



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

SARA CADETE DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GELIFICAÇÃO DOS
POLISSACARÍDEOS EXTRAÍDOS DA *Arthrospira (Spirulina) platensis***

Recife

2025

SARA CADETE DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GELIFICAÇÃO DOS
POLISSACARÍDEOS EXTRAÍDOS DA *Arthrospira (Spirulina) platensis***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador (a): Raquel Pedrosa Bezerra

Coorientador (a): Marllyn Marques da Silva

Recife

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Lorena Teles – CRB-4 1774

S586c Silva, Sara Cadete da.
Caracterização e avaliação do potencial de gelificação dos polissacarídeos extraídos da *Arthrospira (Spirulina) platensis* / Sara Cadete da Silva. - Recife, 2025.
34 f.; il.

Orientador(a): Raquel Pedrosa Bezerra.
Co-orientador(a): Marlllyn Marques da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Bacharelado em Ciências Biológicas, Recife, BR-PE,
2025.

Inclui referências.

1. Alimentos - Biotecnologia. 2. Cianobactéria. 3. Spirulina. 4. Polissacarídeos 5. Carboidratos. I. Bezerra, Raquel Pedrosa, orient. II. Silva, Marlllyn Marques da, coorient. III. Título

CDD 574

SARA CADETE DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GELIFICAÇÃO DOS
POLISSACARÍDEOS EXTRAÍDOS DA *Arthrospira (Spirulina) platensis***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Aprovado em: 10/03/2025

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Raquel Pedrosa Bezerra (Orientadora)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Yanara Alessandra Santana Moura (Examinador Interno)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dra. Kethelyn Barbara Barbosa Cardoso (Examinador Externo)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder saúde, força e perseverança ao longo desta jornada. Sua presença foi fundamental nos momentos de dúvida e dificuldade, sempre trazendo conforto e direção.

Agradeço à minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Raquel Bezerra, por me acolher como sua aluna e confiar no desenvolvimento deste projeto. Admiro profundamente a paixão e clareza com que você compartilha conhecimento, e isso me inspira a buscar crescer sempre mais.

Agradeço também à minha co-orientadora, Dra. Marllyn Silva, e à Yanara Moura, pela dedicação e apoio no Laboratório de Avanços em Biotecnologia de Proteínas e Tecnologia de Bioativos, tornando essa experiência enriquecedora. Vocês sempre estiveram presentes, com paciência e uma disposição incrível para ensinar e esclarecer dúvidas. Aprendi muito com vocês, não só profissionalmente, mas também pessoalmente.

À minha mãe, meu eterno porto seguro, agradeço pelo amor, dedicação e esforço que sempre me proporcionou. Ao meu pai, que também sempre se esforçou para me ajudar, minha eterna gratidão. Tudo o que conquisto é em sua homenagem.

Agradeço à minha irmã, minha referência de força e caráter, e ao meu cunhado, que sempre me ofereceram apoio e incentivo. À minha sobrinha Helena, por sua luz e amor que transformaram minha vida, agradeço por ser minha fonte de motivação constante.

À minha avó paterna, Joanire Araújo, e à minha tia, Edna Cadete, por todo o apoio.

Aos meus ex-sogros, seu Carlos e dona Marlly, sou grata pelo carinho e apoio desde o início da minha trajetória acadêmica, sempre me acolhendo como filha.

À professora Anna Carolina por todo suporte durante uma perda tão dolorosa nessa reta final da monografia, e aos demais professores que se mostraram solícitos.

Em especial, gostaria de agradecer aos meus amigos Malaura, Kelvin, Evellyn, Renata, Lívia, Emanuel, Rafael, Saulo, Gabriel, Malu e Mel. Agradeço por tornarem meus dias na universidade mais leves e repletos de vivências. São momentos que levarei para sempre na memória. Cada um de vocês foram essenciais ao longo dessa caminhada. Sou profundamente grata por fazerem parte da minha história e por contribuírem de maneira tão significativa para a minha jornada. Vou sempre lembrar de todos com carinho, sobretudo de Kelvin. Que você descanse e encontre paz.

RESUMO

Arthrospira platensis, conhecida como *Spirulina* é uma cianobactéria filamentosa amplamente distribuída em diversos ambientes e valorizada por seu alto teor nutricional e metabólitos bioativos. Composta majoritariamente metabólitos bioativos, como proteínas, carboidratos, lipídeos e minerais, que podem ser influenciados por fatores ambientais. Os polissacarídeos se destacam por suas propriedades funcionais e bioativas, incluindo efeitos imunomoduladores, antioxidantes e antivirais. Embora pouco estudados em comparação com os de macroalgas, além de apresentarem potencial gelificante, sugerindo aplicações em encapsulação. Portanto, o objetivo deste trabalho é caracterizar bioquimicamente e avaliar o potencial gelificante dos polissacarídeos extraídos da *Arthrospira platensis*. O microrganismo *Arthrospira platensis* foi cultivada em meio de cultura Schlösser modificado, com adição de 0,2% de milhocina, em agitação e iluminação constantes. Ao final do cultivo a biomassa produzida foi concentrada e ressuspendida em etanol absoluto (1:8), aquecida a 70 °C por 4 horas para a extração dos polissacarídeos. Os polissacarídeos foram ressuspendidos em solução de Savage para remoção de proteínas e lipídios residuais e utilizados para determinação de carboidratos totais, carboidratos redutores, carboidratos não redutores, teor de sulfatação e gelificação em soluções de cátions monovalente (NaCl), bivalente (CaCl₂) e trivalente (FeCl₃) a 100 mM e pH 6. A extração de polissacarídeos de *Arthrospira platensis* com etanol como precipitante obteve um rendimento de 31%. Na concentração de 10 mg/mL, as dosagens de carboidratos totais, redutores, não redutores e teor de conteúdo sulfatado foram de 0,89 mg/mL, 0,28 mg/mL, 0,6 mg/mL e 1,4 mg/mL respectivamente. Testes de gelificação com cátions monovalente (NaCl), bivalente (CaCl₂) e trivalente (FeCl₃) a 100 mM e pH 6 não resultaram em formação de geis, embora a solução de polissacarídeo concentrado a 1% tenha mostrado resistência à diluição na presença de CaCl₂. A *Arthrospira platensis* apresentou bom rendimento na extração de polissacarídeos e alto teor de conteúdo sulfatado. Apesar de não terem formado geis com cátions, mostrou-se resistência à diluição com CaCl₂, indicando potencial funcional e necessidade de estudos adicionais para otimizar suas propriedades gelificantes.

Palavras-chave: Cianobactérias, alga azul-esverdeada, carboidratos, polissacarídeos sulfatados, gelificação.

ABSTRACT

Arthrospira platensis, known as Spirulina, is a filamentous cyanobacterium widely distributed in various environments and valued for its high nutritional content and bioactive metabolites. It is primarily composed of bioactive metabolites such as proteins, carbohydrates, lipids, and minerals, which can be influenced by environmental factors. The polysaccharides stand out due to their functional and bioactive properties, including immunomodulatory, antioxidant, and antiviral effects. Although less studied compared to those of macroalgae, they also exhibit gelling potential, suggesting applications in encapsulation. Therefore, the aim of this study is to biochemically characterize and assess the gelling potential of the polysaccharides extracted from *Arthrospira platensis*. The microorganism was cultivated in a modified Schlösser culture medium, with the addition of 0.2% milhocine, under constant agitation and illumination. At the end of the cultivation, the produced biomass was concentrated and resuspended in absolute ethanol (1:8), heated to 70 °C for 4 hours to extract the polysaccharides. The polysaccharides were then resuspended in Savage solution to remove residual proteins and lipids and used to determine total carbohydrates, reducing carbohydrates, non-reducing carbohydrates, sulfation content, and gelling in solutions of monovalent (NaCl), bivalent (CaCl₂), and trivalent (FeCl₃) cations at 100 mM and pH 6. The extraction of polysaccharides from *Arthrospira platensis* with ethanol as a precipitant yielded 31%. At a concentration of 10 mg/mL, the dosages of total carbohydrates, reducing carbohydrates, non-reducing carbohydrates, and sulfation content were 0.89 mg/mL, 0.28 mg/mL, 0.6 mg/mL, and 1.4 mg/mL, respectively. Gelling tests with monovalent (NaCl), bivalent (CaCl₂), and trivalent (FeCl₃) cations at 100 mM and pH 6 did not result in gel formation, although the 1% polysaccharide solution showed resistance to dilution in the presence of CaCl₂. *Arthrospira platensis* exhibited good yield in polysaccharide extraction and a high sulfation content. Although no gels were formed with cations, it showed resistance to dilution with CaCl₂, indicating functional potential and the need for further studies to optimize its gelling properties.

Keywords: Cyanobacteria, blue-green algae, carbohydrates, sulfated polysaccharides, gelation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** – *Arthrospira platensis* observada em um aumento de 400x no microscópio óptico de luz. 12
- Figura 2** – Quantificação de células para o cultivo. 19
- Diagrama 1** – Diagrama da extração dos polissacarídeos da *Arthrospira platensis* por etanol 20
- Figura 3** – Metodologia baseada no método fenol-sulfúrico para determinação de açúcares totais. 21
- Figura 4** – Metodologia baseada no método ADNS para determinação de açúcares redutores. 22
- Figura 5** – Metodologia baseada no método rodizonato de sódio para determinação de conteúdo sulfatado. 22
- Figura 6** – Polissacarídeos liofilizados oriundos de *Arthrospira platensis*. 24
- Figura 7** – Gotículas de polissacarídeos em 1% em soluções de cátions a 100 mM e pH 6. 25

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 9 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 10 |
| 2.1 <i>Arthrospira (Spirulina) platensis</i> | 10 |
| 2.1.1 <i>Características gerais</i> | 10 |
| 2.1.2 <i>Taxonomia</i> | 11 |
| 2.1.3 <i>Condições de cultivo</i> | 12 |
| 2.1.4 <i>Composição bioquímica</i> | 13 |
| 2.2 Polissacarídeos da <i>Arthrospira (Spirulina) platensis</i> e aplicações biotecnológicas.... | 14 |
| 2.3 Gelificação de polissacarídeos por indução de cátions..... | 16 |
| 3 OBJETIVOS..... | 17 |
| 3.1 Geral..... | 17 |
| 3.2 Específicos..... | 17 |
| 4 METODOLOGIA..... | 17 |
| 4.1 Cultivo do microrganismo..... | 17 |
| 4.2 Extração de polissacarídeos com etanol..... | 18 |
| 4.3 Caracterização bioquímica das frações de polissacarídeos de <i>Arthrospira platensis</i> .. | 19 |
| 4.3.1 <i>Dosagem de carboidratos totais</i> | 19 |
| 4.3.2 <i>Dosagem de açúcares redutores e não redutores</i> | 20 |
| 4.3.3 <i>Dosagem do teor de conteúdo sulfatados</i> | 21 |
| 4.4 Gelificação induzida por cátions..... | 22 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 22 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 26 |
| REFERÊNCIAS..... | 27 |

1 INTRODUÇÃO

Arthrospira platensis é uma cianobactéria filamentosa que habita uma ampla variedade de ambientes, incluindo solos, águas doces, salobras e marinhas (Cifferi, 1983), e se destaca pelo alto valor nutricional e pela produção de metabólitos bioativos (Shabana *et al.*, 2017). Esta cianobactéria apresenta uma composição rica e variável, contendo cerca de 60% de proteínas em biomassa seca, além de lipídeos (7,2%), carboidratos (10,3%), fibras brutas (8,5%) e minerais (6,9%) (Gentscheva *et al.*, 2023). Adicionalmente, também produz aminoácidos essenciais, ácidos graxos poli-insaturados, ácido γ -linolênico (GLA) e esteróis, além de ser rica em minerais (ferro, cálcio, magnésio) e vitaminas (A, K e do complexo B) e pigmentos como a ficocianina, que possui propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias (Gentscheva *et al.*, 2023; Shabana *et al.*, 2017).

Dentre os diversos metabólitos bioativos da *Arthrospira platensis*, os polissacarídeos se destacam por suas propriedades funcionais e potenciais aplicações na biotecnologia. Esses polissacarídeos são formados por monossacarídeos como glicose, ramnose, xilose, manose e galactose, com pesos moleculares variando de 6,21 kDa a 1016 kDa (Rajasekar *et al.*, 2019; Aydi *et al.*, 2022). Suas estruturas incluem heteropolissacarídeos e α -glucanos (Rajasekar *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019; Aydi *et al.*, 2022), que demonstram diversas atividades biológicas, como efeitos anticâncer (Uppin, Dharmesh & Sarada, 2022), imunomoduladores (Li *et al.*, 2021), hipolipidêmicos e hipoglicêmicos (Li *et al.*, 2021), antitrombóticos (Choi, Kim & Kim, 2015), antivirais (Rajasekar *et al.*, 2019), antioxidantes (Cao *et al.*, 2021) e na regulação da microbiota intestinal (Guo *et al.*, 2021).

Além dessas atividades biológicas, muitos polissacarídeos são amplamente estudados por suas propriedades físico-químicas, incluindo a capacidade de formar geis. Polissacarídeos de macroalgas, como alginato, ágar e carragenana, são utilizados como agentes gelificantes e modificadores de reologia em alimentos, apresentando aplicações médicas em cosméticos (Rajasekar *et al.*, 2019). Em comparação com macroalgas, os polissacarídeos de microalgas e cianobactérias têm sido menos estudados, com a maioria das pesquisas concentradas em poucas espécies, como *Porphyridium* (Chen *et al.*, 2020).

Nesse contexto, embora a capacidade de gelificação dos polissacarídeos da *Arthrospira platensis* ainda seja pouco explorada, especialmente no que diz respeito ao seu uso como matriz para encapsulação e liberação controlada de fármacos, a presença de componentes como ácidos urônicos sugere seu potencial para essa aplicação, característica

comum em polissacarídeos sulfatados (Rajasekar *et al.*, 2019). Dessa forma, este trabalho objetiva caracterizar bioquimicamente e avaliar o potencial gelificante dos polissacarídeos extraídos da *Arthrospira platensis*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Arthrospira (Spirulina) platensis*

2.1.1 *Características gerais*

A *Spirulina* é uma cianobactéria filamentosa, que apresenta uma cor verde-azulada, conhecida comumente como *Spirulina*, é amplamente reconhecida como uma cianobactéria filamentosa, apresentando uma cor verde-azulada. Suas características morfológicas são bastante distintas, sendo facilmente identificável devido à sua forma e estrutura. Segundo Tomaselli (1997), a *Spirulina* é composta por tricomonas cilíndricas multicelulares que se organizam em configurações espiraladas, o que contribui para sua fácil identificação e manipulação em estudos biológicos.

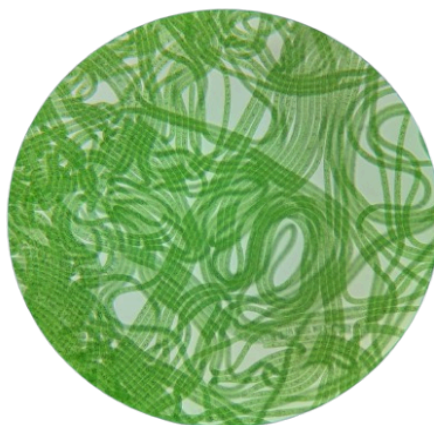
Por sua vez, os filamentos da cianobactéria *Arthrospira* é caracterizado pela ausência de ramificações e heterocistos, estruturas presentes em outras cianobactérias. Sua reprodução ocorre principalmente por fissão binária, resultando em descendentes geneticamente idênticos. Além disso, pode haver a fragmentação dos tricomas, um processo no qual partes do filamento se desprendem com a ajuda de necrídeos, células degeneradas que facilitam essa separação. Esses fragmentos, chamados de hormogônios, originam novos tricomas, inicialmente menores, imóveis e com morfologia distintas dos tricomas maduros (Ciferri & Tiboni, 1985). No entanto, em certos estágios do ciclo de vida, os hormogônios possuem mobilidade, movendo-se por deslizamento, essa mobilidade é uma característica fundamental para a adaptação e colonização de novos ambientes, especialmente em condições adversas (Rippka *et al.*, 1979).

A parede celular da cianobactéria *Arthrospira platensis* é composta principalmente por peptidoglicano e uma camada de polissacarídeos extracelulares, os quais desempenham um papel essencial na proteção e estruturação da célula, formando uma camada espessa e lisa ao redor dos tricomas espirais da cianobactéria, contendo altos níveis de proteínas e carboidratos, como galactose, xilose e glicose (Ahmed *et al.*, 2014).

Segundo Singh e Montgomery (2011), a *Spirulina*, como outras cianobactérias, exibe variações morfológicas em resposta a condições ambientais, como disponibilidade de luz e

nutrientes. Por exemplo, estudos de Whang e Zhao (2005) mostram que a linearização das células é uma resposta genética adaptativa a condições estressantes (**Fig. 1**), como alta intensidade luminosa. A forma linear da *Spirulina* pode ser mais vantajosa sob tais condições, permitindo uma melhor adaptação ao estresse ambiental. Essas respostas morfológicas são essenciais para a *Spirulina* manter sua eficiência e viabilidade em condições desafiadoras (Whang *et al.*, 1997; Jeeji Bai, 1985).

Figura 1 – *Arthrospira platensis* observada em um aumento de 400x no microscópio óptico de luz.



Fonte: Autor, 2025.

2.1.2 Taxonomia

A *Spirulina platensis* é uma cianobactéria filamentosa que pertence à família *Cyanophyceae* e à ordem *Oscillatoriales*. Tradicionalmente, foi classificada dentro do gênero *Spirulina*. O Bergey's Manual of Determinative Bacteriology fornece uma descrição detalhada dessa classificação, baseando-se em características morfológicas e estruturais das cianobactérias. Esta classificação reflete a posição taxonômica da *Spirulina* dentro dos grupos de cianobactérias, que são organismos procariontes fotossintetizantes. Embora *Spirulina platensis* tenha sido amplamente conhecida e utilizada sob esse nome, a classificação taxonômica da cianobactéria foi revista, resultando na renomeação para o gênero *Arthrospira*. Essa mudança foi baseada em diferenças morfológicas e genéticas que distinguiam *Spirulina* de outros grupos de cianobactérias (Pulz & Gross, 2004).

De acordo com Whang *et al.* (1997), as diferenças entre esses dois gêneros são fundamentadas em características morfológicas e genéticas distintas. Enquanto *Spirulina* é tipicamente caracterizada por suas células espiraladas e filamentosas, *Arthrospira* apresenta uma morfologia mais linear e segmentada. Essa linearização observada em *Arthrospira* é uma

adaptação a condições ambientais específicas, como altas intensidades de luz, que não afetam a *Spirulina* da mesma maneira. Essas adaptações morfológicas são cruciais para a sobrevivência e o desempenho das microalgas em seus respectivos habitats.

O Manual of Determinative Bacteriology também destaca diferenças importantes entre *Spirulina platensis* e *Arthrospira platensis*, incluindo características como o tipo de espiral, a estrutura da parede celular e as visões microscópicas dos diâmetros e filamentos das células. *Spirulina platensis*, isolada do Lago Texcoco pelos astecas no século XVI, é encontrada entre os eucariotos (Soni, Sudhakar & Rana, 2017; AlFadhly *et al.*, 2022; Hamed, 2016). A nomenclatura e a classificação de *Spirulina* e *Arthrospira* têm evoluído ao longo do tempo. A FAO afirmou que as espécies de *Arthrospira* são comumente conhecidas como *Spirulina* devido ao seu estudo e uso extensivo em diferentes contextos. A forma espiral característica dos tricomas é uma das principais razões pelas quais o gênero *Spirulina* inclui 15 espécies distintas. Embora o termo "espirulina" seja amplamente utilizado, a classificação científica correta pode variar com base em estudos taxonômicos e genéticos (Ahsan *et al.*, 2008; Heinsoo, 2014). Nesse sentido, a identificação e diferenciação dos gêneros são confirmadas por métodos avançados, como a microscopia eletrônica e a análise genética de 16S rRNA, esses métodos ajudam a elucidar as distinções morfológicas e genéticas entre os gêneros e a entender melhor suas adaptações e evolução ao longo do tempo (Nübel *et al.*, 2000).

2.1.3 Condições de cultivo

Arthrospira platensis prospera em ambientes ricos em minerais, com fontes de carbono (carbonatos e bicarbonatos), fósforo e nitrogênio (nitratos). Sua melhor taxa de crescimento ocorre em temperaturas entre 30 e 35 °C, com uma intensidade luminosa entre 20 e 30 kilolux (klx). Essa cianobactéria é alcalofílica, crescendo de forma eficiente em faixas de pH entre 8 e 11, e possui uma grande vantagem em ambientes salinos, suportando grandes concentrações de sais no ambiente, essas características a torna competitiva em relação a outros microrganismos, reduzindo a probabilidade de contaminação (Ciferri, 1983).

Um aspecto central do metabolismo de *Arthrospira* é sua capacidade de utilizar bicarbonato como principal fonte de carbono. Em pH alcalino, o equilíbrio químico favorece a formação de bicarbonato, que é absorvido por transporte ativo na célula, onde a anidrase carbônica converte o bicarbonato em dióxido de carbono. Esse CO₂ é, então, integrado ao ciclo de Calvin para a produção de carboidratos, proteínas e lipídeos (Kaplan & Reinhold, 1999). Mesmo em condições de baixa concentração de bicarbonato extracelular, *Arthrospira*

tem a capacidade de acumular este composto no meio intracelular e continuar seu metabolismo através do CO₂ (Cornet *et al.*, 1998). Cultivos realizados apenas com carbonatos demonstraram que a ausência de bicarbonato prejudica o crescimento e a produção de biomassa (Binaghi *et al.*, 2003).

Esse microrganismo também pode ser cultivado em diversos meios, principalmente em ambientes alcalinos e salinos. Seu cultivo em meios líquidos é viável, permitindo o aproveitamento de terras improdutivas e consumindo pouca água. A fotossíntese realizada por esta cianobactéria converte os nutrientes do meio em material celular e libera oxigênio (Ambrosi *et al.*, 2008; Derner *et al.*, 2006; Muliterno *et al.*, 2005; Costa *et al.*, 2003). O sucesso do cultivo de *Arthrospira* depende de uma série de fatores ambientais, como a intensidade luminosa, pH, temperatura, disponibilidade de nutrientes e densidade celular.

A composição metabólica pode ser modulada por fatores ambientais, como disponibilidade de nutrientes no meio, como a salinidade e presença de metais pesados, influenciando a proporção de macromoléculas (Zhou *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2021; Markou *et al.*, 2023). A limitação de fósforo, por exemplo, reduz o teor proteico, elevando os níveis de carboidratos e lipídeos (Markou, 2012), enquanto a variação na salinidade pode aumentar o conteúdo de carboidratos e alterar a composição de ácidos graxos (Markou *et al.*, 2023). Além disso, a exposição a metais como zinco pode modificar a proporção de ácidos graxos saturados e poliinsaturados e promover maior acumulação deste elemento na biomassa (Zhou *et al.*, 2018).

2.1.4 Composição bioquímica

A composição bioquímica da *Arthrospira platensis* pode variar significativamente conforme as condições ambientais de cultivo. Por exemplo, a exposição a altos níveis de salinidade pode resultar em maior acúmulo de carboidratos e menor digestibilidade proteica (Markou *et al.*, 2023). Da mesma forma, a limitação de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, pode afetar a produção de pigmentos e a qualidade nutricional da biomassa (Wu *et al.*, 2021).

A cianobactéria *Arthrospira platensis*, é amplamente utilizada na indústria alimentícia e farmacêutica devido à sua rica composição bioquímica. Estudos recentes demonstram que sua biomassa possui uma elevada concentração de macronutrientes, pigmentos bioativos e compostos antioxidantes, tornando-a um recurso valioso para

suplementação nutricional e aplicações terapêuticas (Ennaji *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2021; Gentscheva *et al.*, 2023; Jung *et al.*, 2022; Markou *et al.*, 2023).

Em especial, *Arthrospira platensis* é reconhecida pelo seu elevado teor proteico, correspondendo a aproximadamente 58,9% de sua biomassa seca (Ennaji *et al.*, 2021). As proteínas presentes contêm todos os aminoácidos essenciais, sendo altamente biodisponíveis. Além disso, a cianobactéria apresenta uma significativa quantidade de carboidratos, cujo teor pode ser modulado por condições de cultivo. Estudos demonstram que, em ambientes com deficiência de nitrogênio, a produção de carboidratos pode aumentar em até 247% (Wu *et al.*, 2021). Quanto aos lipídeos, a *Arthrospira platensis* possui cerca de 45,54% de gordura, sendo predominantemente composta por ácidos graxos poli-insaturados, fundamentais para a saúde cardiovascular (Ennaji *et al.*, 2021).

A presença de micronutrientes na *Arthrospira platensis* é outro fator que contribui para sua popularidade como suplemento alimentar. Estudos indicam que a cianobactéria é rica em vitaminas do complexo B, incluindo B2 (1,31 mg/kg) e B3 (30,8 mg/kg) (Ennaji *et al.*, 2021). Além disso, sua composição mineral é vasta, contendo ferro, cálcio, magnésio e zinco, fundamentais para diversas funções fisiológicas (Gentscheva *et al.*, 2023).

Os pigmentos bioativos da *A. platensis* desempenham um papel crucial em sua aplicação como alimento funcional. Estudos revelam que a cianobactéria contém clorofila a (26,06 mg/g), clorofila b (37,50 mg/g) e carotenoides (9,52 mg/g), os quais possuem propriedades antioxidantes e fotoprotetoras (Ennaji *et al.*, 2021). Além disso, a presença de ficobiliproteínas, como a C-ficocianina, é de particular interesse, pois esta representa até 60% das proteínas solúveis e está associada a efeitos antioxidantes, anti-inflamatórios e imunoestimulantes (Jung *et al.*, 2022).

2.2 Polissacarídeos da *Arthrospira (Spirulina) platensis* e aplicações biotecnológicas

Os polissacarídeos produzidos por cianobactérias e microalgas tendem a ser mais complexos do que aqueles encontrados em macroalgas, podendo conter entre 5 e 12 monossacarídeos distintos em sua composição (Delattre *et al.*, 2016; De Philippis *et al.*, 1998). Além disso, esses microrganismos frequentemente acumulam polissacarídeos na superfície da parede celular, liberando-os no meio de cultura ao longo do tempo (Delattre *et al.*, 2016).

Os polissacarídeos extraídos de *Arthrospira platensis* apresentam diversas atividades terapêuticas, incluindo efeitos imunomoduladores, hipolipidêmicos e hipoglicêmico, antitrombóticos, antivirais, antioxidantes, anticancerígenos e regulação da microbiota (Li *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021; Choi *et al.*, 2015; Rajasekar *et al.*, 2019; Cao *et al.*, 2021; Uppin *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2021). Suas propriedades biológicas estão diretamente relacionadas a fatores estruturais, como peso molecular, composição monossacarídica e grau de sulfatação (Chen *et al.*, 2020).

Estudos demonstram que esses compostos possuem relevante atividade imunomodulatória, promovendo o aumento da fagocitose por macrófagos, a estimulação da produção de óxido nítrico (NO) e a elevação da expressão do mRNA de IL-6, sugerindo um papel fundamental na ativação do sistema imune (Li *et al.*, 2021). Além disso, sua influência sobre o metabolismo lipídico e glicídico tem sido associada à redução da obesidade, hiperlipidemia e hiperglicemia, além de contribuir para a homeostase hepática e o equilíbrio da microbiota intestinal em modelos experimentais (Li *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2021).

A atividade anticancerígena desses polissacarídeos foi evidenciada em estudos com células de câncer gástrico, nos quais se observou a modulação da expressão de galectina-3 e a proteção do DNA celular. O grau de sulfatação dessas biomoléculas influencia diretamente sua eficácia antitumoral, uma vez que afeta a interação com alvos celulares específicos (Uppin *et al.*, 2022).

Além das propriedades imunomoduladoras e anticancerígenas, o espirulano, um polissacarídeo sulfatado extraído de *Spirulina platensis*, apresenta potentes efeitos anticoagulantes, inibindo a formação de coágulos de maneira comparável à heparina (Choi *et al.*, 2015). Sua ação antiviral também se destaca, sendo atribuída à presença de cálcio-espirulano, que impede a penetração de vírus em células hospedeiras. Esse mecanismo foi observado contra o HIV-1 e o vírus do herpes simplex (HSV-1) (Rajasekar *et al.*, 2019; Hayashi *et al.*, 1996).

Adicionalmente, essas biomoléculas exibem forte atividade antioxidante, reduzindo o estresse oxidativo em células infectadas pelo vírus da pseudorína e estimulando a expressão de enzimas antioxidantes (Cao *et al.*, 2021). Outro efeito relevante é sua capacidade de modular a microbiota intestinal, promovendo o crescimento de bactérias benéficas, o que contribui para a saúde metabólica e a redução da obesidade (Guo *et al.*, 2021).

2.3 Gelificação de polissacarídeos por indução de cátions

A gelificação induzida por cátions é um fenômeno amplamente explorado em polissacarídeos, resultando na formação de redes tridimensionais coesas. Esse processo ocorre quando cátions interagem com os grupos funcionais dos biopolímeros, promovendo ligações cruzadas que conferem estabilidade e propriedades mecânicas desejáveis aos geis. A influência do tipo de cátion e das condições do meio na formação dessas redes tem sido objeto de vários estudos científicos (Ikeda *et al.*, 2004). Os polissacarídeos contêm grupos carboxilato ($-\text{COO}^-$), hidroxila ($-\text{OH}$) e sulfato ($-\text{OSO}_3^-$), que interagem com cátions em solução, promovendo a formação de ligações iônicas e estruturais. Dependendo da natureza do cátion, a rede tridimensional formada pode apresentar diferentes graus de rigidez e estabilidade (Sedaghatzadeh *et al.*, 2019).

No caso do alginato, por exemplo, a gelificação ocorre por meio do modelo de "caixa de ovo", no qual átomos de cálcio (Ca^{2+}) formam ligações cruzadas entre cadeias adjacentes do polissacarídeo (Ikeda *et al.*, 2004). Para o gellan, a adição de Ca^{2+} ou K^+ promove a interação entre as duplas hélices do polissacarídeo, levando à formação de redes gélicas estruturadas (Rosebrock *et al.*, 2023). Cátions monovalentes, como Na^+ , conferem baixa estabilidade estrutural ao gel, pois suas interações iônicas são fracas. Já os cátions bivalentes, como Ca^{2+} e Mg^{2+} , formam redes mais resistentes devido às ligações cruzadas mais fortes. Cátions trivalentes, como Al^{3+} , podem promover estruturas altamente reticuladas, mas também aumentar a rigidez excessiva do gel, levando à precipitação do polissacarídeo (Hu & Pinder, 1974).

O pH do meio afeta a dissociação dos grupos funcionais dos polissacarídeos, influenciando a capacidade de interação com os cátions. Além disso, a concentração de cátions determina a extensão das ligações cruzadas; baixas concentrações levam a geis fracos, enquanto concentrações excessivas podem resultar em colapso estrutural e precipitação (Sedaghatzadeh *et al.*, 2019).

Os geis formados por polissacarídeos e cátions possuem aplicações diversas, incluindo a indústria de alimentos, onde são usados em geleias, pudins e sobremesas para conferir textura e estabilidade. Na indústria farmacêutica, são empregados em sistemas de liberação controlada de fármacos, aproveitando a capacidade de degradação controlada das redes poliméricas (Rosebrock *et al.*, 2023).

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Caracterizar bioquimicamente e avaliar o potencial gelificante dos polissacarídeos extraídos da *Arthrospira platensis*.

3.2 Específicos

- Realizar a caracterização bioquímica dos polissacarídeos produzidos pela *Arthrospira platensis*;
- Avaliar o potencial de gelificação dos polissacarídeos extraídos da *Arthrospira platensis* em diferentes soluções de cátions.

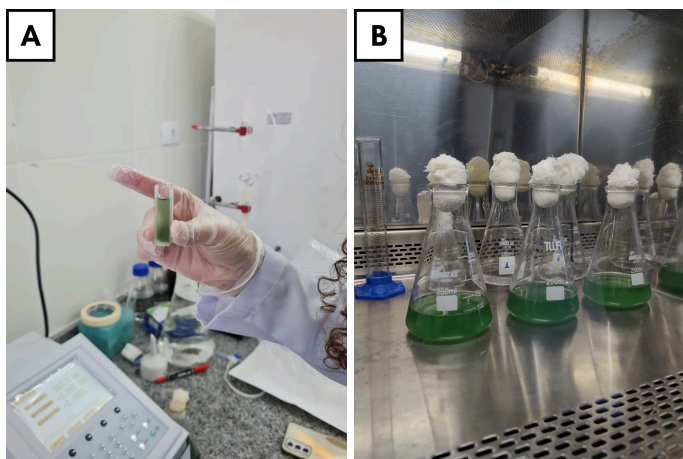
4 METODOLOGIA

4.1 Cultivo do microrganismo

Arthrospira (Spirulina) platensis (UTEX 1926), foi adquirida da Coleção de Culturas de Algas da Universidade do Texas, localizada em Austin, Texas, Estados Unidos. Para o cultivo, foi empregado um meio padrão baseado no protocolo de Schlösser (1982), sem adição de nitrato de sódio (NaNO_3) e a suplementado com 0,2% de milhocina, conforme descrito por Barros *et al.* (2020).

Os cultivos foram conduzidos em frascos erlenmeyers com concentração celular inicial de $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, e as culturas foram mantidas a uma temperatura de $30 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, com agitação orbital a uma velocidade de $75 \pm 5 \text{ rpm}$. Além disso, as culturas foram expostas a uma intensidade luminosa constante de $50 \pm 5 \text{ } \mu\text{mol f\^otons m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Figura 2 – Quantificação de células para o cultivo. **A.** Análise de quantificação de células no espectrofotômetro.
B. Processo de inoculação de células para início dos cultivos.



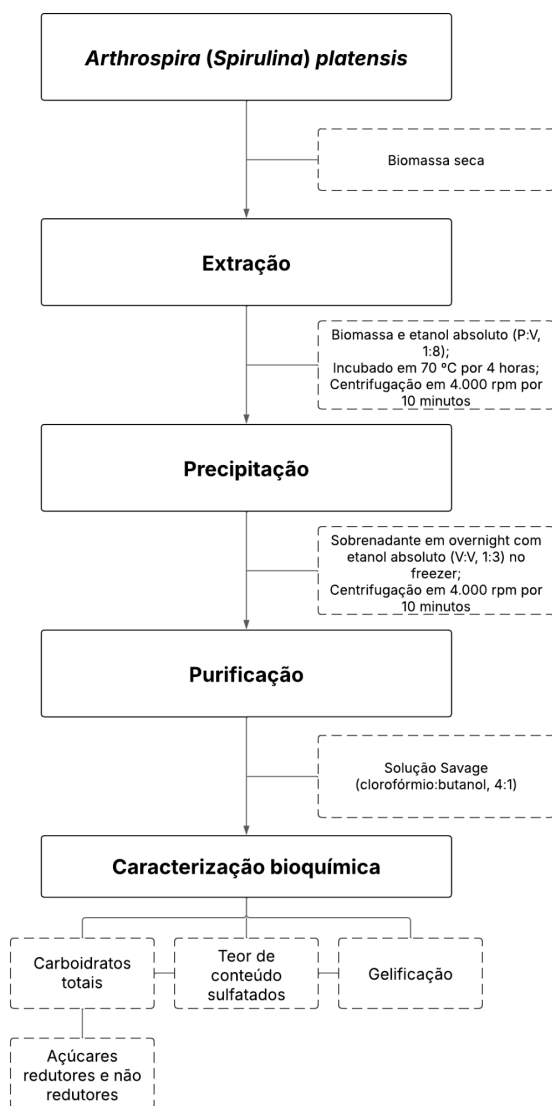
Fonte: Autor, 2024.

4.2 Extração de polissacarídeos com etanol

A extração dos polissacarídeos de *Arthrospira platensis* foi realizada de acordo com Grazzina *et al.*, (2016) modificado. O processo de extração dos polissacarídeos foi realizado a partir da biomassa liofilizada de *Arthrospira platensis*, que foi ressuspensa em etanol absoluto na proporção de 1:8 e aquecida a 70 °C por 4 horas. Após esse período, a solução foi centrifugada a 4.000 rpm por 10 minutos, sendo o sobrenadante coletado e mantido em overnight com etanol absoluto (1:3). Em seguida, a amostra foi novamente centrifugada a 4.000 rpm por 10 minutos, purificada com a solução de Savage (clorofórmio:butanol, 4:1) para remoção de resíduos proteicos e lipídicos e, finalmente, liofilizada. Os polissacarídeos liofilizados foram utilizados para a dosagem de carboidratos totais, redutores e não-redutores, teor de conteúdo sulfatado através de curvas padrões predeterminadas. O cálculo utilizado para obter a porcentagem do rendimento total da extração dos polissacarídeos foi calculado baseado no peso do polissacarídeo liofilizado (P_0) dividido pelo peso da biomassa seca da *Arthrospira platensis* (P).

$$P/P = \frac{P_0}{P} \times 100$$

Diagrama 1 – Diagrama da extração dos polissacarídeos da *Arthrospira platensis* por etanol.



Fonte: Autor, 2025.

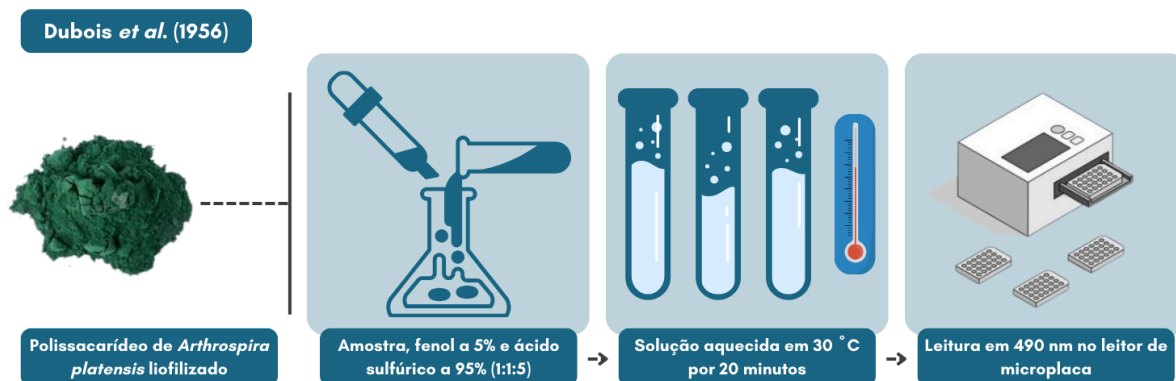
4.3 Caracterização bioquímica das frações de polissacarídeos de *Arthrospira platensis*

4.3.1 Dosagem de carboidratos totais

O método utilizado para determinar a concentração de carboidratos totais foi baseado no método fenol-sulfúrico, conforme descrito por Dubois *et al.*, (1956). Para realizar uma análise, uma amostra foi combinada com uma solução de fenol a 5% e uma solução de ácido sulfúrico a 95% na proporção de 1:1:5 (v/v/v). A mistura foi então aquecida em banho-maria a uma temperatura de 30 °C por um período de 20 minutos. A leitura da absorbância das amostras foi realizada em um comprimento de onda de 490 nm. Para determinar a

concentração de carboidratos na amostra, foi necessário construir uma curva padrão utilizando uma solução de glicose a 5 mg/mL, onde a leitura de absorção foi realizada em triplicata.

Figura 3 – Metodologia baseada no método fenol-sulfúrico para determinação de açúcares totais.

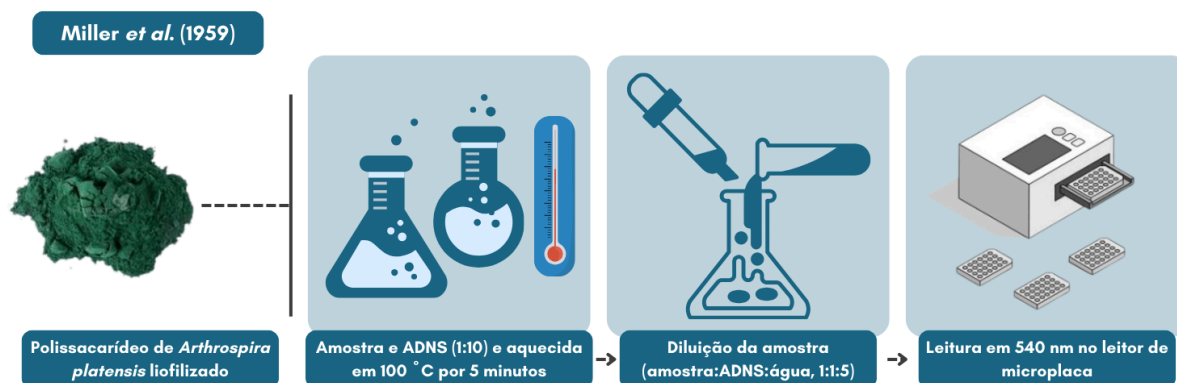


Fonte: Autor, 2025.

4.3.2 Dosagem de açúcares redutores e não redutores

A determinação da quantidade de carboidratos redutores foi realizada utilizando o método do ácido 3,5-dinitrossalicílico (ADNS), conforme descrito por Miller *et al.*, (1959). Para determinar a quantidade de açúcares redutores e não redutores na amostra, os polissacarídeos foram combinados com a solução ADNS na proporção de 1:10 (v/v). Essa mistura foi então aquecida a uma temperatura de 100 °C por um período de 5 minutos, em seguida o conteúdo foi diluído com água destilada (amostra:ADNS:água, 1:1:5). Utilizou-se uma curva padrão de glicose a uma concentração de 5 mg/mL para determinar a quantidade de açúcares redutores presentes na amostra. A leitura da absorbância das amostras foi realizada em um comprimento de onda de 540 nm no espectrofotômetro. A quantidade de açúcares não redutores foi calculada subtraindo-se a concentração de açúcares redutores da concentração total de carboidratos na amostra.

Figura 4 – Metodologia baseada no método ADNS para determinação de açúcares redutores.



Fonte: Autor, 2025.

4.3.3 Dosagem do teor de conteúdo sulfatados

A determinação da quantidade de carboidratos sulfatados foi realizada utilizando o método rodizonato de sódio, conforme descrito por Terho & Hartiala (1971). Para a análise, 0,5 mL de cada amostra foram combinados com 2,0 mL de etanol absoluto, na proporção de 1:4 (v/v). Em seguida, foram adicionados 1,0 mL da solução tampão de BaCl₂ e 1,5 mL da solução de rodizonato de sódio, garantindo a homogeneidade por agitação. Os tubos foram incubados no escuro à temperatura ambiente por 10 minutos, permitindo a formação do complexo colorido. A intensidade da cor foi medida em um espectrofotômetro ajustado para 520 nm, com leituras realizadas dentro de 30 minutos. A curva padrão foi construída utilizando soluções de sulfato de sódio concentradas em 4-24 µg/mL de sulfato para calibração do método.

Figura 5 – Metodologia baseada no método rodizonato de sódio para determinação de conteúdo sulfatado.



Fonte: Autor, 2025.

4.4 Gelificação induzida por cátions

O método de gelificação foi induzido pela presença de cátions, conforme descrito por Cuellar-Bermudez *et al.* (2023). Diferentes cátions foram adicionados a soluções de polissacarídeos para avaliar a formação de geis, com ênfase na estabilidade e nas características estruturais dos geis. Soluções de polissacarídeo a 1% foram combinadas com soluções aquosas de cátions a 100 mM e pH 6, abrangendo cátions monovalentes (NaCl), divalentes (CaCl₂) e trivalentes (FeCl₃). A formação de geis esféricos foram analisadas e sua estabilidade foi verificada por meio de agitação manual e inversão de frascos.

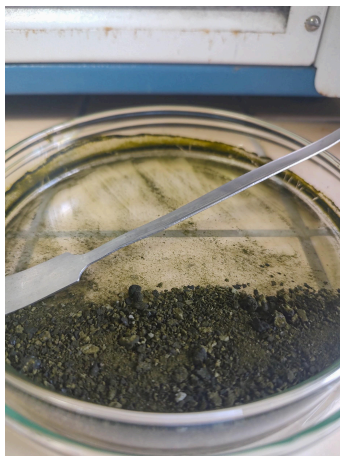
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na extração de polissacarídeos de *Arthrospira platensis* indicaram um rendimento total de 31% após o uso de etanol como agente precipitante. Esse rendimento foi calculado com base na relação entre o peso do polissacarídeo liofilizado (P₀) e o peso da biomassa seca (P), refletindo a eficiência do método de extração aplicado.

$$P/P = \frac{0,901}{2,8779} \times 100 = 31\%$$

O rendimento de 31% está alinhado com estudos prévios que utilizam métodos semelhantes para a extração e precipitação de polissacarídeos com etanol. Um estudo com a alga marinha vermelha *Champia feldmann* apresentou um rendimento de 36,2%-46,6% de polissacarídeos (Torres, 2005). Nesse sentido, os resultados obtidos mostram que o método de extração e precipitação com etanol é eficaz na extração de polissacarídeos, devido às interações de hidrogênio entre os átomos de hidrogênio do etanol e os átomos de oxigênio dos polissacarídeos, facilitando sua agregação e precipitação (Zhu *et al.*, 2023). Esse método é amplamente reconhecido por sua eficácia na separação de polissacarídeos com diferentes pesos moleculares (Wu *et al.*, 2022).

Figura 6 – Polissacarídeos liofilizados oriundos de *Arthrospira platensis*.



Fonte: Autor, 2024.

Os resultados da análise bioquímica dos polissacarídeos de *Arthrospira platensis* mostraram uma composição rica em carboidratos e conteúdo sulfatados (**Tabela 1**). Na concentração de 10 mg/mL, as dosagens de carboidratos totais, redutores, não redutores e teor de conteúdo sulfatados foram de 8,9%, 2,8%, 6% e 14% respectivamente. Quando comparados com os dados de outras microalgas, como *Chlorella ellipsoidea*, que apresentou teor de carboidratos entre 68,1% e 89,7%, e sulfatos variando de 1,9% a 6,1% (Qi & Kim, 2017), e os polissacarídeos sulfatados de *Spirulina platensis* que apresentaram 38,7% de carboidratos e 21,3% de sulfato (Rajasekar *et al.*, 2019), os polissacarídeos de *Arthrospira platensis* se destacam tanto pela alta concentração de carboidratos quanto pelo teor considerável de sulfato. Esses achados reforçam que os polissacarídeos extraídos com etanol são compostos principalmente por carboidratos, com variações na presença de ácidos urônicos (açúcares redutores) e grupos sulfatos, alinhando-se com as características de polissacarídeos extraídos de outras microalgas, mas com particularidades que podem ser exploradas para aplicações diversas.

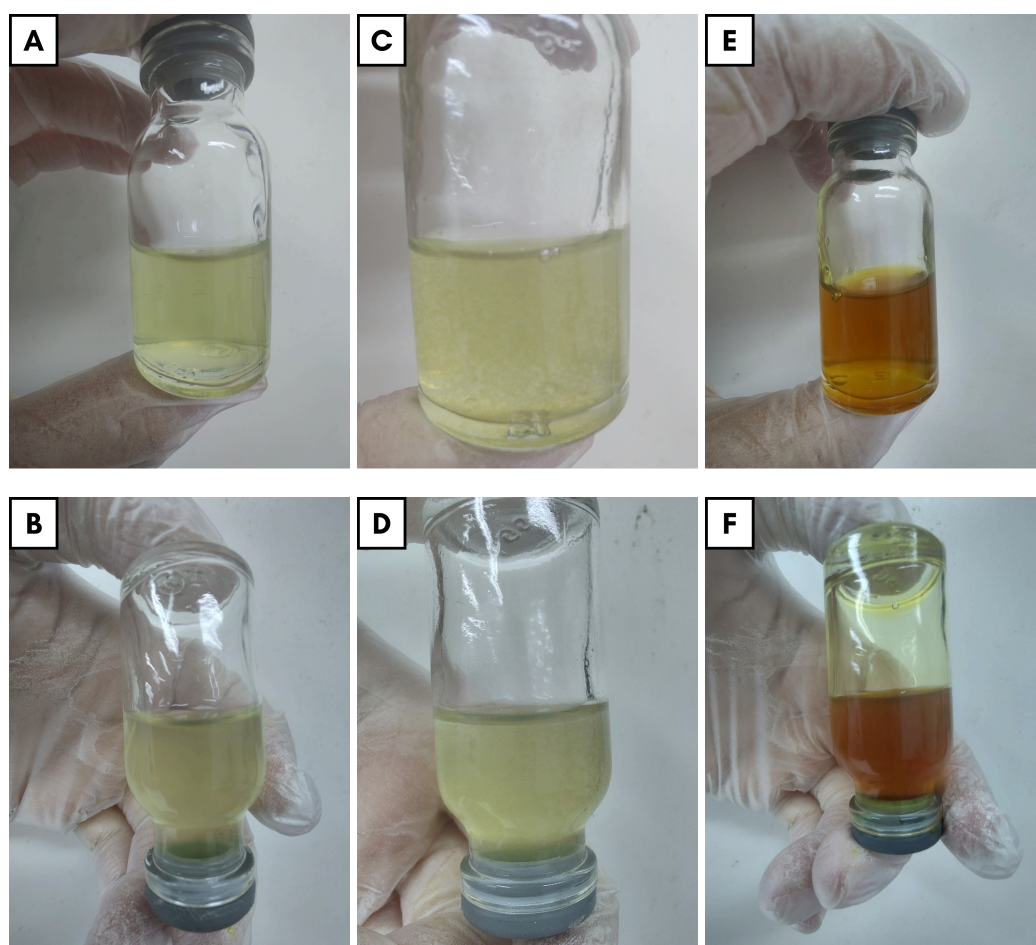
Tabela 1 – Caracterização bioquímica de polissacarídeos provenientes da *Arthrospira platensis* extraídos com etanol.

| Parâmetros | 10 mg/mL |
|----------------------------|----------|
| Carboidratos totais | 0,89 |
| Carboidratos redutores | 0,28 |
| Carboidratos não-redutores | 0,6 |
| Conteúdo sulfatados | 1,4 |

Fonte: Autor, 2024.

No teste de gelificação induzida por cátions, não houve formação de geis nas soluções monovalente (NaCl), bivalente (CaCl_2) e trivalente (FeCl_3), todas a 100 mM com 1% de polissacarídeos, como mostrado na **Figura 7**. Contudo, na presença de CaCl_2 , a solução de polissacarídeos demonstrou resistência à diluição, sugerindo interações limitadas entre os cátions divalentes e os grupos carboxilato do polímero, no qual os cátions divalentes mostraram menor afinidade para estabilizar interações fortes entre as cadeias (Alvarez *et al.*, 2021; Janarthanan & Noh, 2021). A ausência de um gel estável indica que o CaCl_2 não promoveu interações fortes entre as cadeias poliméricas, possivelmente devido à baixa afinidade pelos grupos carboxilato. Isso sugere que a modulação do pH ou da temperatura pode ser uma estratégia viável para favorecer a gelificação.

Figura 7 – Gotículas de polissacarídeos à 1% em soluções de cátions a 100 mM e pH 6. **A-B** Solução monovalente (NaCl). **C-D**. Solução bivalente (CaCl_2). **E-F**. Solução trivalente (FeCl_3).



Fonte: Autor, 2025.

Embora não tenha ocorrido gelificação, a solução de polissacarídeos na presença de CaCl_2 não se dissolveu completamente. Esse comportamento é semelhante ao relatado para outros polissacarídeos, como o alginato, onde a formação de gel depende tanto da densidade de carga dos cátions quanto da organização estrutural do polímero (Mørch *et al.*, 2006). Normalmente, os cátions monovalentes não induzem a gelificação em polissacarídeos como a pectina rica em metoxila, a menos que sob condições específicas, como ambientes alcalinos, onde podem levar à formação de gel por meio de mecanismos como desesterificação e triagem de carga (Wang *et al.*, 2019). Nesse contexto, a ausência de gelificação pode sugerir um alto grau de metoxilação do polissacarídeo, o que limita sua interação com cátions monovalentes. Conforme descrito na literatura, a gelificação de polissacarídeos altamente metoxilados ocorre preferencialmente em condições alcalinas.

Em soluções trivalentes (Fe^{3+}), a ausência de gelificação sugere que as condições experimentais, como pH e concentração do cátion, podem não ter sido ideais para promover interações efetivas entre os grupos carboxilato do polissacarídeo e o cátion trivalente. Estudos indicam que a gelificação com Fe^{3+} requer condições otimizadas de pH, com valores muito baixos (<5) levando à protonação dos grupos carboxilato e valores elevados (>6) resultando na precipitação do cátion como hidróxido (Alvarez *et al.*, 2021).

A gelificação dos polissacarídeos pode ser explicada pelo modelo "egg box", onde as cadeias de polissacarídeos se entrelaçam formando uma rede tridimensional (Santos *et al.*, 2010). Este processo é favorecido por condições como pH adequado e temperatura controlada (Brandão & Andrade, 1999). A adição de sólidos solúveis pode impactar a atividade da água livre, facilitando a aproximação das cadeias e, conseqüentemente, a formação do gel (Santos *et al.*, 2010).

Além disso, a composição química do polissacarídeo de *Arthrospira platensis*, caracterizada por uma predominância de ácido glucurônico e baixo teor de sulfato, pode limitar sua afinidade com cátions polivalentes (Cuellar-Bermudez *et al.*, 2023). Comparado a polissacarídeos de outras cianobactérias, como *Nostoc* e *Microcystis*, que possuem maior teor de sulfato, o material analisado apresentou menor eficiência na formação de geis, o que pode ser atribuído à sua estrutura e composição (Beaumont *et al.*, 2021; Kang *et al.*, 2019; Ma & Barbosa-Cánovas, 1997; Thrimawithana *et al.*, 2010). Os resultados ressaltam a necessidade de otimizar parâmetros como pH e concentração de cátions para explorar o potencial de gelificação do polissacarídeo extraído de *Arthrospira platensis*. Estudos futuros podem incluir

modificações químicas do polissacarídeo ou sua combinação com outros biopolímeros para ampliar sua aplicabilidade em sistemas de gelificação.

6 CONCLUSÃO

A *Arthrospira platensis* demonstrou ser uma fonte promissora de polissacarídeos, com um rendimento significativo na extração e alto teor de conteúdo sulfatado. Embora os testes de gelificação com cátions monovalentes, bivalentes e trivalentes não tenham resultado na formação de geis, a solução com CaCl_2 demonstrou resistência à diluição. Esses resultados indicam a necessidade de estudos adicionais para otimizar as condições de gelificação, como pH, para explorar aplicações funcionais desses polissacarídeos, reforçando seu potencial biotecnológico.

REFERÊNCIAS

- AHSAN, M.; HABIB, B.; PARVIN, M.; HUNTINGTON, T. C.; HASAN, M. R. A Review on Culture. In: Production and Use of Spirulina as Food for Humans and Feeds for Domestic Animals and Fish. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**: Rome, Italy, 2008.
- ALFADHLY, N. K.; ALHELFI, N.; ALTEMIMI, A. B.; VERMA, D. K.; CACCIOLA, F.; NARAYANANKUTTY, A. Trends and Technological Advancements in the Possible Food Applications of *Spirulina* and Their Health Benefits: A Review. **Molecules**, v. 27, p. 5584, 2022.
- ALVAREZ, X. et al. Biochemical characterization of Nostoc sp. exopolysaccharides and evaluation of potential use in wound healing. **Carbohydrate polymers**, v. 254, 15 fev. 2021.
- AMBROSI, M. A.; REINEHR, C. O.; BERTOLIN, T. E.; COSTA, J. A. V.; COLLA, L. M. Propriedades de saúde da microalga *Spirulina*. **Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada**, v. 29, n. 2, p. 115-123, 2008.
- BEAUMONT, M. et al. Hydrogel-Forming Algae Polysaccharides: From Seaweed to Biomedical Applications. **Biomacromolecules**, v. 22, n. 3, p. 1027–1052, 8 mar. 2021.
- BELAY, A. Mass Culture of Spirulina Outdoors: The Earthrise Farms Experience, In: A. Vonshak, Ed., *Spirulina platensis (Arthrospira)*, Physiology, Cell Biology and Biotechnology, **Taylor & Francis, London**, 1997, pp. 131-158.
- BRANDÃO, E. M.; ANDRADE, C. T. Influência de fatores estruturais no processo de gelificação de pectinas de alto grau de metoxilação. **Polímeros**, v. 9, n. 3, p. 38–44, set. 1999.
- CAO, M. X. et al. Separation, Purification, Structure Analysis, In Vitro Antioxidant Activity and circRNA-miRNA-mRNA Regulatory Network on PRV-Infected RAW264.7 Cells of a Polysaccharide Derived from *Arthrospira platensis*. **Antioxidants (Basel, Switzerland)**, v. 10, n. 11, 1 nov. 2021.
- CHEN, S. M.; JIA, X. M.; CUI, H. R.; XU, B. J. The effect of environmental factors and γ -rays on the morphology and growth of *Spirulina platensis*. **Journal of Zhejiang Agricultural University**, v. 23, p. 36-40, 1997.

CHEN, Y. et al. Characterization of the structure and analysis of the anti-oxidant effect of microalga *Spirulina platensis* polysaccharide on *Caenorhabditis elegans* mediated by modulating microRNAs and gut microbiota. **International journal of biological macromolecules**, v. 163, p. 2295–2305, 15 nov. 2020.

CHOI, J. H.; KIM, S.; KIM, S. J. Spirulan from blue-green algae inhibits fibrin and blood clots: its potent antithrombotic effects. **Journal of biochemical and molecular toxicology**, v. 29, n. 5, p. 240–248, 1 maio 2015.

CIFERRI, O. Spirulina, the edible microorganism. **Microbiological reviews**, v. 47, n. 4, p. 551–578, dez. 1983.

CIFERRI, O.; TIBONI, O. The biochemistry and industrial potential of *Spirulina*. **Annual Review of Microbiology**, v. 39, p. 503-526, 1985.

CORNET, J. F.; DUSSAP, C. G.; GROS, J. B. Kinetics and energetics of photosynthetic microorganisms in photobioreactors. Application to *Spirulina* growth. **Advances in Biochemical Engineering Biotechnology**, v. 59, p. 155-223, 1998.

COSTA, J. A. V.; COLLA, L. M.; DUARTE FILHO, P. Spirulina platensis Growth in Open Raceway Ponds Using Fresh Water Supplemented with Carbon, Nitrogen and Metal Ions. **Z. Naturforsch**, n. 58, p. 76-80, 2003.

CUELLAR-BERMUDEZ, S. P. et al. Isolation, purification, and metal-induced gelation of released polysaccharides from spent culture medium of *Arthrospira*. **Algal Research**, v. 70, p. 103010, 1 mar. 2023.

DE PHILIPPIS, R.; VINCENZINI, M. Exocellular polysaccharides from cyanobacteria and their possible applications. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 22, n. 3, p. 151–175, 1 set. 1998.

DELATTRE, C. et al. Production, extraction and characterization of microalgal and cyanobacterial exopolysaccharides. **Biotechnology Advances**, v. 34, n. 7, p. 1159–1179, 15 nov. 2016.

DERNER, R. B.; OHSE, S.; VILLELA, M.; CARVALHO, S. M.; FETT, R. Microalgas, produtos e aplicações. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1959-1967, 2006.

DUBOIS, M. et al. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350–356, 1 mar. 1956.

ENNAJI, H. et al. Physicochemical Evaluation of Edible Cyanobacterium *Arthrospira platensis* Collected from the South Atlantic Coast of Morocco: A Promising Source of Dietary Supplements. **Evidence-based Complementary and Alternative Medicine : eCAM**, v. 2021, 2021.

FUJISAWA, T. et al. Genomic Structure of an Economically Important Cyanobacterium, *Arthrospira (Spirulina) platensis* NIES-39. **DNA Research**, v. 17, n. 2, p. 85–103, 2010.

GENTSCHEVA, G. et al. Application of *Arthrospira platensis* for Medicinal Purposes and the Food Industry: A Review of the Literature. **Life 2023, Vol. 13, Page 845**, v. 13, n. 3, p. 845, 21 mar. 2023.

GRZANNA, R. et al. Immolina, a high-molecular-weight polysaccharide fraction of *Spirulina*, enhances chemokine expression in human monocytic THP-1 cells. **Journal of alternative and complementary medicine (New York, N.Y.)**, v. 12, n. 5, p. 429–435, jun. 2006.

GUO, W. et al. Microalgae polysaccharides ameliorates obesity in association with modulation of lipid metabolism and gut microbiota in high-fat-diet fed C57BL/6 mice. **International journal of biological macromolecules**, v. 182, p. 1371–1383, 1 jul. 2021.

HAMED, I. The evolution and versatility of microalgal biotechnology: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, p. 1104–1123, 2016.

HAYASHI, T. et al. Calcium spirulan, an inhibitor of enveloped virus replication, from a blue-green alga *Spirulina platensis*. **Journal of natural products**, v. 59, n. 1, p. 83–87, jan. 1996.

HEINSOO, D. Cultivation of Spirulina on Conventional and Urine-Based Medium in a Household Scale System. Master's Thesis, **KTH School of Biotechnology**, Stockholm, Sweden, 2014.

HU, C. -S.; PINDER, K. L. Effect of cations on the maximum yield values of a bentonite clay gel. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 52, n. 5, p. 547–551, out. 1974.

IKEDA, S. et al. Atomic force microscopy studies on cation-induced network formation of gellan. **Food Hydrocolloids**, v. 18, n. 5, p. 727–735, 31 jan. 2004.

JANARTHANAN, G.; NOH, I. Recent trends in metal ion based hydrogel biomaterials for tissue engineering and other biomedical applications. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 63, p. 35–53, 10 fev. 2021.

JEEJI BAI, N. Competitive exclusion or morphological transformation? A case study with *Spirulina fusiformis*. **Archives of Hydrobiology**, v. 71 (Suppl.), Algology Study 38/39, p. 191-199, 1985.

JUNG, F. et al. Lipophilic and Hydrophilic Compounds from *Arthrospira platensis* and Its Effects on Tissue and Blood Cells—An Overview. **Life**, v. 12, n. 10, 1 out. 2022.

KANG, M. et al. Characterization of Xanthan gum-based hydrogel with Fe³⁺ ions coordination and its reversible sol-gel conversion. **Carbohydrate Polymers**, v. 203, p. 139–147, 1 jan. 2019.

KAPLAN, A.; REINHOLD, L. CO₂ concentrating mechanisms in photosynthetic microorganisms. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular**, v. 50, p. 539-570, 1999.

LI, J. et al. Isolation, Purification, Characterization, and Immunomodulatory Activity Analysis of α -Glucans from *Spirulina platensis*. **ACS Omega**, v. 6, n. 33, p. 21384–21394, 24 ago. 2021a.

LI, T. T. et al. *Spirulina platensis* polysaccharides attenuate lipid and carbohydrate metabolism disorder in high-sucrose and high-fat diet-fed rats in association with intestinal microbiota. **Food research international (Ottawa, Ont.)**, v. 147, 1 set. 2021b.

LIU, Q. et al. Production and structural characterization of a new type of polysaccharide from nitrogen-limited *Arthrospira platensis* cultivated in outdoor industrial-scale open raceway ponds. **Biotechnology for Biofuels**, v. 12, n. 1, p. 1–13, 24 maio 2019.

MA, L.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Viscoelastic Properties of Xanthan Gels Interacting with Cations. **Journal of Food Science**, v. 62, n. 6, p. 1124–1128, 1 nov. 1997.

MARKOU, G. Alteration of the biomass composition of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* under various amounts of limited phosphorus. **Bioresource Technology**, v. 116, p. 533–535, 1 jul. 2012.

MARKOU, G. et al. Production of *Arthrospira platensis*: Effects on Growth and Biochemical Composition of Long-Term Acclimatization at Different Salinities. **Bioengineering 2023**, Vol. 10, Page 233, v. 10, n. 2, p. 233, 9 fev. 2023.

MILLER, G. L. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**, v. 31, n. 3, p. 426–428, 1 mar. 1959.

MØRCH, Y. A. et al. Effect of Ca^{2+} , Ba^{2+} , and Sr^{2+} on alginate microbeads. **Biomacromolecules**, v. 7, n. 5, p. 1471–1480, maio 2006.

MULITERNO, A.; MOSELE, P. C.; COSTA, J. A. V.; HEMKEMEIER, M.; BERTOLIN, T. E.; COLLA, L. M. Mixotrophic growth of *Spirulina platensis* in fed-batch mode. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, p. 1132-1138, 2005.

PULZ, O.; GROSS, W. Valuable products from biotechnology of microalgae. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 65, n. 6, p. 635-648, 2004.

QI, J.; KIM, S. M. Characterization and immunomodulatory activities of polysaccharides extracted from green alga *Chlorella ellipsoidea*. **International journal of biological macromolecules**, v. 95, p. 106–114, 1 fev. 2017.

RAJASEKAR, P. et al. Isolation and structural characterization of sulfated polysaccharide from *Spirulina platensis* and its bioactive potential: In vitro antioxidant, antibacterial activity and Zebrafish growth and reproductive performance. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 141, p. 809–821, 1 dez. 2019.

RIPPKA, R.; DERUELLES, J.; WATERBURY, J. B.; HERDMAN, M.; STANIER, R. Y. Generic assignments, strain histories, and properties of pure cultures of cyanobacteria. **Journal of General Microbiology**, v. 111, p. 1-61, 1979.

ROSEBROCK, M. et al. Morphological Control Over Gel Structures of Mixed Semiconductor-Metal Nanoparticle Gel Networks with Multivalent Cations. **Small**, v. 19, n. 10, 15 jan. 2023.

SANTOS, M. D. S. et al. Polissacarídeos extraídos da gabirola (*Campomanesia xanthocarpa* Berg): propriedades químicas e perfil reológico. **Polímeros**, v. 20, n. 5, p. 352–358, 2010.

SEDAGHATZADEH, M. et al. The effect of cations on gelation of cross-linked polymers. **Petroleum Exploration and Development**, v. 46, n. 4, p. 826–832, 1 ago. 2019.

SHABANA, E. F. et al. Biochemical composition and antioxidant activities of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* in response to gamma irradiation. **Food Chemistry**, v. 214, p. 550–555, 1 jan. 2017.

SINGH, S. P.; MONTGOMERY, B. L. Determining cell shape: adaptive regulation of cyanobacterial cellular differentiation and morphology. **Trends in Microbiology**, v. 19, n. 6, p. 278-285, 2011.

SONI, R. A.; SUDHAKAR, K.; RANA, R. S. *Spirulina*—From growth to nutritional product: A review. **Trends Food Science and Technology**, v. 69, p. 157–171, 2017.

TERHO, T. T.; HARTIALA, K. Method for determination of the sulfate content of glycosaminoglycans. **Analytical biochemistry**, v. 41, n. 2, p. 471–476, 1971.

THRIMAWITHANA, T. R. et al. Texture and rheological characterization of kappa and iota carrageenan in the presence of counter ions. **Carbohydrate Polymers**, v. 82, n. 1, p. 69–77, 2 ago. 2010.

TOMASELLI, L. Morphology, ultrastructure, and taxonomy of *Arthrospira* (*Spirulina*) *maxima* and *Arthrospira platensis*. In: VONSHAK, A. (Ed.). *Spirulina platensis* (*Arthrospira*): Physiology, Cell-Biology and Biotechnology. **London: Taylor and Francis**, 1997. p. 1-16.

TORRES, V. M. Extração, purificação e atividade biológica de polissacarídeos sulfatados da alga marinha vermelha *Champia feldmannii*. 39 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Pesca)-**Universidade Federal do Ceará**, Fortaleza, 2005.

ULRICH NÜBEL et al. Matching molecular diversity and ecophysiology of benthic cyanobacteria and diatoms in communities along a salinity gradient. **Environmental Microbiology**, v. 2, n. 2, p. 217–226, 1 abr. 2000.

UPPIN, V.; DHARMESH, S. M.; SARADA, R. Polysaccharide from *Spirulina platensis* Evokes Antitumor Activity in Gastric Cancer Cells via Modulation of Galectin-3 and Exhibited Cyto/DNA Protection: Structure-Function Study. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 70, n. 23, p. 7058–7069, 15 jun. 2022.

WANG, H. et al. Unexpected gelation behavior of citrus pectin induced by monovalent cations under alkaline conditions. **Carbohydrate polymers**, v. 212, p. 51–58, 15 maio 2019.

WHANG, Z. P.; CHEN, S. M.; JIA, X. M.; CUI, H. R.; XU, B. J. The effect of environmental factors and γ -rays on the morphology and growth of *Spirulina platensis*. **Journal of Zhejiang Agricultural University**, v. 23, p. 36-40, 1997.

WHANG, Z. P.; ZHAO, Y. Morphological reversion of *Spirulina (Arthrospira) platensis* (Cyanophyta): from linear to helical. **Journal of Phycology**, v. 41, p. 622-628, 2005.

WU, D. T. et al. In vitro fecal fermentation properties of polysaccharides from *Tremella fuciformis* and related modulation effects on gut microbiota. **Food research international (Ottawa, Ont.)**, v. 156, 1 jun. 2022.

WU, H. et al. Growth and Biochemical Composition Characteristics of *Arthrospira platensis* Induced by Simultaneous Nitrogen Deficiency and Seawater-Supplemented Medium in an Outdoor Raceway Pond in Winter. **Foods**, v. 10, n. 12, 1 dez. 2021.

ZHOU, T. et al. Characterization of additional zinc ions on the growth, biochemical composition and photosynthetic performance from *Spirulina platensis*. **Bioresource Technology**, v. 269, p. 285–291, 1 dez. 2018.

ZHU, H. et al. Rheological behaviors of ethanol-fractional polysaccharides from *Dendrobium officinale* in aqueous solution: Effects of concentration, temperature, pH, and metal ions. **Food Hydrocolloids**, v. 137, 1 abr. 2023.