liberação sustentada em intervalos de tempo intermediários.

4.4 Teste *in vivo*

As mudas utilizadas no teste foram inicialmente germinadas de forma conjunta em bandejas de germinação, levando cerca de 20 dias para completar o processo e alcançar o estágio inicial de estabelecimento. A Figura 11 mostra a evolução da germinação durante os 20 dias.

Figura 11- Germinação das mudas de alface: A) corresponde ao primeiro dia, B) desenvolvimento após 18 dias e C) aspecto após 20 dias



Fonte: Autora (2025).

Após esse período, cada muda foi individualmente transferida para um vaso, garantindo condições homogêneas de desenvolvimento antes do início do teste de déficit hídrico. A Figura 12 apresenta o tamanho inicial das mudas ao serem transferidas para o teste *in vivo*.

Figura 12- Mudas germinadas e aplicadas ao teste



Fonte: Autora (2025).

As mudas recém-transplantadas apresentam elevada sensibilidade estrutural, especialmente no sistema radicular. Assim, foi adotado um período inicial de cinco dias de irrigação a 100 % da capacidade de campo, permitindo sua adaptação antes da redução para 50 % da capacidade de campo. Todos os tratamentos foram submetidos às mesmas condições de irrigação, permitindo uma comparação direta do desempenho das diferentes formulações de hidrogel em relação ao tratamento controle. A Figura 13 demonstra as mudas transplantadas no 1º dia e após o 18º dia.

As amostras foram organizadas conforme a disposição ilustrada anteriormente na Figura 5, sendo alinhadas em sequência para facilitar a identificação. A Figura 13 apresenta essa mesma organização, na qual as amostras aparecem de acordo com o arranjo estabelecido, evidenciando sua aparência antes e após a redução da irrigação.

Figura 13- Antes e após a redução da irrigação



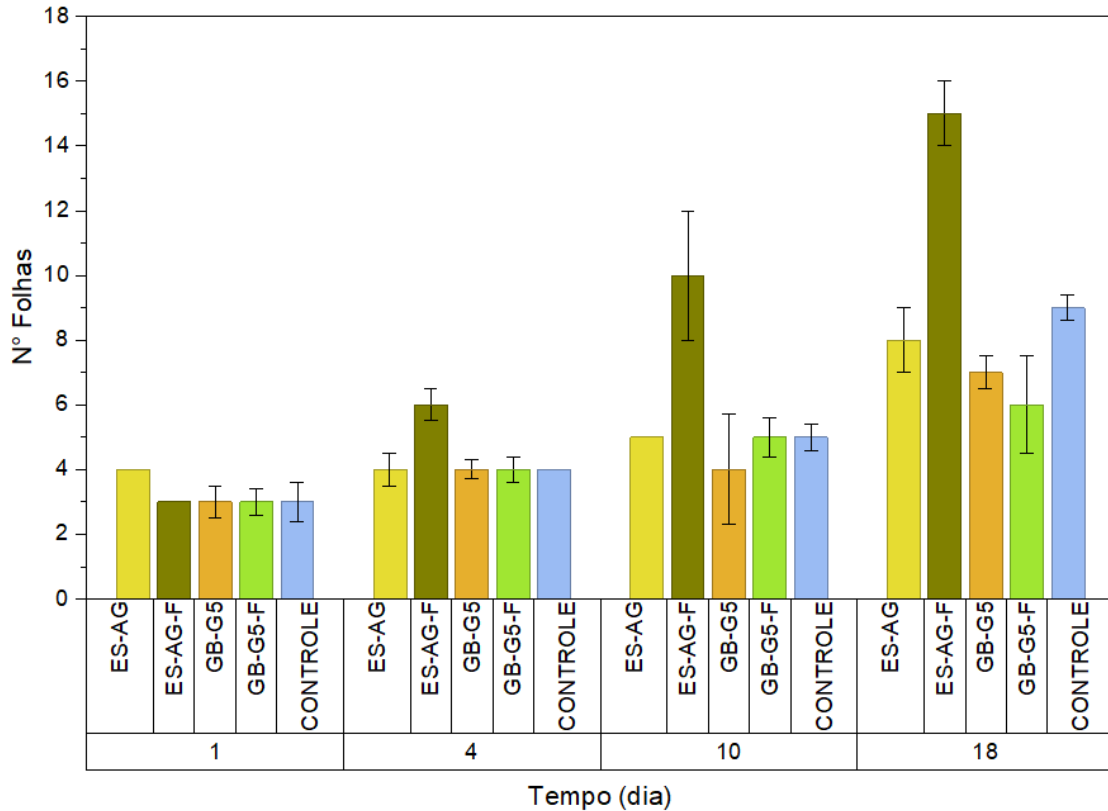
Fonte: Autora (2025).

Observou-se que, no primeiro dia, todas as mudas apresentaram aspecto semelhante, indicando um desenvolvimento inicial similar entre as diferentes formulações testadas. No entanto, após 18 dias, com a redução da capacidade de irrigação para 50 %, as diferenças no comportamento das amostras tornaram-se mais evidentes. Tanto as amostras contendo o hidrogel GB-G5-F quanto as amostras contendo o hidrogel GB-G5 apresentaram menor desenvolvimento quando comparados aos demais tratamentos. Em contraste, ES-AG-F, demonstraram desempenho mais favorável, mantendo sua integridade e permitindo o crescimento das mudas mesmo sob condições reduzidas de irrigação. O tratamento controle, apesar da diminuição de 50 % no volume de água aplicado, manteve-se relativamente estável ao longo do período experimental.

Resultados semelhantes foram relatados por Tomadoni *et al.*, (2021), que observaram que mudas de alface cultivadas com hidrogel contendo fertilizante apresentaram porte reduzido e murcha, atribuídos à insuficiência de material para retenção eficiente de água no solo. De forma complementar, Angelis *et al.*, (2025) identificaram que hidrogéis aplicados à cultura da alface podem ocasionar um efeito inibitório temporário, reduzindo parâmetros de crescimento durante as fases iniciais.

A Figura 14 mostra de forma geral o número de folhas identificadas no decorrer do 1º ao 18º dia.

Figura 14- Número de folhas identificadas no decorrer do teste *in vivo*



Fonte: Autora (2025).

De acordo com a Figura 14, observa-se que no primeiro dia, todas as mudas apresentaram número de folhas semelhante, indicando desenvolvimento inicial equivalente entre os tratamentos. A partir do décimo dia, o hidrogel reticulado ionicamente com NPK passou a apresentar maior número de folhas, sugerindo liberação mais eficiente de água e nutrientes. No 18º dia, esse tratamento manteve o melhor desempenho, seguido do hidrogel reticulado ionicamente sem NPK. Já os hidrogéis reticulados quimicamente, com ou sem NPK, apresentaram menor desenvolvimento, indicando possível limitação na disponibilidade hídrica. O controle mostrou crescimento intermediário ao longo do período avaliado.

Em testes conduzidos por Dudu; Alpaslan; Aktas, (2022), avaliando o desenvolvimento de mudas de alface após 35 dias da aplicação do hidrogel, observou-se que as plantas tratadas apresentaram entre 20 e 28 folhas, enquanto o tratamento controle, sem hidrogel, registrou apenas 18 folhas. Esses resultados demonstram que o uso de hidrogéis pode favorecer o aumento do número de folhas ao longo do ciclo da cultura. No presente estudo, embora o

período de avaliação tenha sido mais curto, os dados obtidos indicam tendências semelhantes, sugerindo que a continuidade do monitoramento por mais dias seria necessária para confirmar esse comportamento. Ainda assim, os resultados preliminares mostram-se promissores quanto ao potencial dos hidrogéis em melhorar o desempenho das mudas.

4. CONCLUSÃO

Os hidrogéis sintetizados por diferentes métodos de reticulação apresentaram comportamentos distintos. Embora o hidrogel reticulado quimicamente tenha exibido maiores índices de intumescimento, seu desempenho no teste *in vivo* indicou certa interferência no desenvolvimento das mudas. Ainda assim, os valores de intumescimento obtidos para ambos os sistemas foram compatíveis com aqueles descritos na literatura.

No estudo de liberação sustentada de fertilizante, verificou-se que os dois materiais apresentaram perfis semelhantes. Entretanto, a reticulação química (GB-G5-F) resultou em uma liberação inicial mais lenta, enquanto a reticulação iônica (ES-AG-F) mostrou maior estabilidade ao longo do tempo. Assim, cada formulação demonstrou características específicas quanto ao mecanismo de liberação, o hidrogel GB-G5-F apresentou comportamento mais adequado para liberações mais lentas e sustentadas, enquanto o ES-AG-F favoreceu uma disponibilização mais imediata dos nutrientes.

Dessa forma, os hidrogéis desenvolvidos demonstraram potencial para aplicação em sistemas agrícolas por sua capacidade de reter água e promover liberação sustentada de fertilizantes. Sua utilização pode ser direcionada a diferentes tipos de culturas, sejam aquelas que demandam uma disponibilização imediata de nutrientes seguida de maior estabilidade, sejam aquelas que se beneficiam de uma liberação gradual ao longo do tempo.

5. REFERÊNCIAS

ALEMÁN, J. V. *et al.* Definitions of terms relating to the structure and processing of sols, gels, networks, and inorganic-organic hybrid materials (IUPAC Recommendations 2007). **Pure and Applied Chemistry**, v. 79, n. 10, p. 1801–1829, 1 jan. 2007. <https://doi.org/10.1351/pac200779101801>

ANGELIS, Gaia De *et al.* Recyclable 3D printable single network granular hydrogels. **Biomaterials Science**, v. 13, n. 6, p. 1426–1433, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D4BM00871E>

ASTM. D647 – Practice for Design of Molds for Test Specimens of Plastic Molding Materials. ASTM Standards. ISO. ISO 62 – Plastics: Determination of Water Absorption. ASTM. D570-98 – Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/44720/549629896af84d7f9ef54f9008f89e15/ASTM-D570-98-2005-.pdf>

BENHALIMA, Tayeb; FERFERA-HARRAR, Hafida; LERARI, Djahida. Optimization of carboxymethyl cellulose hydrogels beads generated by an anionic surfactant micelle templating for cationic dye uptake: Swelling, sorption and reusability studies. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 105, p. 1025–1042, 1 dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.07.135>

BHATIA, Saurabh *et al.* Gallic Acid Crosslinked Gelatin and Casein Based Composite Films for Food Packaging Applications. **Polymers**, v. 14, n. 19, p. 4065, 28 set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14194065>

BHOWMIK, Shuva; AGYEI, Dominic; ALI, Azam. Biodegradable chitosan hydrogel film incorporated with polyvinyl alcohol, chitoooligosaccharides, and gallic acid for potential application in food packaging. **Cellulose**, v. 31, n. 13, p. 8087–8103, set. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-06080-8>

BRITO, Letícia Fonseca Anício. **Produção da alface (lactuca sativa l) sob níveis de irrigação e presença de hidrogel**. VIÇOSA, MG: UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 2025. Disponível em: <https://locus.ufv.br/bitstreams/7d69b3c8-9a2b-4d7b-9c32-a58938853729/download>

CANABARRO LEITE, Daiani; ZÜGE, Gabriele; FERREIRA DE MATOS JAURIS, Carolina. Development of Xanthan Gum Hydrogels Cross-Linked with Olive Mill Wastewater: A Sustainable Approach to Reusing Olive Oil Residues. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 13, n. 29, p. 11286–11300, 28 jul. 2025. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c02141>

CARRANZA, Teresa *et al.* Innovative Use of Gallic Acid as a Crosslinking Agent for Gelatin: A Biocompatible Strategy for 3D-Printed Scaffolds in Tissue Engineering. **Pharmaceutics**, v. 17, n. 8, p. 951, ago. 2025. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17080951>

CHEN, Yun *et al.* Hydrogel with the network structure fabricated by ANTHOCYANIN–GELATIN crosslinking and improved mineral encapsulation ability. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 57, n. 11, p. 7143–7155, nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ijfs.16057>

DÍAZ-MARÍN, Carlos D. *et al.* Heat and mass transfer in hygroscopic hydrogels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 195, p. 123103, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123103>

DUDU, Tuba Ersen; ALPASLAN, Duygu; AKTAS, Nahit. Synthesis of controlled release hydrogels from dimethylacrylamide/maleic acid/starch and its application in lettuce cultivation. **Journal of Polymer Research**, v. 29, n. 12, p. 524, dez. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-03363-1>

FENG, Wenjun; WANG, Zhengke. Tailoring the Swelling-Shrinkable Behavior of Hydrogels for Biomedical Applications. **Advanced Science**, v. 10, n. 28, p. 2303326, 2023.

<https://doi.org/10.1002/advs.202303326>

FUJIYABU, Takeshi *et al.* Diffusion Behavior of Water Molecules in Hydrogels with Controlled Network Structure. **Macromolecules**, v. 52, n. 5, p. 1923–1929, 12 mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b02488>

HAMZAH, Nursalam; IBRAHIM, Slamet; TIAHJONO, Daryono H. Evaluation of phenolic compounds as cross-linkers to improve the qualities of halal gelatin from milkfish scales (Chanos chanos). **Narra J**, v. 4, n. 3, p. e907, dez. 2024. <https://doi.org/10.52225/narra.v4i3.907>

HU, Chuhuan *et al.* Ions-induced gelation of alginate: Mechanisms and applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 177, p. 578–588, 30 abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.086>

JONES, Edward R.; BIERKENS, Marc F. P.; VAN VLIET, Michelle T. H. Current and future global water scarcity intensifies when accounting for surface water quality. **Nature Climate Change**, v. 14, n. 6, p. 629–635, jun. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02007-0>

JOSHI, Prutha P. *et al.* Preparation of slow release encapsulated insecticide and fertilizer based on superabsorbent polysaccharide microbeads. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, n. 39, p. 49177, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.49177>

JURIĆ, Slaven *et al.* Physicochemical properties and release characteristics of calcium alginate microspheres loaded with *Trichoderma viride* spores. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 11, p. 2534–2548, 1 nov. 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62634-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62634-1)

KHANAM, Sarna *et al.* Advancing nutrient management in agriculture: Rice straw to nitrogen, phosphorus and potassium-containing hydrogel as slow-release fertilizer. **Industrial Crops and Products**, v. 224, p. 120380, 1 fev. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120380>

LADDAWAN, Phatthan; AUECHAROENRAT, Sunisa; TONGSOOK, Chanakan. Environmentally Friendly Carboxymethyl Cellulose Hydrogels Derived from Waste Paper and Sawdust as a Urea Release Agent. **ACS Omega**, v. 10, n. 17, p. 17296–17309, 2025. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09928>

LIU, Haofu *et al.* Lightweight pH-responsive chitosan hydrogel iron fertilizer: Efficient performance, controlled-release, and tomato application. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 5, p. 113428, 1 out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113428>

LÓPEZ-VELÁZQUEZ, Julio César *et al.* Gelatin–chitosan–PVA hydrogels and their application in agriculture. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 94, n. 11, p. 3495–3504, 2019. <https://doi.org/10.1002/jctb.5961>

MAITRA, Jaya; SHUKLA, Vivek. Cross-linking in hydrogels - a review. **Am J Polym Sci**, v. 4, p. 25–31, 1 jan. 2014. <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20140402.01>

MANDAL, Manas *et al.* A Review on Sustainable Slow-Release N, P, K Fertilizer Hydrogels for Smart Agriculture. **ChemPlusChem**, v. 90, n. 3, p. e202400643, mar. 2025. <https://doi.org/10.1002/cplu.202400643>

ONU, United Nations. **The Sustainable Development Goals Report 2018**. [S.l.]: Stylus Publishing, LLC, 2018. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2018/the-sustainable-development-goals-report-2018-en.pdf>

ORABI, Mohamad; GHOSH, Gargi. Investigating the Interplay Between Matrix Compliance and Passaging History on Chondrogenic Differentiation of Mesenchymal Stem Cells Encapsulated Within Alginate-Gelatin Hybrid Hydrogels. **Annals of Biomedical Engineering**, v. 51, jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10439-023-03313-y>

PULAT, Mehlika; SAGLAM, Nese YOLTAY. The Preparation of Controlled Release Fertilizer Based on Gelatin Hydrogel Including Ammonium Nitrate and Investigation of its Influence on Vegetable Growth. 2018. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/525780>

REZAEI, Soheila *et al.* Improving the Growth Rate of Human Adipose-Derived Mesenchymal Stem Cells in Alginate/Gelatin Versus Alginate Hydrogels. **Iranian Journal of Biotechnology**, v. 14, n. 1, p. 1–8, mar. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.15171/ijb.1185>

SAMCHENKO, Yurii *et al.* Calcium Alginate/Laponite Nanocomposite Hydrogels: Synthesis, Swelling, and Sorption Properties. **Coatings**, v. 14, n. 12, p. 1519, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings14121519>

SHIVAKUMARA L R, Dr; DEMAPPA, Thippaiah. Synthesis and Swelling Behavior of Sodium Alginate/Poly(vinyl alcohol) Hydrogels. **Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 16, p. 252–260, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4274/tjps.galenos.2018.92408>

TARIQ, Zaryab *et al.* Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding. 18 ago. 2023. <https://doi.org/10.1039/D3RA03472K>

TOMADONI, B. *et al.* Macroporous alginate-based hydrogels to control soil substrate moisture: Effect on lettuce plants under drought stress. **European Polymer Journal**, v. 137, p. 109953, ago. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109953>

VAN DIJK, Michiel *et al.* A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. **Nature Food**, v. 2, n. 7, p. 494–501, jul. 2021. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>

ZÜGE, Gabriele. Desenvolvimento de hidrogéis nanocompósitos baseados em goma xantana usando água ruça como reticulante e óxido de grafeno para aplicações em soluções agrícolas. [no prelo]. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, RS.

5 CONCLUSÃO

Através do estudo, foi possível sintetizar hidrogéis biopoliméricos por reticulação química utilizando o método de *casting* e reticulação iônica por gotejamento em solução de cloreto de cálcio, com posterior incorporação de fertilizante. As análises de intumescimento evidenciaram diferenças estruturais entre as formulações, o hidrogel iônico apresentou expansão moderada, atingindo $212 \pm 9,97$ %, enquanto o hidrogel quimicamente reticulado alcançou $1106,10 \pm 7,50$ %. Esses valores evidenciam diferenças entre o tipo de reticulação, propriedades de absorção e capacidade de retenção hídrica das matrizes.

Nos ensaios de liberação sustentada, ambos os sistemas apresentaram perfis graduais de liberação do fertilizante quando em contato com água. Entretanto, observaram-se comportamentos distintos, a formulação quimicamente reticulada exibiu uma etapa inicial mais lenta de liberação, além disso o sistema aproximou-se do equilíbrio por volta de 1500 min, momento em que a concentração na solução atingiu um patamar próximo de 80%, enquanto a formulação iônica apresentou maior liberação inicial, porém alcançando maior estabilidade de aproximadamente 85 % em 1000 min.

A aplicação *in vivo*, utilizando sementes de alface, indicou que o hidrogel iônico favoreceu de forma mais eficiente o desenvolvimento inicial das mudas. Por outro lado, a formulação quimicamente reticulada apresentou certa interferência no crescimento, resultando em um desenvolvimento menos expressivo.

De modo geral, os resultados confirmam que os hidrogéis desenvolvidos possuem potencial para uso agrícola, oferecendo capacidade de retenção de água, liberação gradual de nutrientes e possibilidade de adaptação conforme a demanda da cultura. As evidências obtidas reforçam a viabilidade desses materiais como alternativas sustentáveis para o manejo hídrico e nutricional do solo, alinhadas às demandas crescentes do setor agrícola e às estratégias globais de mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar o intumescimento do hidrogel (com e sem NPK) em soluções com diferentes valores de pH, avaliando como essas condições influenciam sua capacidade de absorção;
- Realizar análises de FTIR (Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier) para identificar grupos funcionais e confirmar as interações químicas resultantes da reticulação;
- Aplicar microscopia eletrônica de varredura (MEV) para caracterizar a morfologia e a estrutura interna dos hidrogéis, permitindo observar porosidade, integridade da rede polimérica e eventuais alterações decorrentes da reticulação;
- Aprimorar a avaliação da liberação sustentada utilizando técnicas espectroscópicas que permitam identificar e quantificar os nutrientes liberados;
- Ampliar os testes *in vivo*, estendendo o período de avaliação e considerando diferentes condições de cultivo.

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, Jyoti *et al.* The realm of biopolymers and their usage: an overview. **J Environ Treat Tech**, v. 8, n. 2, p. 1005-1016, 2020. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/68026486/22TwentyTwoPaper.pdf>

AKBAR, Moazzama *et al.* Chapter 1 - Sodium alginate: an overview. *In*: AHMAD, Awais *et al.* (Orgs.). **Sodium Alginate-Based Nanomaterials for Wastewater Treatment**. Micro and Nano Technologies. [S.l.]: Elsevier, 2023. p. 1–17. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823551-5.00012-4>

ALCAMO, Joseph. Water quality and its interlinkages with the Sustainable Development Goals. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, Environmental Change Assessment. v. 36, p. 126–140, 1 fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.11.005>

ALEMÁN, J. V. *et al.* Definitions of terms relating to the structure and processing of sols, gels, networks, and inorganic-organic hybrid materials (IUPAC Recommendations 2007). **Pure and Applied Chemistry**, v. 79, n. 10, p. 1801-1829, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1351/pac200779101801>

ALI, Akbar; AHMED, Shakeel. Recent Advances in Edible Polymer Based Hydrogels as a Sustainable Alternative to Conventional Polymers. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 27, p. 6940–6967, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01052>

ALIPAL, J. *et al.* A review of gelatin: Properties, sources, process, applications, and commercialisation. **Materials Today: Proceedings**, v. 42, p. 240-250, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.922>

ALVAREZ-LORENZO, Carmen *et al.* Crosslinked ionic polysaccharides for stimuli-sensitive drug delivery. **Advanced Drug Delivery Reviews**, Polysaccharide-based systems in drug and gene delivery. v. 65, n. 9, p. 1148–1171, 1 ago. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2013.04.016>

AMIN, Faiqa; JILANI, Muhammad Idrees. Environmental, Microbiological and Chemical Implications of Fertilizers use in soils: A review. **International Journal of Chemical and Biochemical Sciences**, 2024. Disponível em: <https://www.iscientific.org/wp-content/uploads/2024/02/6-IJCBS-24-25-18-6.pdf>

ANJALI, Sudha *et al.* Ferulic acid incorporated anti-microbial self cross-linking hydrogel: A promising system for moderately exudating wounds. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 73, p. 103446, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103446>

AOUADA, Fauze Ahmad; DE MOURA, Márcia Regina; MATTOSO, Luiz Henrique Capparelli. Biodegradable hydrogel as delivery vehicle for the controlled release of pesticide. **Pesticides-formulations, effects, fate**, v. 808, 2011.

ARAF, Esraa G. *et al.* Eco-friendly and biodegradable sodium alginate/quaternized chitosan hydrogel for controlled release of urea and its antimicrobial activity. **Carbohydrate Polymers**, v. 291, p. 119555, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119555>

AVILA, Luisa Bataglin *et al.* Promising New Material for Food Packaging: An Active and Intelligent Carrageenan Film with Natural Jaboticaba Additive. **Foods**, v. 11, n. 6, p. 792, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods11060792>

AZEEM, Muhammad Khalid *et al.* Eco-friendly three-dimensional hydrogels for sustainable agricultural applications: Current and future scenarios. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 34, n. 9, p. 3046-3062, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pat.6122>

BAI, Zhongxiang *et al.* High strength and bioactivity polyvinyl alcohol/collagen composite hydrogel with tannic acid as cross-linker. **Polymer Engineering & Science**, v. 61, n. 1, p. 278-287, 2021. <https://doi.org/10.1002/pen.25574>

BALDWIN, Andrew; BOOTH, Brian W. Biomedical applications of tannic acid. **Journal of Biomaterials Applications**, v. 36, n. 8, p. 1503-1523, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/08853282211058099>

BECKIE, Hugh J.; ASHWORTH, Michael B.; FLOWER, Ken C. Herbicide resistance management: Recent developments and trends. **Plants**, v. 8, n. 6, p. 161, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants8060161>

BEKIN, Seda *et al.* Synthesis, characterization and bending behavior of electroresponsive sodium alginate/poly(acrylic acid) interpenetrating network films under an electric field stimulus. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 202, p. 878–892, 31 out. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.06.051>

BUCAK, Celile Demirbilek. Porous alginate hydrogel beads cross-linked with citric acid containing tannic acid: structural analysis, antimicrobial properties and release behavior. **Cellulose**, v. 30, n. 2, p. 1117-1132, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04947-2>

CHAVEZ-GRANADOS, Patricia Alejandra *et al.* Green Synthesis of Silver Nanoparticles with Roasted Green Tea: Applications in Alginate–Gelatin Hydrogels for Bone Regeneration. **Gels**, v. 10, n. 11, p. 706, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/gels10110706>

COHEN, Noy; DU, Cong; WU, Zi Liang. Understanding the dissociation of hydrogen bond based cross-links in hydrogels due to hydration and mechanical forces. **Macromolecules**, v. 54, n. 24, p. 11316-11325, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c01927>

DA SILVA, Carina Maiara *et al.* The efficient role of sodium alginate-based biodegradable dressings for skin wound healing application: a systematic review. **Journal of Biomaterials Science. Polymer Edition**, v. 35, n. 3, p. 397–414, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09205063.2023.2289247>

DAS, Subhraseema; DALEI, Ganeswar. In situ forming dialdehyde xanthan gum-gelatin Schiff-base hydrogels as potent controlled release fertilizers. **Science of The Total Environment**, v. 875, p. 162660, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162660>

DEMITRI, Christian *et al.* Novel superabsorbent cellulose-based hydrogels crosslinked with citric acid. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 110, n. 4, p. 2453-2460, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.28660>

EL-NAHHAL, Yasser *et al.* Reduction of photodegradation and volatilization of herbicides in organo-clay formulations. **Applied Clay Science**, v. 14, n. 1-3, p. 105-119, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(98\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(98)00053-2)

FAO. **World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>.

FEYISSA, Zerihun *et al.* Development of double crosslinked sodium alginate/chitosan based hydrogels for controlled release of metronidazole and its antibacterial activity. **Heliyon**, v. 9, n. 9, p. e20144, 1 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20144>

FLÓREZ, María; CAZÓN, Patricia; VÁZQUEZ, Manuel. Selected biopolymers' processing and their applications: a review. **Polymers**, v. 15, n. 3, p. 641, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15030641>

GHAREKHANI, Hamed *et al.* Superabsorbent hydrogel made of NaAlg-g-poly (AA-co-AAm) and rice husk ash: Synthesis, characterization, and swelling kinetic studies. **Carbohydrate polymers**, v. 168, p. 1-13, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.047>

GHORPADE, Vishwajeet Sampatrao. Preparation of hydrogels based on natural polymers via chemical reaction and cross-linking. In: **Hydrogels based on natural polymers**. Elsevier, 2020. p. 91-118. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816421-1.00004-5>

GUPTA, Rani Dinesh *et al.* Gallic Acid: A Versatile Molecule with Promising Pharmacological Effect. **International Journal of Pharmacognosy and Life Science**, v. 2, n. 1, p. 49-56, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33545/27072827.2021.v2.i1a.27>

GUSTAV, Nils; PALMQVIST, Martin. **Nanoparticles: Case studies of their synthesis, properties and biological interaction**. Department of Molecular Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, 2017.

HELMİYATI; APRILLIZA, M. Characterization and properties of sodium alginate from brown algae used as an ecofriendly superabsorbent. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 188, n. 1, p. 012019, abr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/188/1/012019>

ILYAS, R. A. *et al.* Polylactic acid (PLA) biocomposite: Processing, additive manufacturing and advanced applications. **Polymers**, v. 13, n. 8, p. 1326, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13081326>

IRFAN, Sayed Ameenuddin *et al.* A review of mathematical modeling and simulation of controlled-release fertilizers. **Journal of Controlled Release**, v. 271, p. 45-54, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.12.017>

JABRAIL, Fawzi Habeeb; MUTLAQ, Maysam Salih; AL-OJAR, Roua'a Kassim. Studies on agrochemical controlled release behavior of copolymer hydrogel with PVA blends of natural polymers and their water-retention capabilities in agricultural soil. **Polymers**, v. 15, n. 17, p. 3545, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15173545>

JHA, Abhishek *et al.* Chapter 13 - Polysaccharide-based responsive hydrogels for skin regeneration. In: **Polysaccharides-Based Hydrogels**. Elsevier, 2024. p. 405-428. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99341-8.00013-2>

JIANG, Yuan *et al.* Gallic acid: A potential anti-cancer agent. **Chinese journal of integrative medicine**, v. 28, n. 7, p. 661-671, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11655-021-3345-2>

JÓŹWIAK, Tomasz *et al.* Effect of ionic and covalent crosslinking agents on properties of chitosan beads and sorption effectiveness of Reactive Black 5 dye. **Reactive and Functional Polymers**, v. 114, p. 58-74, 1 maio 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2017.03.007>

JURIĆ, Slaven *et al.* Physicochemical properties and release characteristics of calcium alginate microspheres loaded with *Trichoderma viride* spores. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 11, p. 2534-2548, 1 nov. 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62634-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62634-1)

KAUR, Prabhpreet *et al.* Hydrogels in agriculture: Prospects and challenges. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 31, n. 9, p. 3701-3718, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02859-1>

KENAWY, El-Refaie *et al.* Superabsorbent composites based on rice husk for agricultural applications: Swelling behavior, biodegradability in soil and drought alleviation. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 25, n. 6, p. 101254, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101254>

KIKUCHI, Takeshi *et al.* Promotion of bone regeneration by CCN2 incorporated into gelatin hydrogel. **Tissue Engineering Part A**, v. 14, n. 6, p. 1089-1098, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1089/ten.tea.2007.0167>

KIMURA, Atsushi *et al.* Application of radiation crosslinking technique to development of gelatin scaffold for tissue engineering. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 180, p. 109287, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109287>

KREMER, Robert J. Environmental implications of herbicide resistance: soil biology and ecology. **Weed science**, v. 62, n. 2, p. 415-426, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WS-D-13-00114.1>

KRISHNAMOORTHY, Ganesan et al. Experimental and theoretical studies on Gallic acid assisted EDC/NHS initiated crosslinked collagen scaffolds. **Materials Science and Engineering: C**, v. 43, p. 164-171, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.07.003>

KULKARNI, Mangesh M. *et al.* A temporal gene delivery system based on fibrin microspheres. **Molecular Pharmaceutics**, v. 8, n. 2, p. 439-446, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/mp100295z>

LADEIRA, Natália M. Borges. Preparação e caracterização de hidroogéis à base de quitosana com potenciais aplicações na agricultura. 2020. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/33471>

LAFTAH, Waham Ashaier; HASHIM, Shahrir; IBRAHIM, Akos N. Polymer hydrogels: A review. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 50, n. 14, p. 1475-1486, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03602559.2011.593082>

LEE, Paul *et al.* Translating controlled release systems from biomedicine to agriculture. **Frontiers in Biomaterials Science**, v. 1, p. 1011877, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fbiom.2022.1011877>

LEITE, M. A. de A.; MASSRUHA, S. M. F. S.; CORAL, K. J. **Agricultura digital, inovação e aplicações.** [S.l.]: In: SILVA, F. C. da; FREIRE, F. J. (ed.). Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar: manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corretivos e fertilizantes. Brasília, DF: Embrapa; Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2024. cap. 2, p. 39-60., 2024. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1166995>

LIMA, Tiago Antônio de. **Aplicação de nanopartículas de prata e titânio na melhoria das propriedades de filmes de alginato de sódio para uso em curativos.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp). Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/154388>

LIU, Yan *et al.* Environmentally friendly hydrogel: A review of classification, preparation and application in agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 846, p. 157303, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157303>

LIU, Haofu *et al.* Lightweight pH-responsive chitosan hydrogel iron fertilizer: Efficient performance, controlled-release, and tomato application. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 5, p. 113428, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113428>

LU, Yanan *et al.* Application of gelatin in food packaging: A review. **Polymers**, v. 14, n. 3, p. 436, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14030436>

MACEDO, Osmir Fabiano Lopes de. **Síntese, caracterização e avaliação de hidrogéis superabsorventes copolimerizados empregados na liberação lenta de fertilizantes**. 2022. 102 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2022. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/Ir01405a/15677>

MACIEL, Leandro Moreira; DE TUNES, Lilian Vanussa Madruga. A importância dos fertilizantes para a agricultura The importance of fertilizers for agriculture. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 58647-58658, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n6-319>

MAITI, Sabyasachi; MAJI, Biswajit; YADAV, Harsh. Progress on green crosslinking of polysaccharide hydrogels for drug delivery and tissue engineering applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 326, p. 121584, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121584>

MAITRA, Jaya; SHUKLA, Vivek Kumar. Cross-linking in Hydrogels-A Review. **American Journal of Polymer Science**, v. 4, n. 2, p. 25-31, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20140402.01>

MANDAL, Manas *et al.* A Review on Sustainable Slow-Release N, P, K Fertilizer Hydrogels for Smart Agriculture. **ChemPlusChem**, v. 90, n. 3, p. e202400643, mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cplu.202400643>

MANSOURI, Houssameddine *et al.* Advances in Controlled Release Fertilizers: Cost-Effective Coating Techniques and Smart Stimuli-Responsive Hydrogels. **Advanced Sustainable Systems**, v. 7, n. 9, p. 2300149, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adsu.202300149>

MANTHA, Somasundar *et al.* Smart hydrogels in tissue engineering and regenerative medicine. **Materials**, v. 12, n. 20, p. 3323, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12203323>

MIKULA, Katarzyna *et al.* Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture—A review. **Science of the Total Environment**, v. 712, p. 136365, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136365>

MIRANDA, E. E. Potência agrícola e ambiental: áreas cultivadas no Brasil e no mundo. **Agroanalysis**, São Paulo, v. 38, n. 2, p. 25-27, fev. 2018. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1089331>

MOGHADDAM, Seyed Yasaman Z. *et al.* Tannic acid as a green cross-linker for biomaterial applications. **Mini Reviews in Medicinal Chemistry**, v. 23, n. 13, p. 1320-1340, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.2174/1389557522666220622112959>

MOHAMADY GHOBASHY, Mohamed. Chapter 12 - The application of natural polymer-based hydrogels for agriculture. *In*: CHEN, Yu (Org.). **Hydrogels Based on Natural Polymers**. Elsevier, 2020. p. 329-356. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816421-1.00013-6>

MONTEIRO NETO, João Luiz M. N. *et al.* Hydrogels in Brazilian agriculture. **Rev. AGRO@MBIENTE ON-LINE**, v. 11, p. 347, 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1139917>

MORADALI M. FATA *et al.* Alginate Polymerization and Modification Are Linked in *Pseudomonas aeruginosa*. **mBio**, v. 6, n. 3, p. 10.1128/mbio.00453-15, 12 maio 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/mBio.00453-15>

MOREIRA, Virnei Silva *et al.* Impacts of climate change on water fluxes and soybean growth in southern Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 54, p. e20228398, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230014>

MUSHTAQ, Farwa *et al.* Preparation, properties, and applications of gelatin-based hydrogels (GHs) in the environmental, technological, and biomedical sectors. **International journal of biological macromolecules**, v. 218, p. 601-633, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.168>

NAM, Jihye *et al.* A colorimetric hydrogel biosensor for rapid detection of nitrite ions. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 270, p. 112-118, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.04.171>

NANDA, Sonil *et al.* Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 20, n. 1, p. 379-395, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/S10311-021-01334-4>

NARJARY, Bhaskar *et al.* Significance of hydrogel. **Indian farming**, v. 62, n. 10, p. 15-17, 2013. Disponível em: <https://epubs.icar.org.in/index.php/IndFarm/article/download/51477/21788/126331>

NASUTION, Halimatuddahlia *et al.* Hydrogel and effects of crosslinking agent on cellulose-based hydrogels: A review. **Gels**, v. 8, n. 9, p. 568, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/gels8090568>

NAVROSKI, Marcio Carlos *et al.* Uso de hidrogel possibilita redução da irrigação e melhora o crescimento inicial de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Scientia Forestalis**. Piracicaba. Vol. 43, n. 106 (jun. 2015), p. 467-476, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/265774>

NDLOVU, Sindi P. *et al.* Gelatin-based hybrid scaffolds: promising wound dressings. **Polymers**, v. 13, n. 17, p. 2959, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13172959>

NEGM, Nabel A. *et al.* Advancement on modification of chitosan biopolymer and its potential applications. **International journal of biological macromolecules**, v. 152, p. 681-702, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.196>

NÖRNBERG, Andressa B. *et al.* Alginate-cellulose biopolymeric beads as efficient vehicles for encapsulation and slow-release of herbicide. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 583, p. 123970, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123970>

NORSWORTHY, Jason K. *et al.* Reducing the risks of herbicide resistance: best management practices and recommendations. **Weed science**, v. 60, n. SP1, p. 31-62, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WS-D-11-00155.1>

NOTODIHARDJO, Priscilla Valentin *et al.* Gelatin hydrogel impregnated with platelet-rich plasma releasate promotes angiogenesis and wound healing in murine model. **Journal of Artificial Organs**, v. 18, p. 64-71, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10047-014-0795-8>

NWACHUKWU, C. S. Green agriculture and food security, a review. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2023. p. 012005. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1178/1/012005>

ONU, PNUMA. Transformando nosso mundo: A agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. **Ambientalmente Sustentável**, v. 25, n. 1, p. 171-190, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.17979/ams.2018.25.1.4655>

PAIVA, Mayara T. P. *et al.* Crosslinking Methods in Polysaccharide-Based Hydrogels for Drug Delivery Systems. **Biomedical Materials & Devices**, v. 2, n. 1, p. 288–306, 1 mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44174-023-00118-4>

PARHI, Rabinarayan. Cross-linked hydrogel for pharmaceutical applications: a review. **Advanced pharmaceutical bulletin**, v. 7, n. 4, p. 515-530, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.15171/apb.2017.064>

PAULINO, Larah Gondim Santos. **Membranas bicamadas à base de quitosana e alginato de sódio como potencial tratamento em feridas cutâneas**. 2022. 85f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/9233>

PEDROSO, Paula da Cruz. **Produção de curativo biopolimérico bicamada composto de gelatina e eletrofiado com poliácido láctico**. 2023. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/9642>

PEREZ, Jonas J.; FRANCOIS, Nora J. Chitosan-starch beads prepared by ionotropic gelation as potential matrices for controlled release of fertilizers. **Carbohydrate Polymers**, v. 148, p. 134–142, 5 set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.054>

PIAO, Yun *et al.* Biomedical applications of gelatin methacryloyl hydrogels. **Engineered Regeneration**, v. 2, p. 47-56, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2021.03.002>

PNC (2016). Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 1: estratégia geral: portaria MMA nº 150 de 10 de maio de 2016 / Ministério do Meio Ambiente. Brasília: MMA, 2016. 2 v. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao.html>

RAMLI, Ros Azlinawati. Slow release fertilizer hydrogels: a review. **Polymer Chemistry**, v. 10, n. 45, p. 6073-6090, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C9PY01036J>

RATHER, Jahangir A. *et al.* A comprehensive review on gelatin: Understanding impact of the sources, extraction methods, and modifications on potential packaging applications. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 34, p. 100945, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100945>

RAZA, Muhammad Asim; JEONG, Jin-Oh; PARK, Sang Hyun. State-of-the-art irradiation technology for polymeric hydrogel fabrication and application in drug release system. **Frontiers in Materials**, v. 8, p. 769436, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.769436>

RODRIGUES, Yasmin Pinto. **Sensor colorimétrico como indicador de alteração de pH em carne suína**. Orientadora: Gabriela Silveira da Rosa. 2023. 68p. Alegre. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegre, Alegre, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/8732>

SABADINI, Rodrigo C. *et al.* Eco-friendly superabsorbent hydrogels based on starch, gellan gum, citric acid, and nanoclays for soil humidity control. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 139, n. 41, p. e52998, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.52998>

SADEGHI, Meisam *et al.* Comparison of using formaldehyde and carboxy methyl chitosan in preparation of Fe₃O₄ superparamagnetic nanoparticles-chitosan hydrogel network: Sorption behavior toward bovine serum albumin. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 102, p. 119-128, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.03.005>

SAFITRI, Rizka; PURWANTI, Tutiek; SOERATRI, Widji. Effect of CaCl₂ Crosslink Solution Concentration on the Characteristics of Gelatin Alginate Microspheres. **Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology**, 25 abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.37506/ijfmt.v14i2.3216>

SAHOO, Deepti; BISWAL, Trtinath. Alginate and its application to tissue engineering. **SN Applied Sciences**, v. 3, 1 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04096-w>

SAID, Nurul Saadah; OLAWUYI, Ibukunoluwa Fola; LEE, Won Young. Pectin Hydrogels: Gel-Forming Behaviors, Mechanisms, and Food Applications. **Gels**, v. 9, n. 9, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/gels9090732>

SAINI, Ashok K.; MALVE, Sachin H. Impact of hydrogel on agriculture—a review. **Ecol Environ Conserv**, v. 29, p. S36-S47, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.53550/EEC.2023.v29i01s.007>

SANNINO, Alessandro; DEMITRI, Christian; MADAGHIELE, Marta. Biodegradable cellulose-based hydrogels: design and applications. **Materials**, v. 2, n. 2, p. 353-373, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma2020353>

SANTOS, Bruna Pires dos *et al.* Agricultura e Irrigação no Brasil no cenário das Mudanças Climáticas. **Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável**, v. 1, n. 2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/rtgs.v1i2.3158>

SAPUŁA, Paulina; BIALIK-WAŚ, Katarzyna; MALARZ, Katarzyna. Are natural compounds a promising alternative to synthetic cross-linking agents in the preparation of hydrogels?. **Pharmaceutics**, v. 15, n. 1, p. 253, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15010253>

SARICAY, Yunus *et al.* Protein cluster formation during enzymatic cross-linking of globular proteins. **Faraday Discussions**, v. 158, p. 51-63, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C2FD20033C>

SAVARIS, Daniela Langaro. **Hidrogéis de quitosana/PVA reticulados com glutaraldeído para adsorção de corantes**. 2021. 73 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2021. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/5687>

SHABANI, Sahreh; RABIEI, Zahra; AMINI-KHOEI, Hossein. Exploring the multifaceted neuroprotective actions of gallic acid: a review. **International Journal of Food Properties**, v. 23, n. 1, p. 736–752, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1753769>

SIMÕES, Bruno Matheus *et al.* Citric acid as crosslinking agent in starch/xanthan gum hydrogels produced by extrusion and thermopressing. **Lwt**, v. 125, p. 108950, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108950>

SINGH, Anoop; SINGH, Narinder; KAUR, Navneet. Design, Synthesis, and Antimicrobial Activity of Biodegradable Sodium Alginate/COF Polymeric Films for Smart Monitoring of Food Spoilage and Active Food Packaging. **ACS Food Science & Technology**, v. 4, n. 9, p. 2233–2243, 20 set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00565>

SIQUEIRA, Edmilson Clarindo de *et al.* Recent advances in the development of the physically crosslinked hydrogels and their biomedical applications. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 8, p. e18212843073–e18212843073, 1 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i8.43073>

SPITZER, Lea *et al.* Exploring marine-based compounds as cross-linkers to improve the biocompatibility and sustainability of chitosan-based hydrogels. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 8, p. 100541, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100541>

SUPARE, Karishma; MAHANWAR, Prakash. Starch-chitosan hydrogels for the controlled-release of herbicide in agricultural applications: A study on the effect of the concentration of raw materials and crosslinkers. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 30, n. 6, p. 2448-2461, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02379-4>

TANURE, Tarik Marques do Prado; DOMINGUES, Edson Paulo; MAGALHÃES, Aline Souza. Regional impacts of climate change on agricultural productivity: evidence on large-scale and family farming in Brazil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, p. e262515, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.262515>

TARIQ, Zaryab *et al.* Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding. **RSC advances**, v. 13, n. 35, p. 24731-24754, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D3RA03472K>

THANYACHAROEN, T. *et al.* Development of a gallic acid-loaded chitosan and polyvinyl alcohol hydrogel composite: Release characteristics and antioxidant activity. **International journal of biological macromolecules**, v. 107, p. 363-370, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.002>

THOLOZAN, Luana Vaz. **Produção e caracterização de curativo biopolimérico impregnado com carvão ativado e extrato natural de noz-pecã**. 2023. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/9267>

TOADER, Gabriela *et al.* Ionic Crosslinked Hydrogel Films for Immediate Decontamination of Chemical Warfare Agents. **Gels**, v. 10, n. 7, p. 428, jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/gels10070428>

UDAYAKUMAR, Gowthama Prabu *et al.* Ecofriendly biopolymers and composites: Preparation and their applications in water-treatment. **Biotechnology Advances**, v. 52, p. 107815, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107815>

VAN DER MERWE, Roelof du Toit; GOOSEN, Neill Jurgens; POTT, Robert William McClelland. Macroalgal-derived alginate soil amendments for water retention, nutrient release rate reduction, and soil pH control. **Gels**, v. 8, n. 9, p. 548, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/gels8090548>

VAN TRAN, Vinh; PARK, Duckshin; LEE, Young-Chul. Hydrogel applications for adsorption of contaminants in water and wastewater treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 24569-24599, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2605-y>

VEDOVELLO, Priscila *et al.* An Overview of Polymeric Hydrogel Applications for Sustainable Agriculture. **Agriculture**, v. 14, n. 6, p. 840, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14060840>

VINCEKOVIC, Marko *et al.* Novel Zinc/Silver Ions-Loaded Alginate/Chitosan Microparticles Antifungal Activity against *Botrytis cinerea*. **Polymers**, v. 15, n. 22, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15224359>

WANG, Hao; ZHAO, Weiwei. Application of hydrogel for energy storage and conversion. **Next Materials**, v. 1, n. 4, p. 100049, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nxmater.2023.100049>

YAN, Mingyan *et al.* Physicochemical properties of gelatin gels from walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) skin cross-linked by gallic acid and rutin. **Food Hydrocolloids**, v. 25, n. 5, p. 907-914, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.08.019>

YANG, Zhi; CHAIEB, Sahraoui; HEMAR, Yacine. Gelatin-based nanocomposites: a review. **Polymer Reviews**, v. 61, n. 4, p. 765-813, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15583724.2021.1897995>

YUAN, Weijie *et al.* Preparation and properties of a novel biodegradable composite hydrogel derived from gelatin/chitosan and polylactic acid as slow-release N fertilizer. **Polymers**, v. 15, n. 4, p. 997, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15040997>

ZAHRANI, Nourah A. AL; EL-SHISHTAWY, Reda M.; ASIRI, Abdullah M. Recent developments of gallic acid derivatives and their hybrids in medicinal chemistry: A review. **European journal of medicinal chemistry**, v. 204, p. 112609, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2020.112609>

ZHAO, Yuanyuan *et al.* Modification of gelatine with galla chinensis extract, a natural crosslinker. **International Journal of Food Properties**, v. 19, n. 4, p. 731-744, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1013633>

ZÜGE, Gabriele. Desenvolvimento de hidrogéis nanocompósitos baseados em goma xantana usando água ruça como reticulante e óxido de grafeno para aplicações em soluções agrícolas. [no prelo]. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, RS.

APÊNDICE A- RESUMO SIEPE

Hidrogéis de Gelatina: Potencial Aplicação em Soluções Agrícolas

Gomes, Marcelle Luiz; Miro, Eleonora Xavier; Avila, Luisa Bataglin; Rosa, Gabriela
Silveira

As mudanças climáticas têm ocasionado diversos impactos ambientais em escala global, afetando diretamente o setor agrícola, que desempenha papel essencial no desenvolvimento humano. São registrados inúmeros impactos diários que comprometem a disponibilidade de água, qualidade do solo e cultivares. Nesse contexto, os hidrogéis surgem como alternativa promissora devido à alta capacidade de retenção e liberação gradual de água, otimizando a necessidade de irrigação frequente, reduzindo os efeitos da erosão e da lixiviação do solo, além de possibilitar a incorporação de nutrientes para liberação controlada no cultivo. Assim, o presente estudo tem como objetivo o desenvolvimento de hidrogéis à base de gelatina reticulados com ácido gálico para aplicação em sistemas agrícolas. Foram preparadas seis formulações, variando-se o tipo de gelatina e a concentração de ácido gálico. As amostras foram identificadas como GAC (gelatina tipo A sem reticulante), GA1 (gelatina tipo A com 1 % m/m de ácido gálico em relação à gelatina), GA2 (gelatina tipo A com 2 % m/m), GBC (gelatina tipo B sem reticulante), GB2 (gelatina tipo B com 2 % m/m) e GB5 (gelatina tipo B com 5 % m/m). Essa nomenclatura foi adotada para facilitar a comparação, permitindo avaliar a influência desses dois fatores sobre as propriedades dos hidrogéis. Os dados foram analisados no software Statistica (v.14) por meio do teste t de *Student*, considerando nível de significância de 95 %. Todas as formulações foram preparadas pela dissolução de gelatina em água destilada, na concentração de 10 % (m/v). Após hidratação, as soluções foram aquecidas sob agitação e, em seguida, foi adicionado o ácido gálico em diferentes proporções em relação à massa de gelatina, seguido de nova agitação para favorecer o processo de reticulação. As soluções foram transferidas para recipientes acrílicos (25 mm de diâmetro), mantidas em repouso por 24 h à temperatura ambiente (± 25 °C), secas em estufa a 25 °C por 24 h e armazenadas em dessecador até a realização das análises. As formulações de hidrogéis apresentaram os seguintes valores de solubilidade: GAC $38,25 \pm 1,12^a$ %, GA1 $31,09 \pm 7,39^a$ %, GA2 $38,01 \pm 1,31^a$ %, GBC $34,40 \pm 0,37^a$ %, GB2 $38,96 \pm 3,20^a$ % e GB5 $45,23 \pm 0,72^a$ %. A análise estatística revelou que não houve diferença significativa entre as amostras ($p > 0,05$), indicando que a adição de ácido gálico, nas concentrações testadas, não foi suficiente para reduzir significativamente a fração solúvel dos hidrogéis em comparação às formulações controle, sem reticulante. No ensaio de

intumescimento, todas as formulações apresentaram rápida absorção de água nos primeiros 30 min. Após 24 h, as amostras com gelatina tipo A alcançaram os maiores índices: GAC $1073,20 \pm 22,82^a$ %, GA1 $1257 \pm 87,08^{a,b}$ % e GA2 $1186,57 \pm 31,99^{a,b}$ %, mantendo a integridade física e expansão homogênea. Por outro lado, as amostras com gelatina tipo B apresentaram menores valores: GBC $753,38 \pm 102,06^{b,c}$ %, GB2 $959,11 \pm 44,98^{a,c}$ % e GB5 $1106,31 \pm 7,5^a$ %, sendo observadas rupturas em GB2 e perda de coesão em GB5, indicando menor estabilidade estrutural. Esse comportamento pode estar associado à estrutura da gelatina tipo B, que forma redes mais densas e menos elásticas. Além disso, o aumento da reticulação intensifica as ligações entre o polímero e o agente reticulante, resultando em uma matriz mais compacta, com menor intumescimento e difusão de água, o que favorece a liberação controlada de nutrientes. As análises estatísticas de intumescimento mostraram que as formulações de gelatina tipo A (GAC, GA1 e GA2) não apresentaram diferenças significativas entre si, indicando comportamento semelhante. Já a gelatina tipo B controle (GBC) mostrou-se distinta, apresentando variações relevantes em comparação à maioria das demais formulações. Na gelatina tipo B, observou-se que GB2 apresentou contraste em relação a GA1 e GA2, enquanto GB5 diferenciou-se de GBC, mas manteve semelhança com as formulações de gelatina tipo A. Visualmente, todas as amostras apresentaram aparência translúcida inicialmente, com pequenas variações de cor associadas ao tipo de gelatina e concentração de ácido gálico. A formulação GA2 apresentou o melhor desempenho, combinando elevada capacidade de retenção de água, boa estabilidade estrutural e baixa solubilidade. De modo geral, os hidrogéis de gelatina tipo A apresentaram maior intumescimento, enquanto os de tipo B mostraram maior fragilidade estrutural. O aumento da reticulação favoreceu a formação de matrizes mais compactas, capazes de controlar a liberação de água e nutrientes. Assim, a gelatina tipo B com maior concentração de reticulante destaca-se para aplicação agrícola, pois a maior densidade de ligações reduz o intumescimento e promove liberação mais lenta. Esses resultados reforçam a importância da escolha do biopolímero e da concentração do reticulante no desenvolvimento de hidrogéis biodegradáveis e eficientes para mitigar a escassez hídrica na agricultura.

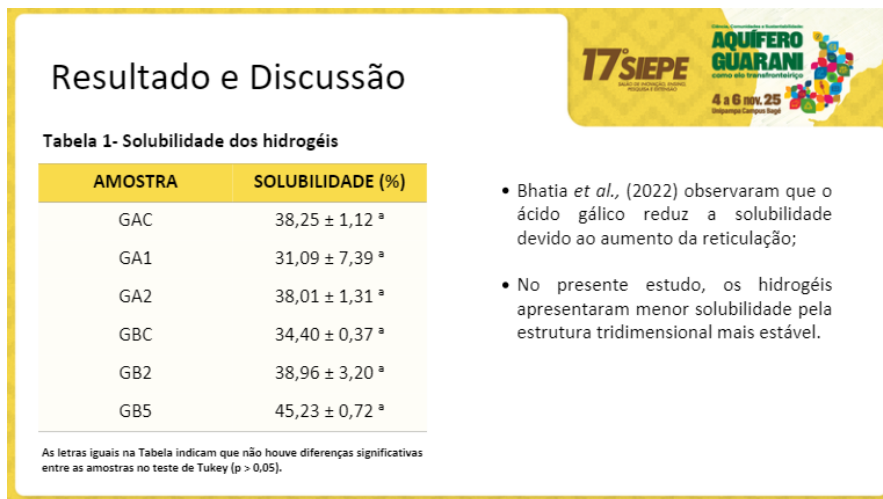
Palavras-chave: Hidrogel biopolimérico; Retenção Hídrica; Sustentabilidade.

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) pelo apoio e auxílio técnico, aos grupos de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Grupo de Pesquisa em Engenharia de Processos de Sistemas Particulados (GPEPSP), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado

do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

A Figura 1 mostra os resultados de solubilidade das amostras, apresentados durante a apresentação do 17º Salão Internacional de Ensino Pesquisa e Extensão.

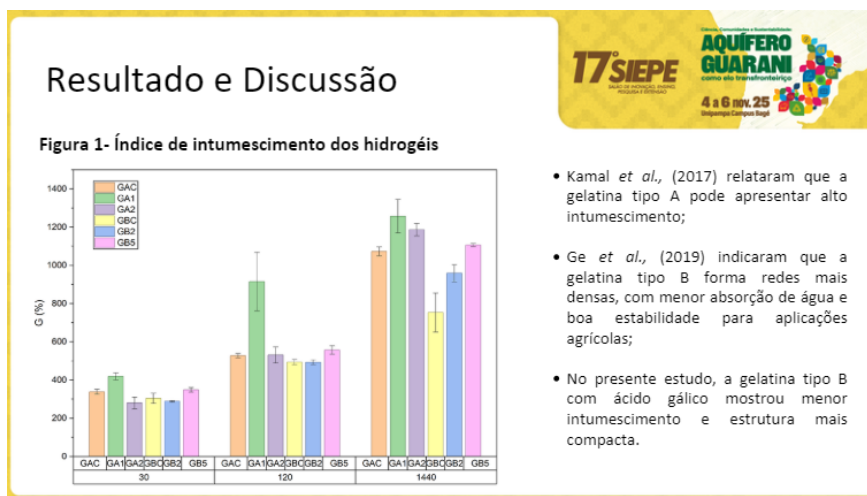
Figura 1- Resultados de solubilidade



Fonte: Autora (2025)

A Figura 2 demonstra os resultados de intumescimento das amostras, apresentados durante a apresentação do 17º Salão Internacional de Ensino Pesquisa e Extensão.

Figura 2- Resultados de intumescimento



Fonte: Autora (2025)