



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

GABRIEL JOSIAS SILVA DE SOUZA

**SALINIDADE E RADIAÇÃO UV COMO MODULADORES DA PRODUÇÃO DE  
FICOBILIPROTEÍNAS, CAROTENOIDES E CITONEMINA EM CIANOBACTÉRIAS  
DO COMPLEXO *Nostoc***

RECIFE,  
2025

GABRIEL JOSIAS SILVA DE SOUZA

SALINIDADE E RADIAÇÃO UV COMO MODULADORES DA PRODUÇÃO DE  
FICOBILIPROTEÍNAS, CAROTENOIDES E CITONEMINA EM CIANOBACTÉRIAS DO  
COMPLEXO *Nostoc*

Monografia apresentada para o  
cumprimento parcial das exigências  
para obtenção do título de Bacharel em  
Ciências Biológicas pela Universidade  
Federal Rural de Pernambuco.

**Orientador:** Prof. Dr. Watson Arantes  
Gama.

RECIFE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S729s Souza, Gabriel Josias Silva de.

Salinidade e radiação UV como moduladores da produção de Ficoliproteínas, carotenoides e citonemina em cianobactérias do complexo Nostoc / Gabriel Josias Silva de Souza. – Recife, 2025.  
59 f.: il.

Orientador(a): Watson Arantes Gama Júnior.

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

1. Cyanobacteria 2. Fotoprotetores 3. FPS I. Gama Júnior, Watson Arantes, orient. II. Título

CDD 574

GABRIEL JOSIAS SILVA DE SOUZA

SALINIDADE E RADIAÇÃO UV COMO MODULADORES DA PRODUÇÃO DE  
FICOBILIPROTEÍNAS, CAROTENOIDES E CITONEMINA EM CIANOBACTÉRIAS  
DO COMPLEXO *Nostoc*

Comissão Avaliadora:

---

Presidente: Prof. Dr. Watson Arantes Gama  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Titular: Bel. Yanara Alessandra Santana Moura

---

Titular: Dra. Anamaria Silva Diniz

---

Suplente: Me. Jefferson Vitor Melo Cabral

RECIFE

2025

Dedico este trabalho ao meu avô Amaro (*in memoriam*) e a minha avó Zilda.

## AGRADECIMENTOS

O sonho de cursar Biologia me salvou diversas vezes. Ele surgiu quando eu não fazia ideia do que é ser um biólogo, quando o único contato que tive com a biologia foram as aulas de ciências no ensino fundamental. Foi esse sonho que me manteve lutando quando nada parecia dar certo, e foi essa jornada que me permitiu conhecer pessoas maravilhosas. Por isso, venho aqui agradecer:

Ao meu orientador, Prof. Watson, que me recebeu de braços abertos no CyA, mesmo sem me conhecer. Agradeço por todo o ensinamento compartilhado, por todas as broncas e pelos momentos descontraídos que passamos juntos. Sou grato por ter sido toda contribuição ao meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

Gostaria também de agradecer a todos que fazem parte do CyA, pelo companheirismo, pelas colaborações, pelas brincadeiras e por todo o conhecimento compartilhado. À Luana, por ter sido a primeira a me acolher no laboratório, pela paciência em me ensinar diversas coisas e pela amizade que construímos nesse caminho. À Mota, por me escutar em momentos difíceis, por tudo que me ensinou e por sempre me incentivar a buscar crescimento. Ao Vitor, por compartilhar um único neurônio comigo.

Agradeço à Profa. Ariadne Moura por me fazer apaixonar pelas cianobactérias, por me apresentar ao Prof. Watson, por todas as palavras de carinho e incentivo, e por sempre disponibilizar seu laboratório quando necessário.

Agradeço à Profa. Carmen Zickel, que me orientou durante o período como monitor, compartilhando todo o seu conhecimento.

Sou grato às professoras Laurici e Luciana, que despertaram em mim o desejo de ser biólogo.

Agradeço à UFRPE e, especialmente, a todo o corpo docente do curso de Bacharelado em Ciências Biológicas. Carrego comigo um pouco do que aprendi com cada um de vocês.

Agradeço à FACEPE pelo fomento dessa pesquisa e à CNPQ pela concessão da bolsa.

Agradeço por fazer parte da turma SB1 2020.2, que, ao contrário do que imaginava ao entrar na graduação, se tornou um grupo de verdadeiros amigos, tornando a experiência mais leve e divertida. Agradeço à Malaura, por todo o cuidado que sempre teve comigo; ao Kelvin, por tudo o que passamos juntos; à Livia, pelos conselhos, pelos trabalhos que fizemos juntos e até pelas brigas; e à Malu, por ser uma pessoa incrível e por ter uma luz que eu nunca enxerguei em outra pessoa.

É impossível falar da SB1 sem mencionar os superiores. Rafael e eu nos sentamos perto no primeiro dia de aula presencial e nunca mais nos afastamos. Ele foi a primeira pessoa com quem conversei na faculdade, a primeira a almoçar comigo no R.U. e quem mais me ajudou, mesmo sem saber, durante a graduação. Já eu e Saulo, nos aproximamos um pouco mais tarde, mas parece que sempre fomos amigos. Ele esteve disposto a me escutar nos momentos mais difíceis e sempre melhorou meus dias. Agradeço imensamente por ter conhecido vocês e sempre vou lembrar com muito carinho de todos os nossos momentos juntos, tanto os que já passaram quanto os que virão.

Agradeço à Adryelle, uma das pessoas mais importantes que já conheci. Nossa amizade começou há 7 anos, no momento mais improvável, mas da forma mais natural possível. Sempre senti que conheço Adryelle a vida inteira, nenhuma outra pessoa me completa como ela. Agradeço por tornar nossos dias no IF mais fáceis, por me incentivar a seguir meus sonhos e por estar sempre ao meu lado.

Agradeço ao Gabriel, que acompanhou de perto meus piores momentos na faculdade, mas nunca deixou de acreditar em mim. Agradeço por ver em mim algo que eu nunca enxerguei, e talvez nunca enxergue. Sou grato por você ter escolhido dividir sua vida comigo.

Por fim, agradeço a toda minha família por todo o incentivo. À minha avó Zilda, minha primeira apoiadora, e ao meu avô Amaro (in memoriam), o exemplo de homem que eu quero ser. Não tenho palavras para expressar minha gratidão à minha mãe, Zilmara, por todos os sacrifícios que fez para que eu chegasse até aqui, por todas as boas memórias de infância e por alugar e assistir comigo o DVD de "Irmão Urso". Agradeço por nunca ter me cobrado nada além dos estudos e por sempre me proporcionar o conforto necessário para que eu pudesse focar apenas nisso.

Agradeço ao meu pai, André, por todo o amor que sempre me deu. Agradeço às minhas tias, Zilene, Zilka e Zenilda, por todo o carinho e apoio.

Agradeço a todas as pessoas que fizeram parte deste longo caminho.

*“I grew up in the shoes they told me I could fill  
Shoes that were not made for running up that  
hill*

*And I need to run up that hill*

*[...]*

*I will”*

*(Fetch the Bolt Cutters – Fiona Apple)*

## RESUMO

As cianobactérias são os únicos organismos procariontes capazes de realizar a fotossíntese oxigênica. Devido ao seu complexo metabolismo, elas são capazes de produzir diferentes metabólitos secundários com diversas atividades biológicas. Com o objetivo de conhecer e avaliar os efeitos da radiação UV e estresse salino na produção de ficobiliproteínas, carotenoides e citonemina em cianobactérias, foram selecionadas três cepas identificadas como do gênero *Nostoc* da CCAPE (Coleção de Cultura de Cianobactérias e Algas de Pernambuco), previamente isoladas de ambientes terrestres e dulcícolas do estado de Pernambuco. As cepas foram mantidas e cultivadas em condições padrões da CCAPE, em meio ASM-1, sob agitação constante, visando a otimização do crescimento de biomassa. Após esse período, as cepas foram expostas a dois tratamentos, um com irradiação UVA e UVB e outro com NaCl (na concentração de 200 mM) adicionado ao meio, além do controle (irradiado com luz branca e sem adição de sal no meio). Após 72 horas, a biomassa foi colhida, liofilizada e a extração se deu pelo método de maceração, utilizando os solventes tampão fosfato (ficobiliproteínas) e acetona (demais compostos). A concentração dos pigmentos de interesse e a determinação do FPS foram avaliadas por espectrofotometria. Ao analisar os dados estatisticamente (ANOVA *one-way*), foi observado que todas as cepas utilizadas apresentaram concentração dos compostos avaliados em todos os tratamentos propostos. Contudo, a cepa CCAPE 85 produziu significativamente mais citonemina após ser exposta a irradiação UVA e UVB (em comparação com a luz branca) e apresentou maiores concentrações significativas de ficobiliproteínas (i.e., ficocianina, aloficocianina e ficoeritrina) após ser exposta ao estresse salino. O FPS (Fator de Proteção Solar) dos extratos cianobacterianos foi baixo para a maior parte dos extratos das cepas ( $\leq 3$ ). Apesar disso, o extrato de tampão fosfato da cepa CCAPE 85 apresentou altos valores de FPS (entre 20 e 30 FPS), assim demonstrando o seu potencial como um ingrediente ativo em formulações fotoprotetoras. Em vista disso, com esse estudo foi possível comprovar o efeito do estresse salino e do estresse relacionado a radiação UV como potenciadores da produção de pigmentos, ficobiliproteínas e citonemina, respectivamente, com grande potencial bioativo. Além disso, destaca-se o a importância da cepa CCAPE 85 para estudos biotecnológicos.

**Palavras-chave:** Cyanobacteria, Fotoprotetores, FPS.

## ABSTRACT

Cyanobacteria are the only prokaryotic organisms capable of performing oxygenic photosynthesis. Due to their complex metabolism, they can produce different secondary metabolites with various biological activities. To understand and evaluate the effects of UV radiation and saline stress on the production of phycobiliproteins, carotenoids, and scytonemin in cyanobacteria, three strains identified as *Nostoc* belonging from the CCAPE (Culture Collection of Cyanobacteria and Algae of Pernambuco) were selected, which were previously isolated from terrestrial and freshwater environments in the state of Pernambuco. The strains were maintained and cultivated under standard CCAPE conditions in ASM-1 medium, under constant agitation, to optimize biomass growth. After this period, the strains were exposed to two treatments, one with UVA and UVB irradiation and another with NaCl (at a concentration of 200 mM) added to the medium, along with a control (irradiated with white light and without the addition of salt to the medium). After 72 hours, the biomass was collected and lyophilized, and the extraction was performed using the maceration method, with phosphate buffer (for phycobiliproteins) and acetone (for the other compounds) as solvents. The concentration of the pigments of interest and the determination of SPF were evaluated by spectrophotometry. Statistical analysis of the data (ANOVA-one way) revealed that all strains showed concentrations of the compounds being assessed in all proposed treatments. However, strain CCAPE 85 produced significantly more scytonemin after exposure to UVA and UVB irradiation (compared to white light) and showed significantly higher concentrations of phycobiliproteins (i.e., phycocyanin, allophycocyanin, and phycoerythrin) after exposure to saline stress. The Sun Protection Factor (SPF) of the cyanobacterial extracts was low for most of the strain extracts ( $\leq 3$ ). Despite this, the phosphate buffer extract of strain CCAPE 85 exhibited high SPF values (between 20 and 30 SPF), thus demonstrating its potential as an active ingredient in photoprotective formulations. Therefore, this study demonstrated the effect of saline stress and UV radiation stress as enhancers of the production of pigments, phycobiliproteins, and scytonemin, respectively, with significant bioactive potential. Furthermore, the importance of strain CCAPE 85 for biotechnological studies is highlighted.

**Keywords:** Cyanobacteria, Photoprotectors, SPF.

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	16
2. Revisão de literatura .....	17
2.1. Cyanobacteria .....	17
2.2. Complexo <i>Nostoc</i> .....	19
2.3. Radiação UV .....	20
2.4. Estresse Salino.....	23
2.5. Ficobiliproteínas .....	24
2.6. Citonemina .....	26
2.7. Carotenoides .....	28
3. Objetivos .....	30
3.1. Objetivo Geral:.....	30
3.2. Objetivos Específicos: .....	30
4. Material e Métodos.....	30
4.1. Seleção das Cepas.....	30
4.2. Cultivo.....	31
4.3. Desenho experimental para Estresse Salino.....	31
4.4. Desenho Experimental para Irradiação UV .....	32
4.5. Extração e Análise de Ficobiliproteínas .....	33
4.6. Extração e Análises de Carotenoides, Clorofila <i>a</i> e Citonemina.....	34
4.7. Determinação do Fator de Proteção Solar (FPS) dos Extratos Obtidos .....	34
4.8. Análises Estatísticas.....	35
5. Resultados e Discussão.....	35
5.1. Identificação Taxonômica .....	35
5.2. Crescimento e rendimento da biomassa .....	36
5.3. Efeito dos estresses na concentração de pigmentos .....	37
5.4. Fator de Proteção Solar (FPS) dos Extratos Analisados .....	43
6. Conclusão .....	47
7. Referências .....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representação das diferentes formas das cianobactérias: <b>A</b> - unicelulares esféricas e elípticas; <b>B</b> – coloniais; <b>C</b> – filamentosas; <b>D</b> - espiralada; <b>E</b> - tricoma sem bainha; <b>F</b> - tricoma com bainha; <b>G</b> - ramificação falsa; <b>H</b> - ramificação verdadeira; <b>I</b> - diferentes tipos de células em cianobactérias filamentosas (heterócito – célula especializada para fixação do nitrogênio atmosférico; acineto – célula de resistência). Imagem adaptada de MEHDIZADEH ALLAF e PEERHOSSAINI (2022). ....	18
<b>Figura 2.</b> Esquema representando como diferentes tipos de radiação UV penetram ou interagem com a camada de ozônio. Adaptado de ZIELINSKA-DABKOWSKA (2014). ....	21
<b>Figura 3.</b> Representação esquemática dos possíveis efeitos da irradiação UV em cianobactérias. UVR: Radiação UV; FSII: Fotossistema II; ssDNA: DNA fita simples. Adaptado de SINGH; JHA; RANA; MISHRA et al. (2023). ....	23
<b>Figura 4.</b> Organização estrutural do ficobilissomo. <b>A</b> – Etapas do transporte de energia dentro do complexo de antena; <b>B</b> – Pigmentos, e seus respectivos picos de absorção, que fazem parte desse complexo. Adaptado de GOVINDJEE e SHEVELA (2011)...	25
<b>Figura 5.</b> Estrutura química da citonemina. Fonte: KANG; JO; LEE; YOON <i>et al.</i> (2020). ....	27
<b>Figura 6.</b> Estrutura química de representantes das classes dos carotenos e das xantofilas. Adaptado de MAOKA (2020). ....	29
<b>Figura 7.</b> Fluxograma representando o desenho experimental para estresse salino. FCB: Ficobiliproteínas; CIT: Citonemina; CAR: Carotenoides; CLO: Clorofila <i>a</i> . ....	32
<b>Figura 8.</b> Fluxograma representando o desenho experimental para irradiação UV. T1: Luz Branca; C: Controle; T2: Luz Branca, radiações UVA e UVB; FCB: Ficobiliproteínas; CIT: Citonemina; CAR: Carotenoides; CLO: Clorofila <i>a</i> . ....	33
<b>Figura 9.</b> Cianobactérias utilizadas no estudo. A-B: <i>Nostoc interbryum</i> CCAPE 77; C-D: <i>Nostoc</i> sp.1 CCAPE 85; E-F: <i>Nostoc</i> sp.2 CCAPE 102. Seta vermelha: Filamento unisseriado sem ramificações; Seta branca: Heterócito terminal; Seta preta: Heterócito intercalar. Barra de escala: 10 µm. ....	36
<b>Figura 10.</b> Valores médio e desvio padrão da concentração de clorofila <i>a</i> , carotenoides, citoneminas, ficocianina, aloficocianina e ficoeritrina para a cepa <i>Nostoc interbryum</i> CCAPE 77 quando exposta a diferentes tratamentos. ....	38

<b>Figura 11.</b> Valores médio e desvio padrão na concentração de clorofila <i>a</i> , carotenoides, citoneminas, ficocianina, aloficocianina e ficoeritrina para a cepa <i>Nostoc</i> sp.2 CCAPE 102 quando exposta a diferentes tratamentos. ....	39
<b>Figura 12.</b> Valores médio e desvio padrão na concentração de clorofila <i>a</i> , carotenoides, citoneminas, ficocianina, aloficocianina e ficoeritrina para a cepa <i>Nostoc</i> sp.1 CCAPE 85 quando exposta a diferentes tratamentos. Letras diferentes representam diferenças significativas. ....	41
<b>Figura 13.</b> Valores médio e desvio padrão no FPS de diferentes extratos (acetona e tampão fosfato) da cepa <i>Nostoc interbryum</i> CCAPE 77 exposta a diferentes tratamentos. Letras diferentes representam diferenças significativas. ....	44
<b>Figura 14.</b> Valores médio e desvio padrão no FPS de diferentes extratos (acetona e tampão fosfato) da cepa <i>Nostoc</i> sp.1 CCAPE 85 exposta a diferentes tratamentos. Letras diferentes representam diferenças significativas. ....	45
<b>Figura 15.</b> Valores médio e desvio padrão no FPS de diferentes extratos (acetona e tampão fosfato) da cepa <i>Nostoc</i> sp.2 CCAPE 102 exposta a diferentes tratamentos. Letras diferentes representam diferenças significativas. ....	46

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Lista das cepas selecionadas, incluindo o seu código, local de coleta, substrato de onde foi isolada e identificação. CCAPE: Coleção de Cultura de Cianobactérias e Algas de Pernambuco. ....	31
<b>Tabela 2.</b> Função de produto normalizada utilizada no cálculo do FPS (SAYRE; AGIN; LEVEE; MARLOWE, 1979). EE - Efeito eritemogênico da radiação de comprimento de onda ( $\lambda$ ); I - Intensidade do sol no comprimento de onda ( $\lambda$ ) .....	35
<b>Tabela 3.</b> Peso fresco (em g) das cepas utilizadas. CCAPE: Coleção de Cultura de Cianobactérias e Algas de Pernambuco. ....	37

## 1. INTRODUÇÃO

Cyanobacteria representa o grupo mais basal de procariontes capazes de realizar fotossíntese oxigênica, podendo ser encontrados em uma grande variedade de ambientes, variando entre terrestre, marinho e dulcícola (HE; CHEN; TAO; ZHOU *et al.*, 2024). Além disso, as cianobactérias são altamente adaptadas à sobrevivência em ambientes extremos, como desertos, fontes termais e as regiões polares do planeta, devido a sua capacidade de tolerar diversas variáveis severas – como irradiação UV, dessecação e salinidade (MARTIN-ANDRES; SOBRADO; CAVALCANTE; QUESADA, 2024).

O aparato fotossintético das cianobactérias é composto por três sistemas primários de captação de luz, nos quais dois desses sistemas são comuns a outros organismos fotossintéticos e um é exclusivo das cianobactérias, rodófitas e glaucófitas: os ficobilissomos – complexos de antenas que capturam energia luminosa na faixa de 450-650 nm (JHA; SINGH; SINGH; GUPTA *et al.*, 2024). Estruturalmente, os ficobilissomos são compostos por subcomplexos de hastes e núcleos, em que as hastes são ligadas radialmente às proteínas do núcleo (MIZUHO; TAKESHI; KAISEI; MAI *et al.*, 2024). As proteínas que compõem os ficobilissomos são conhecidas como ficobiliproteínas, proteínas pigmentadas, altamente solúveis em água, que podem ser classificadas em três categorias: ficoeritrina ( $\lambda_{\max} = 540 - 570$  nm), ficocianina ( $\lambda_{\max} = 610 - 620$  nm) e aloficocianina ( $\lambda_{\max} = 650 - 655$  nm) (MA; HU; SHA; MENG *et al.*, 2024).

A grande biodiversidade desses organismos reflete, diretamente, em um amplo espectro de metabólitos secundários biossintetizados pelas mais variadas vias e, conseqüentemente, possuindo um extenso conjunto de diferentes atividades biológicas (RODRIGUES; MORONE; HENTSCHKE; VASCONCELOS *et al.*, 2024). São conhecidas mais de 1.600 moléculas derivadas de cianobactérias, e esses compostos exibem uma ampla gama de atividades biológicas – antifúngicas, antivirais, fotoprotetoras, antibacterianas e antioxidantes, o que coloca as cianobactérias como organismos de bastante interesse para as mais diversas indústrias, principalmente biomédica e farmacológica (BOUYAHYA; BAKRIM; CHAMKHI; TAHA *et al.*, 2024).

É sabido que a radiação UV pode exercer efeitos letais em sistemas biológicos, uma vez que é absorvida por biomoléculas. Assim, as cianobactérias adaptaram-se

aos altos níveis de radiação solar por meio da produção de compostos, como citoneminas, que possuem propriedades fotoprotetoras e antioxidantes (RUČOVÁ; VILKOVÁ; SOVOVÁ; VARGOVÁ *et al.*, 2023). Citonemina é um pigmento amarelo-marrom, solúvel em lipídios, encontrado exclusivamente na bainha extracelular das cianobactérias, onde age como um escudo contra radiação UV, absorvendo cerca de 90% de radiação incidente (KUMARI; PANDEY; GUPTA; MISHRA *et al.*, 2023).

Os Carotenoides são pigmentos, que também são sintetizados pelas cianobactérias, que podem apresentar uma grande variedade de cores, variando entre amarelo, laranja, vermelho e roxo (CHINI ZITTELLI; LAUCERI; FARALONI; SILVA BENAVIDES *et al.*, 2023). Essa classe de pigmentos é bem disseminada em cianobactérias, macrófitas aquáticas e plantas vasculares (PUDDICK; NAEHER; PEARMAN; PAGE *et al.*, 2023). São pigmentos intracelulares geralmente encontrados em membranas celulares e auxiliam na montagem e função dos complexos fotossintéticos. Nas cianobactérias, esse pigmento não atua apenas como pigmento acessório para captura de luz, mas também como agentes fotoprotetores quando as células estão expostas ao estresse luminoso, como alta intensidade de luz e radiação ultravioleta (NATESUNGNOEN; PONGRAKHANANON; LINDBLAD; JANTARO, 2023).

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

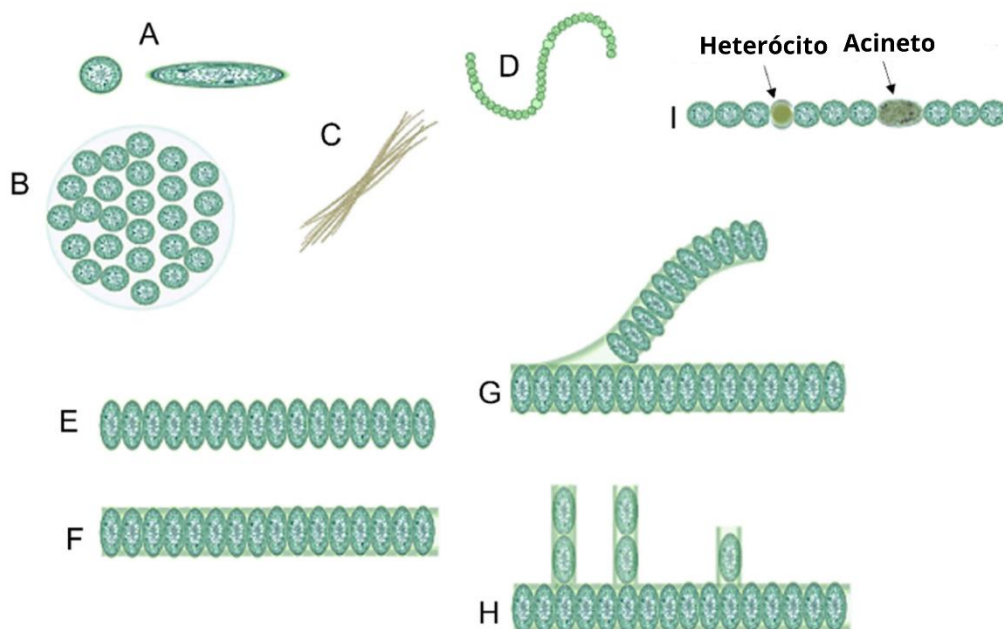
### **2.1. Cyanobacteria**

As cianobactérias foram, e continuam sendo, um dos organismos mais importantes a habitar a Terra e o alvo de diversos estudos biológicos, biotecnológicos, ecológicos e evolutivos (GARCIA-PICHEL; ZEHR; BHATTACHARYA; PAKRASI, 2020). Seus ancestrais desenvolveram a capacidade de fotossíntese oxigênica, assim tornando possível a oxigenação primária da atmosfera e dos oceanos terrestres. Além disso, acredita-se que cianobactérias endossimbiontes originaram a fotossíntese em organismos eucariontes (SÁNCHEZ-BARACALDO; BIANCHINI; WILSON; KNOLL, 2022), o que embasado pela Teoria da Endossimbiose. A fotossíntese oxigênica é um dos metabolismos mais importantes a ter evoluído na Terra, pois permitiu o surgimento de formas de vida mais derivadas (SÁNCHEZ-BARACALDO; CARDONA, 2020).

Acreditam-se que as cianobactérias estejam presentes no planeta Terra a cerca de 3,5 bilhões de anos (KHALIFA; SHEDID; SAIED; JASSBI *et al.*, 2021) e essa

datação é possível graças aos estromatólitos, os registros fósseis mais antigos da vida na Terra que são formados através de interações complexas entre comunidades microbianas e seu ambiente geoquímico (POPALL; BOLHUIS; MUYZER; SÁNCHEZ-ROMÁN, 2020). Eles são um dos marcos da biosfera primitiva da Terra e dominaram o ecossistema do Pré-cambriano, no início do Arqueano (HUANG; CHEN; WU; FENG, 2022).

Devido ao seu longo período de evolução, o grupo Cyanobacteria consegue habitar uma grande variedade de ambientes, desde água doce e marinha até ecossistemas terrestre; também são capazes de suportar e viver em habitats extremos, incluindo ambientes geotérmicos, sistemas congelados e ambientes hipersalinos (MEHDIZADEH ALLAF; PEERHOSSAINI, 2022). Dentro dos grupos procarióticos, as cianobactérias são um dos grupos mais morfologicamente diversificados, com formas de crescimento que vão de unicelulares a filamentosas, multicelulares ou coloniais (SÁNCHEZ-BARACALDO; CARDONA, 2020), como mostrado na Figura 1.



**Figura 1.** Representação das diferentes formas das cianobactérias: **A** - unicelulares esféricas e elípticas; **B** - coloniais; **C** - filamentosas; **D** - espiralada; **E** - tricoma sem bainha; **F** - tricoma com bainha; **G** - ramificação falsa; **H** - ramificação verdadeira; **I** - diferentes tipos de células em cianobactérias filamentosas (heterócito – célula especializada para fixação do nitrogênio atmosférico; acineto – célula de resistência). Imagem adaptada de MEHDIZADEH ALLAF e PEERHOSSAINI (2022).

As cianobactérias evoluíram durante um período em que a ausência da camada de ozônio permitia a penetração de radiação UV nociva (UVC e UVB) na atmosfera do planeta, tornando os ambientes aquáticos e terrestres extremamente estressantes (BROWNE; OTERO; MURRAY; SAHA, 2023). Logo, um dos mecanismos adaptativos para tolerar esse stress abiótico foi a síntese de compostos absorvedores de UV, como as cioneminas (RUPALI; SHARMA, 2021). Ademais, como o O<sub>2</sub> é altamente reativo, é provável que as cianobactérias primárias - os primeiros produtores de O<sub>2</sub> biogênico - tenham sofrido pressão seletiva, resultando na evolução de antioxidantes mais eficientes (BODEN; KONHAUSER; ROBBINS; SÁNCHEZ-BARACALDO, 2021).

A ampla distribuição das cianobactérias se dá a sua capacidade de lidar com diversos tipos de fatores como privação de nutrientes, flutuações de luz e temperatura, e estresses oxidativos, térmicos e osmóticos (RACHEDI; FOGLINO; LATIFI, 2020), esse sucesso evolutivo é intimamente ligado a produção de metabólitos secundários (NOWRUZI; SARVARI; BLANCO, 2020), com propriedades antioxidantes, fotoprotetoras, hidratantes, alelopáticas e tóxicas, que incluem pigmentos, polissacarídeos, ácidos graxos e peptídeos. Esses compostos bioativos encontrados em cianobactérias têm grande potencial para serem utilizados na formulação ou produção de fármacos (PERERA; HERATH; SANJEEWA; JAYAWARDENA, 2023).

## 2.2. Complexo *Nostoc*

*Nostoc* é um gênero de cianobactérias, primeiramente descrito por BORNET e FLAHAULT (1888), que pode ocorrer em habitats aquáticos de água doce, hidroterrestres e euterrestres em todo o mundo (ŘEHÁKOVÁ; JOHANSEN; CASAMATTA; XUESONG et al., 2007). *Nostoc* é identificado morfológicamente pela presença de filamentos unisseriados isopolares não ramificados com cadeias diferenciadas de acinetos e heterócitos terminais e intercalares incorporados em material mucilaginoso, formando colônias (SINGH; ŠNOKHOUSOVÁ; SARAF; SURADKAR et al., 2020).

Sua taxonomia é considerada complicada e problemática, porém com o advento de abordagens polifásicas, alguns gêneros foram separados do complexo *Nostoc* na tentativa de tornar este gênero menos polifilético, incluindo *Mojavia*, *Desmonostoc*, *Halotia*, *Aliinostoc*, *Komarekiella* e *Desikacharya* (CAI; YU; LIU; SUN et al., 2021). A abordagem polifásica multidisciplinar integra ciclo de vida, morfologia

e ultraestrutura, dados genéticos, ecológicos e bioquímicos, levando ao estabelecimento de uma taxonomia sólida para as cianobactérias (PECUNDO; CHEN; DELA CRUZ; GRIFFITH *et al.*, 2023).

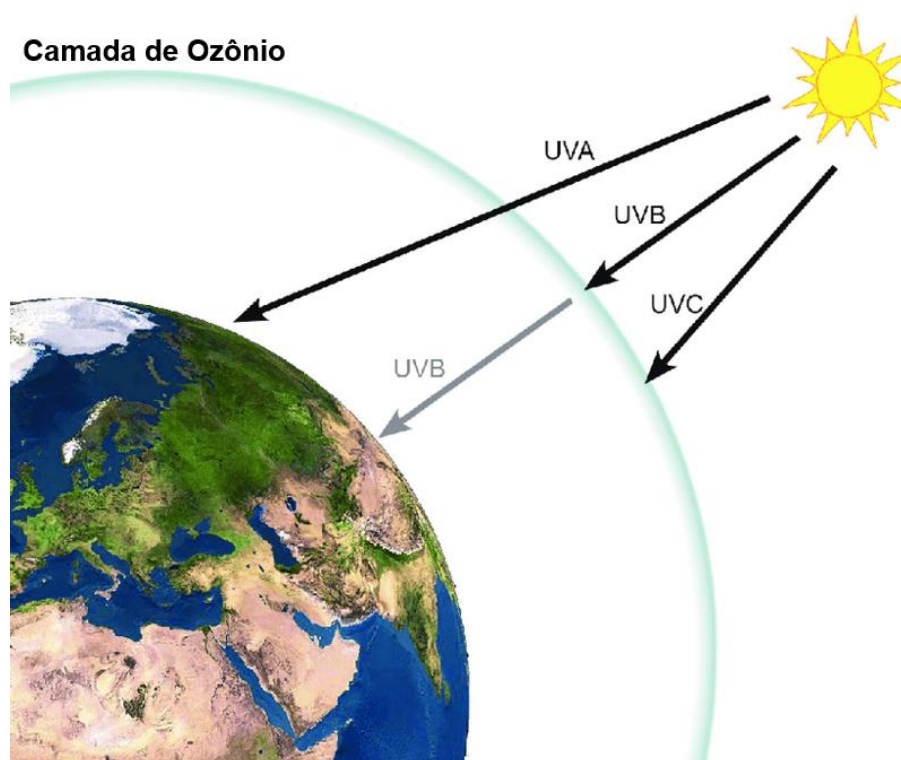
Segundo JASSER; KHOMUTOVSKA; SANDZEWICZ; ŁACH *et al.* (2024), as cianobactérias do complexo *Nostoc* são conhecidas por produzirem vários tipos de compostos biologicamente ativos. O gênero *Nostoc* é reconhecido pelas suas aplicações ambientais e biotecnológicas, sendo considerado um dos grupos de cianobactérias mais promissoras, pois é capaz de produzir substâncias anti-UV, como citoneminas e aminoácidos do tipo micosporina (MAAs), dentre outras aplicações – como a promoção do aumento do crescimento de plantas derivadas (MOUGA; PEREIRA; MOREIRA; AFONSO, 2024). Além de algumas espécies, como *Nostoc commune*, poderem ser usadas, com êxito, na restauração de terras sódicas e áreas salinas devido a sua alta tolerância ao estresse salino (YADAV; SINGH; ALODAINI; HATAMLEH *et al.*, 2023).

### **2.3. Radiação UV**

A Terra tem sido irradiada pela luz solar desde sua formação. À medida que as formas de vida evoluíram no oceano, elas foram expostas à luz solar e a energia do sol foi eficientemente utilizada pelos primeiros fitoplanctons na produção de carboidratos como sua fonte de energia (MICHAEL F, 2016). A luz solar é um espectro contínuo de radiação eletromagnética que é dividido em três espectros de comprimento de onda principais: ultravioleta, luz visível e infravermelho (NARAYANAN; SALADI; FOX, 2010).

O fator externo mais prejudicial que ameaça a pele é a radiação ultravioleta (UV) (GROMKOWSKA-KĘPKA; PUŚCION-JAKUBIK; MARKIEWICZ-ŻUKOWSKA; SOCHA, 2021), cada componente da radiação UV pode exercer uma variedade de efeitos sobre tecidos, células e moléculas (ORAZIO; JARRETT; AMARO-ORTIZ; SCOTT, 2013). A energia UV pode ser subdividida em três classes: UVA, UVB e UVC, com base em propriedades eletrofísicas. Os fótons UVC possuem os comprimentos de onda mais curtos ( $\lambda = 100-280$  nm) e a maior energia, UVA apresenta os mais longos ( $\lambda = 315-400$  nm) porém os fótons são menos energéticos e UVB apresenta o meio termo ( $\lambda = 280-320$  nm) (GROMKOWSKA-KĘPKA; PUŚCION-JAKUBIK; MARKIEWICZ-ŻUKOWSKA; SOCHA, 2021; ORAZIO; JARRETT; AMARO-ORTIZ;

SCOTT, 2013). Aproximadamente cerca de 90 a 99% da energia UVR solar que atinge a superfície terrestre é UVA, enquanto apenas 1 a 10% é UVB (NARAYANAN; SALADI; FOX, 2010). A radiação UVC, ao contrário da radiação UVA e UVB, é completamente absorvida pela camada de ozônio (GROMKOWSKA-KĘPKA; PUŚCION-JAKUBIK; MARKIEWICZ-ŻUKOWSKA; SOCHA, 2021), como demonstrado na Figura 2.

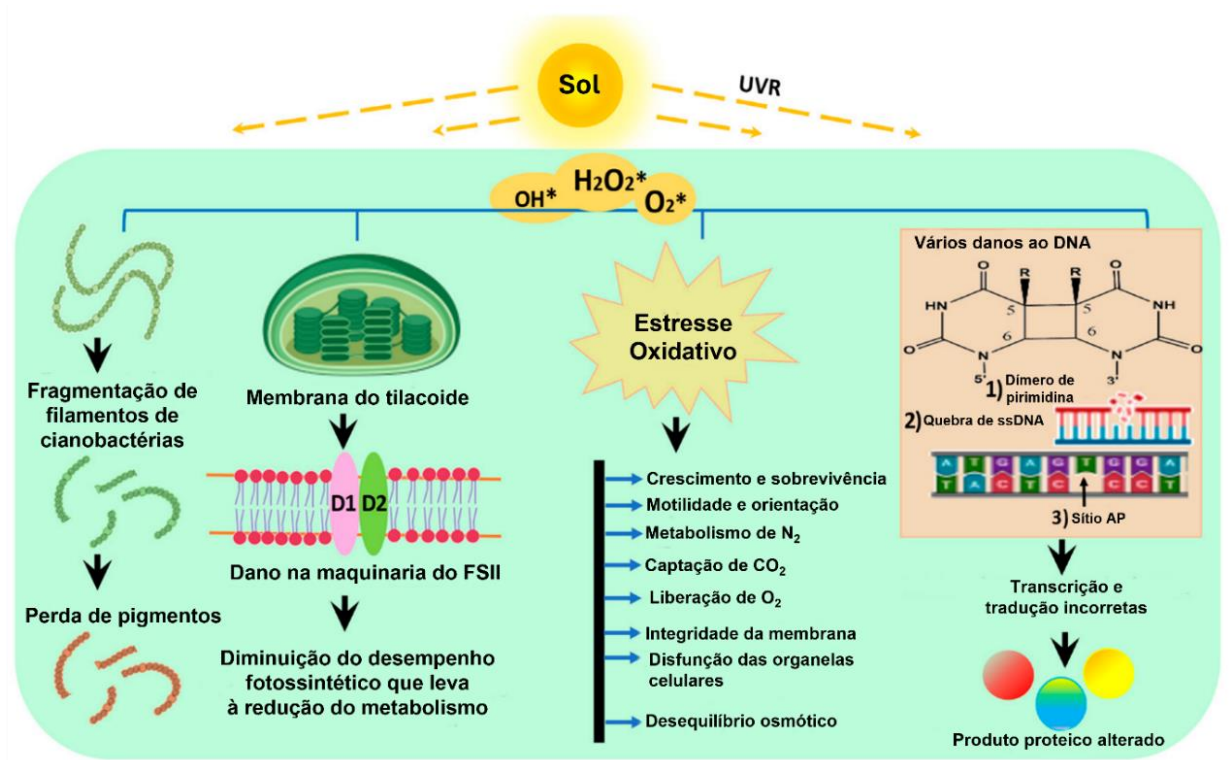


**Figura 2.** Esquema representando como diferentes tipos de radiação UV penetram ou interagem com a camada de ozônio. Adaptado de ZIELINSKA-DABKOWSKA (2014).

Cianobactérias são organismos fotossintéticos, ou seja, esses organismos utilizam a radiação solar fotossinteticamente ativa na conversão da luz em energia química (JACINAVICIUS; GERALDES; CRNKOVIC; DELBAJE *et al.*, 2021). A procura por radiação solar expõe as cianobactérias a doses nocivas de radiação UVB e UVA, simultaneamente, em seus habitats naturais (SINGH; JHA; RANA; MISHRA *et al.*, 2023). A radiação UV (especialmente UVB) pode afetar as respostas fisiológicas e bioquímicas das cianobactérias. Ademais, acredita-se que as cianobactérias são mais suscetíveis ao estresse causado pela radiação UVB do que as algas eucarióticas, pois

sofrem mais danos relacionados ao DNA (EL-SHEEKH; ALWALEED; IBRAHIM; SABER, 2021).

A radiação UVB é considerada potencialmente perigosa pois afeta biomoléculas e estruturas celulares, além de poder bloquear reações enzimáticas e interferir em processos fisiológicos, como motilidade e orientação. UVB também pode desencadear a formação de espécies reativas de oxigênio dentro da célula. Em relação a fotossíntese, ela é especialmente sensível ao dano causado por radiação UVB. Dentre outros alvos, a radiação danifica a proteína D1 na cadeia transportadora de elétrons do fotossistema II e também afeta pigmentos secundários que atuam na captação de energia, como as ficobiliproteínas (HÄDER; WILLIAMSON; WÄNGBERG; RAUTIO *et al.*, 2015). Em contrapartida, a radiação UVA não é absorvida diretamente pelo DNA, mas ainda pode induzir danos a essa molécula. A radiação UV é capaz de afetar o DNA e suas características morfológicas, bem como a diferenciação celular, propriedades elásticas, composição de ficobiliproteínas, perfil de proteínas, desenvolvimento, sobrevivência, pigmentação, orientação, processos metabólicos e captura de  $^{14}\text{CO}_2$  (SINGH; JHA; RANA; MISHRA *et al.*, 2023). Na Figura 3 é possível observar outros possíveis efeitos da radiação UV nas cianobactérias.



**Figura 3.** Representação esquemática dos possíveis efeitos da irradiação UV em cianobactérias. UVR: Radiação UV; FSII: Fotossistema II; ssDNA: DNA fita simples. Adaptado de SINGH; JHA; RANA; MISHRA et al. (2023).

Como uma forma de mitigar os efeitos nocivos da radiação UV, as cianobactérias desenvolveram estratégias adaptativas. Uma dessas estratégias se caracteriza pela biossíntese de metabólitos secundários, como MAAs e os pigmentos conhecidos como cioneminas, que atuam como um escudo anti-UV (JACINAVICIUS; GERALDES; CRNKOVIC; DELBAJE *et al.*, 2021).

#### 2.4. Estresse Salino

Salinidade é um dos fatores abióticos mais importantes em diversos habitats naturais de microrganismos, fluando bastante em decorrência de mudanças geográficas – como o fluxo de marés – e climáticas, como chuva e dissecação (LIANG; ZHANG; WANG; ZHANG *et al.*, 2020). Cianobactérias, em particular, se distribuem por uma ampla gama de ambientes com diferentes concentrações salinas e várias espécies podem se adaptar a condições de salinidade variáveis, com a habilidade de prosperar em ambientes extremos (ROCHA; ESTEBAN LUCAS-BORJA; PEREIRA; MUÑOZ-ROJAS, 2020).

Estresse significa a interrupção da homeostase, resultando em mudanças no metabolismo celular que, em alguns casos, podem induzir a superprodução de

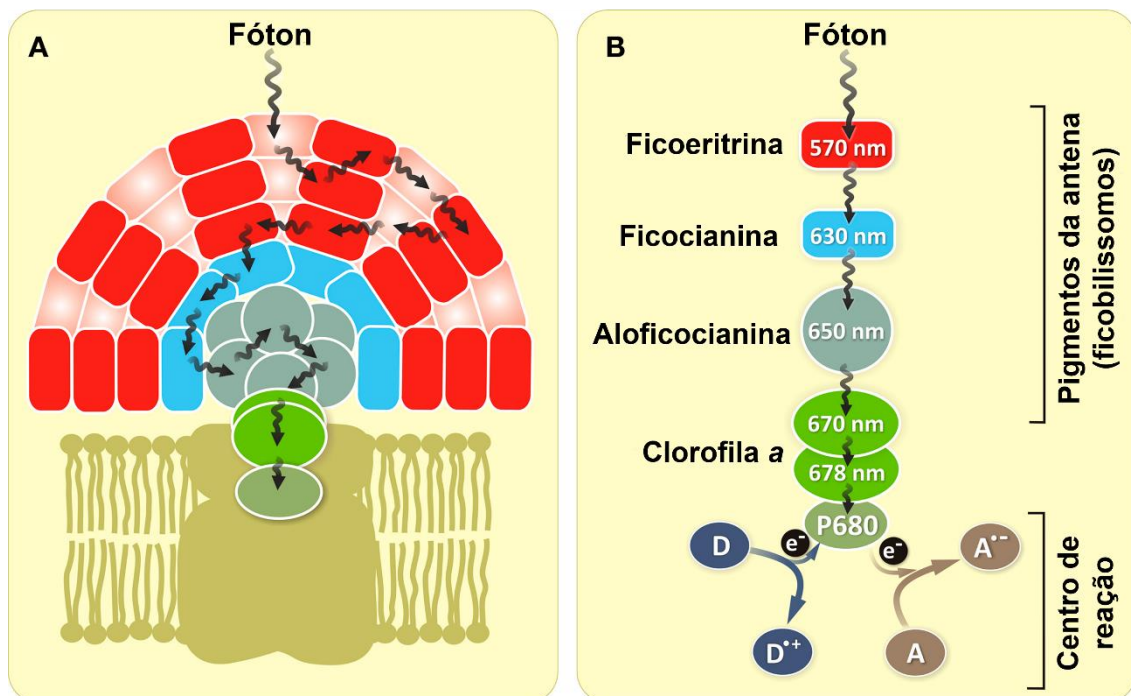
metabólitos secundários desejáveis durante a aclimação e a restauração da homeostase (SHEIBANI MADRAHI; NAEIMPOOR, 2023a). Baixas concentrações de  $\text{Na}^+$  auxiliam na regulação do pH em cianobactérias, além de contribuírem na fixação de nitrogênio e de dióxido de carbono (YANG; WANG; LIU; SUI, 2020), enquanto a alta salinidade é um estresse abiótico crítico, pois causa efeitos prejudiciais no crescimento das cianobactérias, podendo desencadear estresses iônicos, osmóticos e oxidativos, que podem interferir no processo fotossintético, quebrar os grupos funcionais de enzimas e proteínas, entre outros. Logo, estudos que se concentrem nos mecanismos de tolerância ao sal são necessários nas cianobactérias (CUI; SUN; CHEN; ZHANG, 2020).

As cianobactérias evoluíram diversos mecanismos fisiológicos para lidar com o estresse salino (YANG; WANG; LIU; SUI, 2020). A tolerância à salinidade em muitas cianobactérias pode ser devido à operação de diferentes tipos de antiportadores  $\text{Na}^+/\text{H}^+$ , que desempenham um papel fundamental na manutenção de baixas concentrações de sódio na célula ou até mesmo ao aumento da atividade fotossintética e à acumulação de solutos compatíveis (GR; YADAV; CHATRATH; GERARD *et al.*, 2021). A salinidade também é considerada efetiva na regulação da produção de cetonemina (SHEIBANI MADRAHI; NAEIMPOOR, 2023a), além de atuar na biossíntese de carotenoides, importante no combate a espécies reativas de oxigênio (GR; YADAV; CHATRATH; GERARD *et al.*, 2021).

## **2.5. Ficobiliproteínas**

As cianobactérias, por serem capazes de realizar fotossíntese oxigênica, compartilham com as algas eucarióticas os mesmos pigmentos básicos e pigmentos acessórios (clorofila *a* e carotenoides, respectivamente). Ademais, as cianobactérias apresentam um sistema fotossintético único, com a presença de pigmentos proteicos denominados ficobiliproteínas (HOTOS; ANTONIADIS, 2022), que conseguem transferir energia de forma muito eficiente para clorofila *a* (GOVINDJEE; SHEVELA, 2011). Essas proteínas absorvem luz em regiões do espectro visível onde a clorofila *a* tem baixa absorção, principalmente nas zonas verde e amarela do espectro de luz, representando cerca de 50% do total de proteínas celulares nas cianobactérias (PAGELS; GUEDES; AMARO; KIJJOA *et al.*, 2019)

As ficobiliproteínas formam os ficobilissomos, que são grandes complexos hidrossolúveis capazes de absorver energia solar e transferir energia para o fotossistema I e o fotossistema II, absorvendo principalmente a luz visível na faixa de 490-650 nm (KAWAKAMI; HAMAGUCHI; HIROSE; KOSUMI *et al.*, 2022). Identificado primeiramente na década de 1960 (ADIR; BAR-ZVI; HARRIS, 2020), a unidade básica dos ficobilissomos é um heterodímero de uma subunidade  $\alpha$  e uma subunidade  $\beta$  (frequentemente chamado de monômero  $\alpha\beta$ ) (ZHENG; ZHENG; LI; WANG *et al.*, 2021). As ficobiliproteínas que formam os ficobilissomos são principalmente categorizadas em três tipos: ficoeritrinas nas extremidades distais das hastes (que absorvem luz de alta energia); ficocianinas nas porções adjacentes ao núcleo das hastes (que absorvem luz de energia intermediária); e aloficocianinas, os principais componentes do núcleo (que absorvem luz de baixa energia) (SUI, 2021), como mostrado na Figura 4.



**Figura 4.** Organização estrutural do ficobilissomo. **A** – Etapas do transporte de energia dentro do complexo de antena; **B** – Pigmentos, e seus respectivos picos de absorção, que fazem parte desse complexo. Adaptado de GOVINDJEE e SHEVELA (2011).

Estudos sobre o potencial bioativo das ficobiliproteínas vem crescendo em diferentes áreas, incluindo as indústrias alimentícia, cosmética, têxteis e farmacêuticas. As vantagens do uso das ficobiliproteínas é que elas são obtidas de

fontes renováveis e abundantes, possuem boa estabilidade, biocompatibilidade e bioatividade (KOVALESKI; KHOLANY; DIAS; CORREIA *et al.*, 2022). As ficobiliproteínas, especialmente a ficoeritrina, produzidas por várias espécies de cianobactérias, exibem uma grande variedade de atividades farmacológicas, como antioxidante, anticancerígena, neuroprotetora, anti-inflamatória, hepatoprotetora e hipocolesterolêmica (PANDEY; PANDEY; VIBHU, 2013). Além da ficoeritrina, as ficocianinas extraídas de cianobactérias são usadas como pigmento para produtos alimentícios (uma das poucas opções para corantes naturais de cor azul claro), e apresentam atividades antioxidantes, anti-inflamatórias e anticancerígenas (JAESCHKE; TEIXEIRA; MARCZAK; MERCALI, 2021).

É visto que ao passar dos anos as ficobiliproteínas são cada vez mais usadas como corantes naturais em alimentos e cosméticos, principalmente devido aos riscos à saúde humana oferecidos pelos corantes sintéticos, como a toxicidade e carcinogenicidade encontradas nesses compostos, enquanto os corantes naturais são mais saudáveis e apresentam menos efeitos colaterais (JI; QIU; WANG; ZHAO *et al.*, 2023). A ficocianina e a ficoeritrina são as duas proteínas mais essenciais nas ficobiliproteínas, com cores azul e vermelha, respectivamente, que conferem apelo visual direto a alimentos como queijo, iogurte, sorvete e chiclete (MA; HU; SHA; MENG *et al.*, 2024).

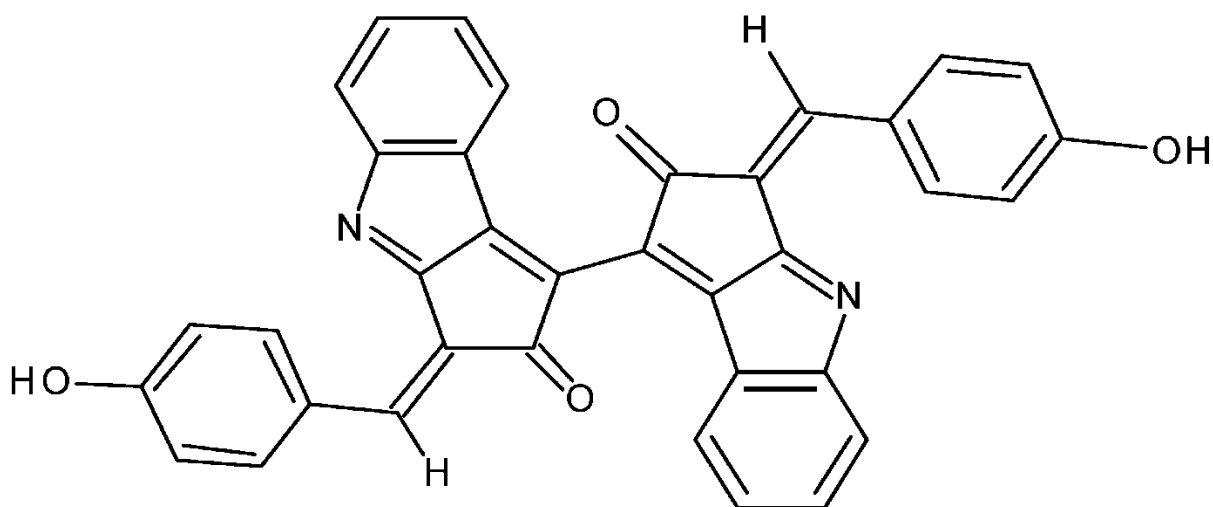
É sabido que as ficobiliproteínas possuem um forte potencial antioxidante, pois são capazes de eliminar espécies reativas de oxigênio e aumentar a quantidade de enzimas antioxidantes. Apresentando, assim, potencial para o tratamento de uma variedade de doenças causadas pelo estresse oxidativo (LI; SU; PU; CHEN *et al.*, 2019).

## **2.6. Citonemina**

Citonemina é um pigmento lipossolúvel, com coloração que vai do amarelo ao marrom, sintetizado exclusivamente por cianobactérias em resposta, principalmente, ao estresse causado por radiação ultravioleta A (UVA) – atuando como um composto fotoprotetor (PATHAK; PANDEY; MAURYA; RAJNEESH *et al.*, 2020). Esse pigmento se acumula na bainha extracelular das cianobactérias, onde atua como um escudo anti-UV, podendo absorver até 90% da radiação incidente (PANDEY; PATHAK; SINGH; AHMED *et al.*, 2020). NÄGELI (1849) foi o primeiro pesquisador a relatar a

presença de citonemina em cepas de cianobactérias terrestres, porém evidências fósseis e moleculares estimam que a idade mínima para o surgimento das citoneminas é por volta de 2 bilhões de anos (LARA; DEMOULIN; VANSTEENKISTE; JAVAUX, 2023).

Esse composto é um dímero constituído por uma subunidade indólica e uma subunidade fenólica, ligadas por uma ligação carbono-carbono. A citonemina possui uma forma oxidada (com coloração amarela e peso molecular de 544 Da) e uma forma reduzida (apresenta coloração vermelha e peso molecular de 546 Da), e três derivados: dimetoxiscitonemina, tetrametoxiscitonemina e scyt (GAO; JING; LIU; LINDBLAD, 2021). As citoneminas são consideradas moléculas relativamente pequenas, com fórmula molecular  $C_{36}H_{20}N_2O_4$  e peso molecular de 544,566 g/mol (PATHAK; PANDEY; MAURYA; RAJNEESH *et al.*, 2020). A Figura 5 apresenta a estrutura química da citonemina. Esse alcaloide apresenta pico de absorção *in vivo* em UVA ( $\lambda_{max} = 370$  nm) e UVC ( $\lambda_{max} = 250$  nm), além de absorção substancial na região de UVB (280–320 nm) (SHEIBANI MADRAHI; NAEIMPOOR, 2023b).



**Figura 5.** Estrutura química da citonemina. Fonte: KANG; JO; LEE; YOON *et al.* (2020).

Tapetes microbianos em regiões entremarés, biofilmes aderidos a rochas, monumentos, cascas de árvores e superfícies de solo com crostas de cianobactérias em ecossistemas áridos ou semiáridos são habitats bem conhecidos para cianobactérias capazes de biossintetizar citonemina (SHEIBANI MADRAHI; NAEIMPOOR, 2023a). Além da irradiação UV, a presença e a interação de vários outros fatores abióticos podem influenciar a síntese desse fotoprotetor em

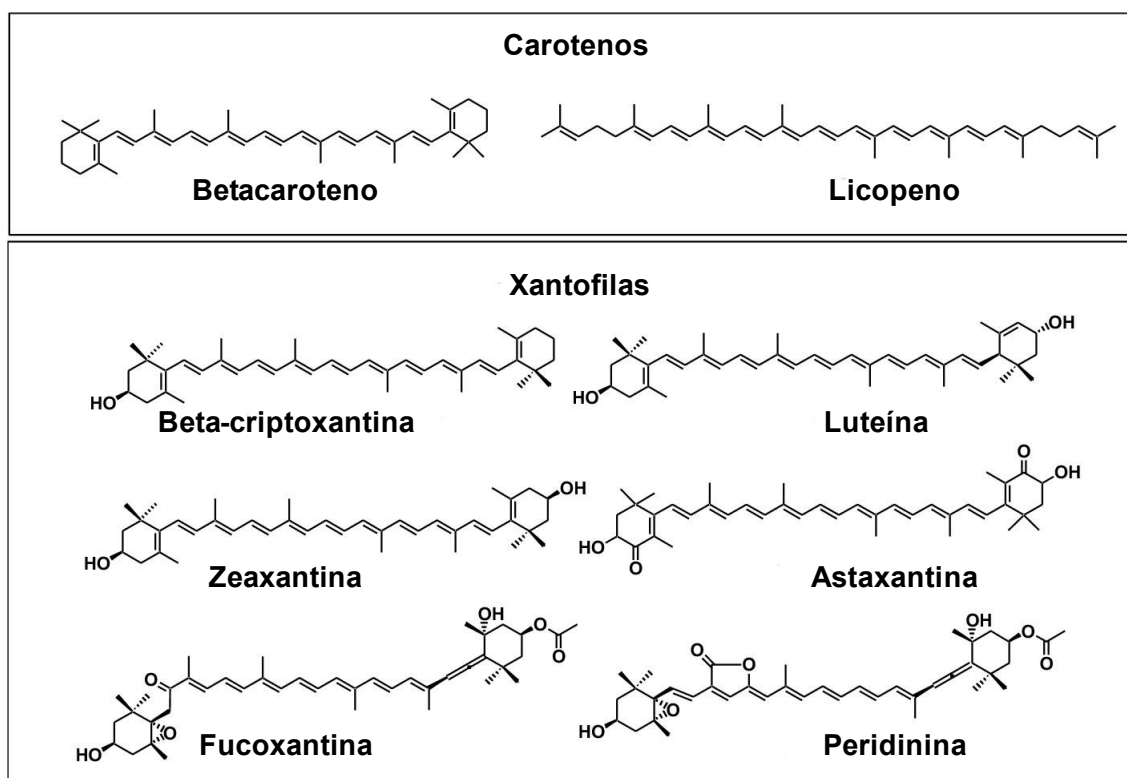
cianobactérias. Por exemplo, a concentração de sal, dessecação, disponibilidade de nutrientes como nitrogênio, ciclo claro-escuro, estresses osmóticos e fotooxidativos, e temperatura (SEN; MALLICK, 2022). A biossíntese desse composto pode ser regulada como parte de uma via bastante complexa de resposta a estresse, estimulada por diversos fatores ambientais (SHEIBANI MADRAHI; NAEIMPOOR, 2023a). Cepas de cianobactéria dos gêneros *Nostoc*, *Scytonema*, *Calothrix*, *Lyngbya*, *Rivularia*, e *Chlorogloeopsis* são conhecidas pela produção de citonemina (GAO; JING; LIU; LINDBLAD, 2021).

Citonemina é um agente fotoprotetor UV bem conhecido, e cada vez mais vem sendo sugerido o uso desse pigmento no desenvolvimento de novos cosmecêuticos (KANG; JO; LEE; YOON *et al.*, 2020). Além da proteção UV, a citonemina também apresenta propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e antiproliferativas (GAO; YUAN; ZHENG; JI, 2023). A propriedade hidrofóbica desse composto permite a fácil combinação com bases oleosas, hidratantes bifásicos, cremes anidros e ceras, muitos dos quais, sendo à prova d'água, tendem a ter maior eficiência na proteção solar (SHEIBANI MADRAHI; NAEIMPOOR, 2023a). As propriedades inerentes da citonemina, como fotoestabilidade e absorção eficaz de UV, a tornam um possível protetor solar natural e ecologicamente amigável, em oposição aos abióticos atualmente disponíveis (SHEIBANI MADRAHI; NAEIMPOOR, 2023b). Isso demonstra que citonemina pode ser potencialmente utilizada como protetor solar e antioxidante na indústria cosmética (PATHAK; PANDEY; MAURYA; RAJNEESH *et al.*, 2020).

## **2.7. Carotenoides**

Carotenoides são pigmentos tetraterpenos, que exibem coloração que varia entre amarelo, laranja, vermelho e roxo. Esses pigmentos são considerados os mais bem distribuídos na natureza, encontrados em bactérias fotossintetizantes, algumas espécies de archaea e fungos, plantas e animais (MAOKA, 2020). Carotenoides são pigmentos essenciais na fotossíntese, principalmente na captura de luz (FABROWSKA; MESSYASZ; SZYLING; WALKOWIAK *et al.*, 2018), mas também possuem papel importante na fotoproteção (PANDEY; PATHAK; SINGH; AHMED *et al.*, 2020). Eles absorvem luz na região do espectro visível, em comprimentos de onda em que a clorofila não consegue absorver (SAINI; PABBI; SHUKLA, 2018). Esses pigmentos lipossolúveis absorvem luz no comprimento de onda de 400-550 nm (NOVOVESKÁ; ROSS; STANLEY; PRADELLES *et al.*, 2019).

Baseado em sua estrutura química, os carotenoides são classificados em carotenoides primários e carotenoides secundários. Os pigmentos fotossintéticos são considerados carotenoides primários, com papel vital na fotossíntese (NABI; ARAIN; RAJPUT; ALAGAWANY *et al.*, 2020), enquanto os carotenoides secundários são produzidos apenas quando o organismo é submetido a situações específicas, como alta incidência luminosa (NOVOVESKÁ; ROSS; STANLEY; PRADELLES *et al.*, 2019). Os carotenoides também podem ser subdivididos em carotenos, que apresentam moléculas lineares ou ciclizadas com um ou dois anéis em suas extremidades, sem átomos de oxigênio, e xantofilas, que são derivados oxigenados dos carotenos (PAGELS; VASCONCELOS; GUEDES, 2021), a Figura 6 apresenta a estrutura química de alguns representantes dos carotenos e das xantofilas.



**Figura 6.** Estrutura química de representantes das classes dos carotenos e das xantofilas. Adaptado de MAOKA (2020).

Cianobactérias podem sintetizar uma grande variedade de carotenoides, com o  $\beta$ -caroteno e os seus derivados, como zeaxantina, equinenona e nostoxantina, sendo os mais comumente encontrados nesses procariontes (SUGIYAMA; TAKAICHI, 2020). Nesses organismos, as etapas iniciais da biossíntese visam produzir o produto intermediário chamado fitoeno, que possui 40 carbonos em sua cadeia. Uma vez produzido esse precursor comum, um número considerável de processos químicos e

enzimáticos ocorrem várias vezes e, combinados alternadamente, podem resultar em uma ampla gama de arranjos estruturais dos diferentes carotenoides (PÉREZ-GÁLVEZ; VIERA; ROCA, 2020).

Pigmentos sintetizados por microalgas e cianobactérias são conhecidos por suas propriedades altamente atrativas para uso industrial em alimentos, rações, produtos farmacêuticos, nutracêuticos e cosméticos, principalmente devido à sua cor e propriedades bioativas, além de serem componentes naturais e ecologicamente amigáveis (PAGELS; PEREIRA; VICENTE; GUEDES, 2021). Carotenoides são compostos bioativos com potencial antioxidante, anti-inflamatório, antitumoral, e antimicrobiano, que podem ser utilizados na alimentação animal e na fabricação de cosméticos antioxidantes e antienvelhecimento, por exemplo (PAGELS; VASCONCELOS; GUEDES, 2021), e também são usados comercialmente como corantes naturais e ingredientes em suplementos nutricionais (GONZÁLEZ-PEÑA; ORTEGA-REGULES; ANAYA DE PARRODI; LOZADA-RAMÍREZ, 2023).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo Geral:**

Conhecer e avaliar a produção de ficobiliproteínas, carotenoides e citionemina por cianobactérias do tipo-*Nostoc* expostas a radiação UV e estresse salino.

#### **3.2. Objetivos Específicos:**

- Otimizar o crescimento das cepas selecionadas para obtenção de biomassa;
- Conhecer as melhores condições para produção dos metabólitos de interesse;
- Avaliar a cepa com maior produção dos metabólitos de interesse;
- Avaliar o fator de proteção solar (FPS) dos extratos.

### **4. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **4.1. Seleção das Cepas**

As cepas de cianobactérias foram obtidas da Coleção de Cultura de Cianobactérias e Algas de Pernambuco (CCAPE). Foram selecionadas três cepas de cianobactérias, sendo duas isoladas de ambientes terrestres do domínio Mata Atlântica e outra de um açude, todas do estado de Pernambuco, conforme apresentado na Tabela 1. As cepas foram selecionadas por pertencerem ao complexo *Nostoc*, grupo de cianobactérias com possível potencial de produção de compostos bioativos.

**Tabela 1.** Lista das cepas selecionadas, incluindo o seu código, local de coleta, substrato de onde foi isolada e identificação. CCAPE: Coleção de Cultura de Cianobactérias e Algas de Pernambuco.

<b>Código da Cepa</b>	<b>Local de Coleta</b>	<b>Substrato</b>	<b>Identificação</b>
CCAPE 77	Estação ecológica de Tapacurá/PE	Banco de madeira	<i>Nostoc interbryum</i>
CCAPE 85	Estação ecológica de Tapacurá/PE	Estipe de coqueiro	<i>Nostoc</i> sp.1
CCAPE 102	Açude de Apipucos/PE	Açude-Fitoplâncton	<i>Nostoc</i> sp.2

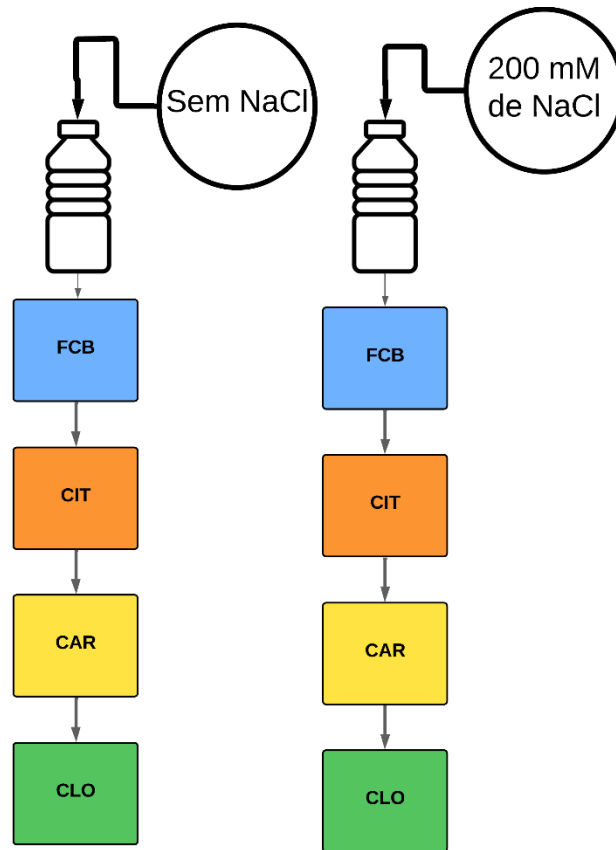
#### **4.2. Cultivo**

O cultivo foi baseado nas recomendações de JACINAVICIUS; GAMA JÚNIOR; AZEVEDO e SANTANNA (2013) em que as cepas são mantidas em meio ASM-1 à  $24 \pm 2$  °C e irradiância de cerca de  $30 \mu\text{mol.fótons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , com lâmpadas led brancas/frias, com um ciclo de luz/escuro (14h/10h). As cepas são submetidas a agitação constante para otimizar o crescimento e a obtenção de biomassa.

#### **4.3. Desenho experimental para Estresse Salino**

Primeiramente, a biomassa fresca das cianobactérias foi centrifugada, concentrada e pesada para obtenção do peso fresco. Então, a biomassa foi distribuída uniformemente entre todas as réplicas de todos os tratamentos, em garrafas de plástico contendo 150 mL de meio ASM-1 em triplicatas, destinados ao experimento de salinidade em dois tratamentos: concentração de NaCl em 200 mM e meio ASM-1 sem adição de sal como controle (Figura 7). A salinidade final de cada réplica foi analisada utilizando refratômetro. As cepas foram expostas aos tratamentos por 72 horas.

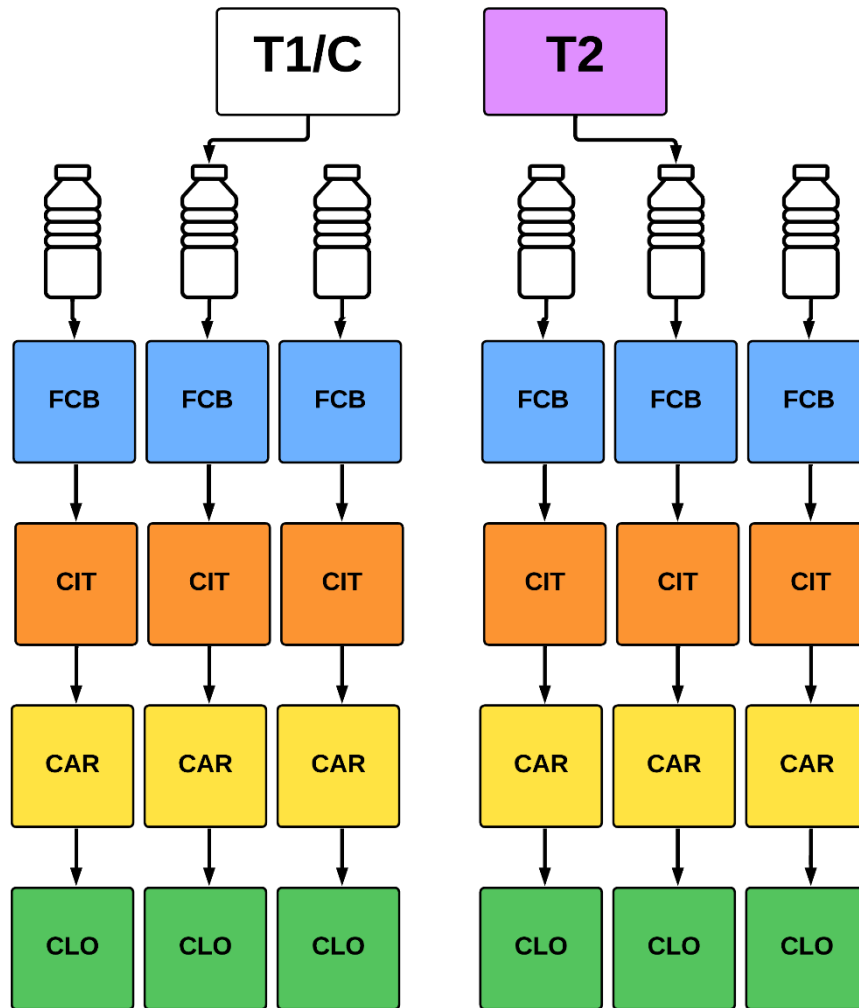
Por último, a biomassa de cada tratamento foi liofilizada, pesada e usada na extração e análise dos pigmentos de interesse.



**Figura 7.** Fluxograma representando o desenho experimental para estresse salino. FCB: Ficobiliproteínas; CIT: Citonemina; CAR: Carotenoides; CLO: Clorofila *a*.

#### 4.4. Desenho Experimental para Irradiação UV

A biomassa fresca foi distribuída da mesma forma que o tratamento salino. Para avaliar a produção de ficobiliproteínas, citonemina e carotenoides, as cepas foram expostas a dois tratamentos: o primeiro tratamento (T1/C) consiste em exposição apenas a luz branca, considerada como radiação fotossinteticamente ativa, enquanto o segundo tratamento (T2) consiste em exposição a uma composição mista entre radiação UVA (lâmpada actínica – 400 a 320 nm), radiação UVB e luz branca, como apresentado na Figura 8. Em ambos os tratamentos as cepas foram expostas por 72 horas. Ao fim desse período, a biomassa de cada tratamento foi liofilizada, pesada e usada na extração e análise dos pigmentos de interesse.



**Figura 8.** Fluxograma representando o desenho experimental para irradiação UV. T1: Luz Branca; C: Controle; T2: Luz Branca, radiações UVA e UVB; FCB: Ficobiliproteínas; CIT: Citonemina; CAR: Carotenoides; CLO: Clorofila *a*.

#### 4.5. Extração e Análise de Ficobiliproteínas

A extração e análise de ficobiliproteínas foram realizadas de acordo com KOVACIK; JEZBEROVÁ; KOMÁRKOVÁ; KOPECKY *et al.* (2011). Para tanto, a biomassa liofilizada foi submetida à maceração, em pistilo e almofariz de ágata, utilizando 6 mL de tampão fosfato 0,1 M (pH= 7,4) – feito com 20,214 g de fosfato de sódio heptahidratado dibásico e 3,394 g de fosfato monobásico monohidratado para 1 L de água deionizada, com pH posteriormente ajustado para 7,4 utilizando HCl 1N ou NaOH 1N - para o rompimento das células. Em seguida, os extratos foram centrifugados, por 5 minutos à 4.000 rpm, e o sobrenadante foi recolhido com cuidado e a biomassa reservada para extrações posteriores.

A produção de ficobiliproteínas foi avaliada por método espectrofotométrico, utilizando o espectrofotômetro Bel UV-M51 UV-VIS, no qual os extratos de tampão

fosfato foram lidos nos pontos de absorvância nos seguintes comprimentos de onda: 562, 615 e 652 nm. Para calcular a concentração de ficobiliproteínas serão utilizadas as equações:  $C_{PC}=(A_{615}-0,474*A_{652})/5,34$  para ficocianina,  $C_{APC}=(A_{652}-0,208*A_{615})/5,09$  para aloficocianina e  $C_{PE}=(A_{562}-2,41*(C_{PC})-0,849*(C_{APC}))/9,62$  para ficoeritrina.

#### 4.6. Extração e Análises de Carotenoides, Clorofila a e Citonemina

A extração e análise de carotenoides, clorofila a e citonemina foram baseadas em GARCIA-PICHEL; SHERRY e CASTENHOLZ (1992); GARCIA-PICHEL e CASTENHOLZ (1991). A biomassa reservada (pós-extração com tampão fosfato) foi ressuspendida em 6 mL do solvente acetona 100%. Em seguida, o extrato foi centrifugado a 4.000 rpm por 5 minutos e o sobrenadante foi recolhido cuidadosamente.

O extrato foi lido no espectrofotômetro Bel UV-M51 UV-VIS nos comprimentos de ondas de 384, 490 e 663 nm para avaliar a produção e acúmulo de citonemina, carotenoides e clorofila a, respectivamente. Para calcular o acúmulo de citonemina fora utilizada a seguinte equação:  $A_{384}=1,04A_{384}-0,79A_{663}-0,27A_{490}$ . A equação para o cálculo do acúmulo de carotenoides e clorofila a são, respectivamente:  $A_{490}=1,02A_{490}-0,08A_{384}-0,026A_{663}$  e  $A_{663}=1,02A_{663}-0,027A_{384}+0,01A_{490}$  (GARCIA-PICHEL; SHERRY; CASTENHOLZ, 1992; GARCIA-PICHEL; CASTENHOLZ, 1991).

#### 4.7. Determinação do Fator de Proteção Solar (FPS) dos Extratos Obtidos

Seguindo as recomendações de DUTRA; OLIVEIRA; KEDOR-HACKMANN e SANTORO (2004), os dados de absorvância dos extratos foi registrada na faixa de 290 à 320 nm, com intervalos de 5 em 5 nm. Após obtenção dos dados, o FPS foi calculado de acordo com a equação sugerida por MANSUR; BREDER; MANSUR e AZULAY (1986):

$$FPS = FC \times \sum_{290}^{320} EE(\lambda) \times I(\lambda) \times Abs(\lambda)$$

Sendo: EE – Efeito eritemogênico da radiação de comprimento de onda ( $\lambda$ ); I – Intensidade do sol no comprimento de onda ( $\lambda$ ); Abs – Absorvância da amostra no comprimento de onda ( $\lambda$ ); FC – Fator de correção (=10). Os valores de  $EE \times I$  são

constantes e foram determinados por SAYRE; AGIN; LEVEE e MARLOWE (1979), apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Função de produto normalizada utilizada no cálculo do FPS (SAYRE; AGIN; LEVEE; MARLOWE, 1979). EE - Efeito eritemogênico da radiação de comprimento de onda ( $\lambda$ ); I - Intensidade do sol no comprimento de onda ( $\lambda$ )

Comprimento de onda ( $\lambda$ nm)	EE ( $\lambda$ ) x I ( $\lambda$ )
290	0,0150
295	0,0817
300	0,2874
305	0,3278
310	0,1864
315	0,0839
320	0,0180
Total	1

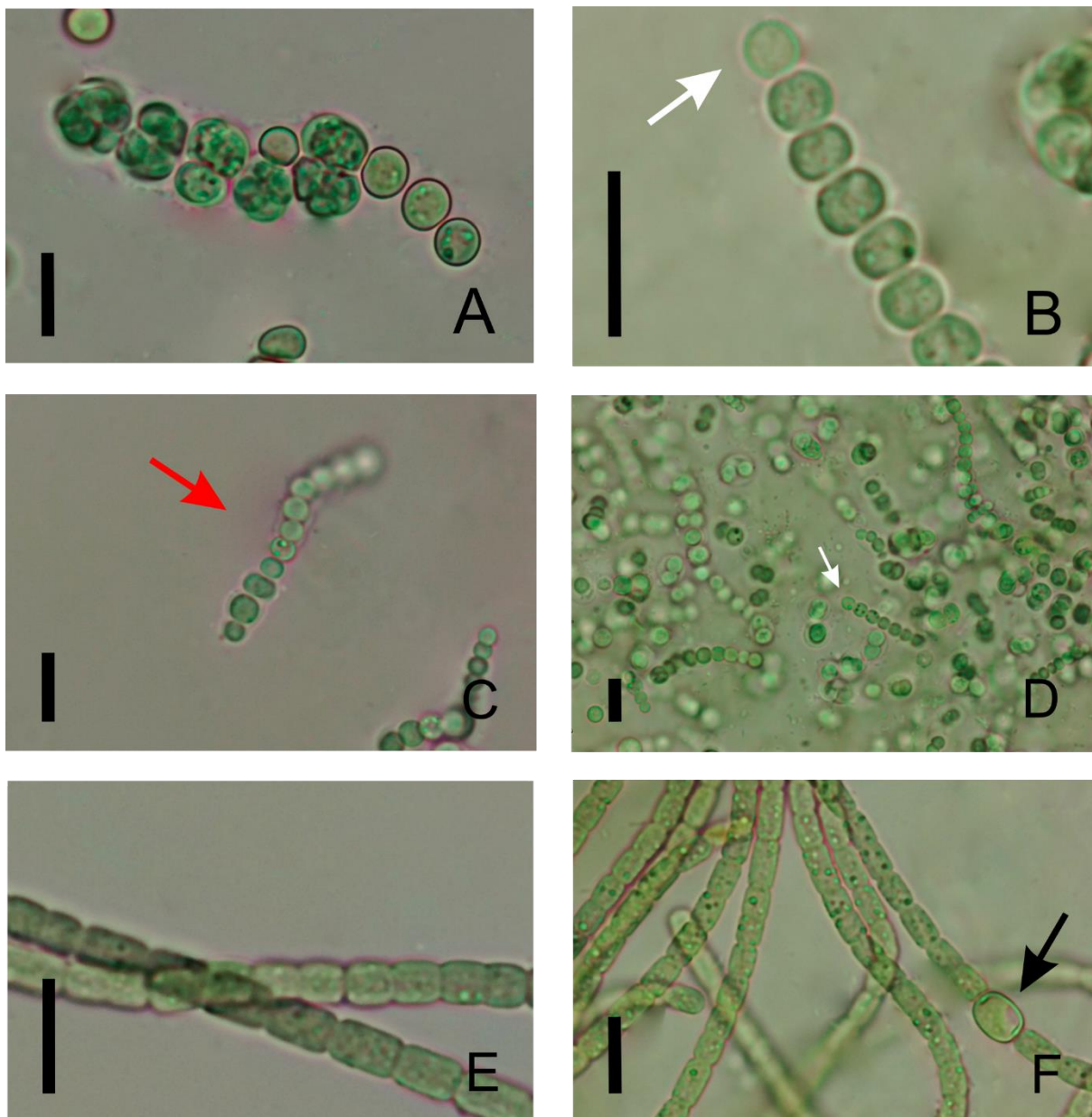
#### 4.8. Análises Estatísticas

Os dados de produção de pigmentos entre os tratamentos foram avaliados quanto à normalidade, pelo teste de Shapiro-Wilk, e quanto a homoscedasticidade, e então comparados por ANOVA *one-way* e teste a posteriori de Tukey para observar a diferença entre os tratamentos quanto à produção de ficobiliproteínas, carotenoides, citonemina e clorofila *a* (ou correspondente não paramétrico, casos os dados não tenham distribuição normal). Foram considerados significativos os valores de **p<0,05**. As análises foram realizadas utilizando o software GraphPad Prism®.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Identificação Taxonômica

As cepas de cianobactérias utilizadas nesse projeto foram previamente isoladas e identificadas, e estão mantidas na Coleção de Cultura de Cianobactérias e Algas de Pernambuco (CCAPE). As três cepas foram identificadas como do gênero *Nostoc*; uma delas (CCAPE 77) foi identificada em nível específico como *Nostoc interbryum*, uma espécie típica de casca de árvore. As cianobactérias escolhidas estão apresentadas na Figura 9. O sistema de classificação empregado foi o proposto por STRUNECKÝ; IVANOVA e MAREŠ (2023).



**Figura 9.** Cianobactérias utilizadas no estudo. A-B: *Nostoc interbryum* CCAPE 77; C-D: *Nostoc* sp.1 CCAPE 85; E-F: *Nostoc* sp.2 CCAPE 102. Seta vermelha: Filamento unisseriado sem ramificações; Seta branca: Heterócito terminal; Seta preta: Heterócito intercalar. Barra de escala: 10 µm

## 5.2. Crescimento e rendimento da biomassa

Foi possível observar que a agitação constante das culturas aumentou visualmente o volume da biomassa das cepas selecionadas. A cepa CCAPE 85 foi a que apresentou o maior volume de biomassa ao final do período de crescimento (cerca de 6 meses). O peso fresco final, após o período total de cultura, da biomassa de cada cepa se encontra na Tabela 3.

**Tabela 3.** Peso fresco (em g) das cepas utilizadas. CCAPE: Coleção de Cultura de Cianobactérias e Algas de Pernambuco.

Código da cepa	Peso fresco (g)
<i>Nostoc interbryum</i> CCAPE 77	1,869 g
<i>Nostoc</i> sp.1 CCAPE 85	25,4015 g
<i>Nostoc</i> sp.2 CCAPE 102	2,9843 g

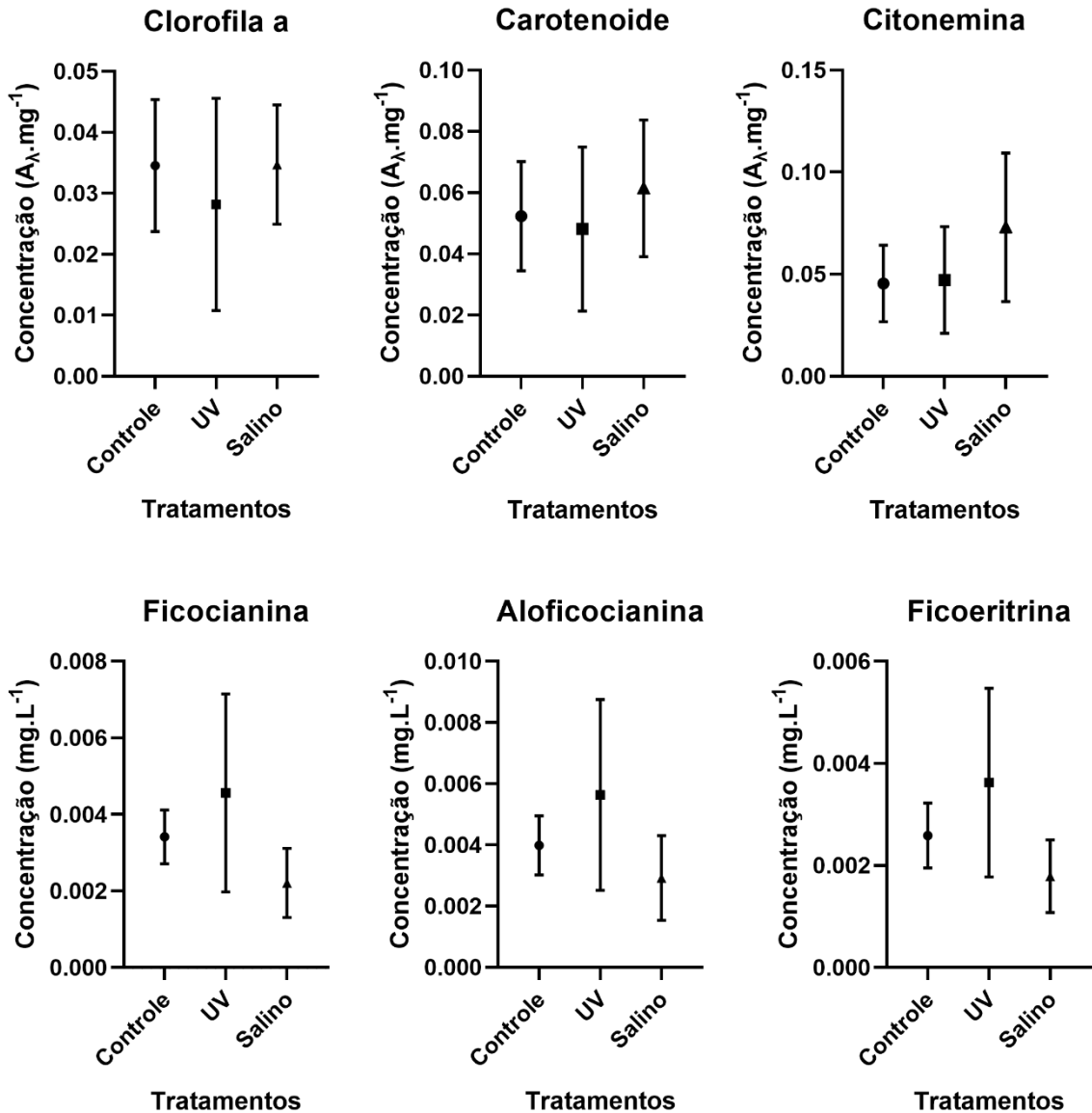
### 5.3. Efeito dos estresses na concentração de pigmentos

Após as análises, foi possível observar o efeito dos estresses avaliados (salino e irradiação UV) na produção de pigmentos de interesse (e.g., carotenoides, cioneminas e ficobiliproteínas) por cianobactérias pertencentes ao complexo *Nostoc*. Para o estresse de irradiação UV, as cepas foram expostas a uma combinação entre radiação UVA, radiação UVB e luz branca (comprimentos de luz fotossinteticamente ativos). Já para o estresse salino, as cepas foram expostas ao meio de cultura onde fora previamente adicionado 200 mM de NaCl, a salinidade final do meio adicionado com sal foi de 10%. A concentração de pigmentos também foi avaliada em cianobactérias expostas a condições normais de cultivo da CCAPE (i.e., meio sem adição de NaCl e irradiadas com lâmpadas led brancas), considerado o controle do experimento.

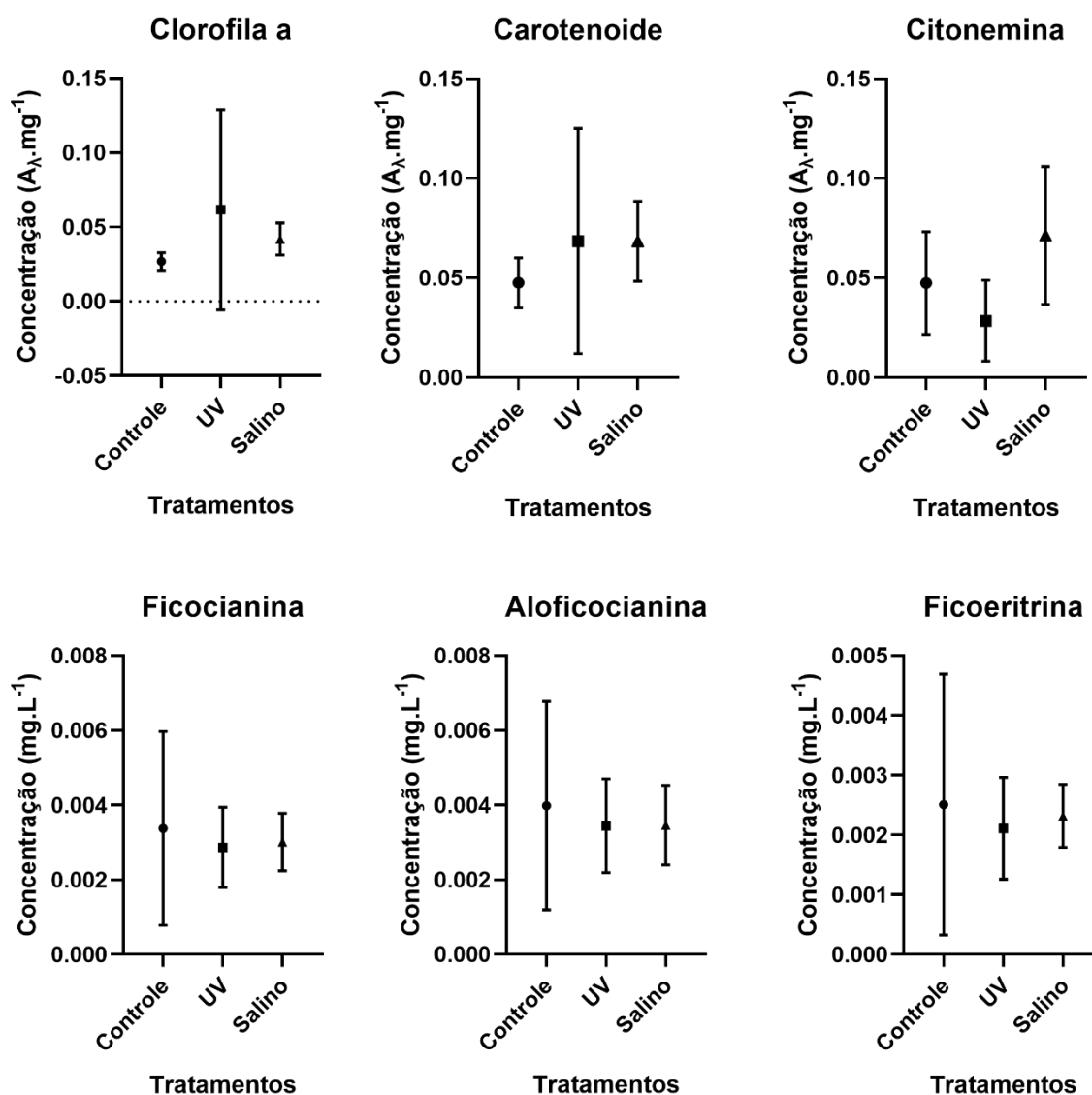
Como mostrado na Figura 10 e Figura 11, as cepas CCAPE 77 *Nostoc interbryum* e CCAPE 102 *Nostoc* sp.2 apresentaram concentrações de todos os pigmentos investigados, em todos os tratamentos a que foram expostas, mesmo que em baixas concentrações. Contudo, não foi observada diferença significativa entres os tratamentos para nenhum dos pigmentos analisados. A baixa concentração dos pigmentos para essas duas cepas pode estar relacionada à baixa quantidade de biomassa utilizada na extração.

Em cianobactérias é visto um relação sinérgica entre carotenoides e clorofila *a*, em que a síntese de clorofila é diminuída em favorecimento da síntese de carotenoides como resposta a estressores ambientais (YU; XU; LIU; YAN *et al.*, 2024). O metabolismo de carotenoides é fundamental para a fotossíntese, a captação de luz e a fotoproteção em organismos fotossintéticos, e é visto que a sua síntese é aumentada em cianobactérias sob condições estressantes (ALVAREZ; YANG; SAITO; BALAKRISHNA *et al.*, 2024). Para além disso, os carotenoides derivados de cianobactérias têm recebido atenção especial devido à sua diversidade,

acessibilidade e abundância, isso pode ser devido as células de cianobactérias apresentarem caminhos biossintéticos mais complexos para formar alguns carotenoides exclusivos (e.g., mixoxantofila) (HUANG; XU; LIN; CHEUNG, 2024).



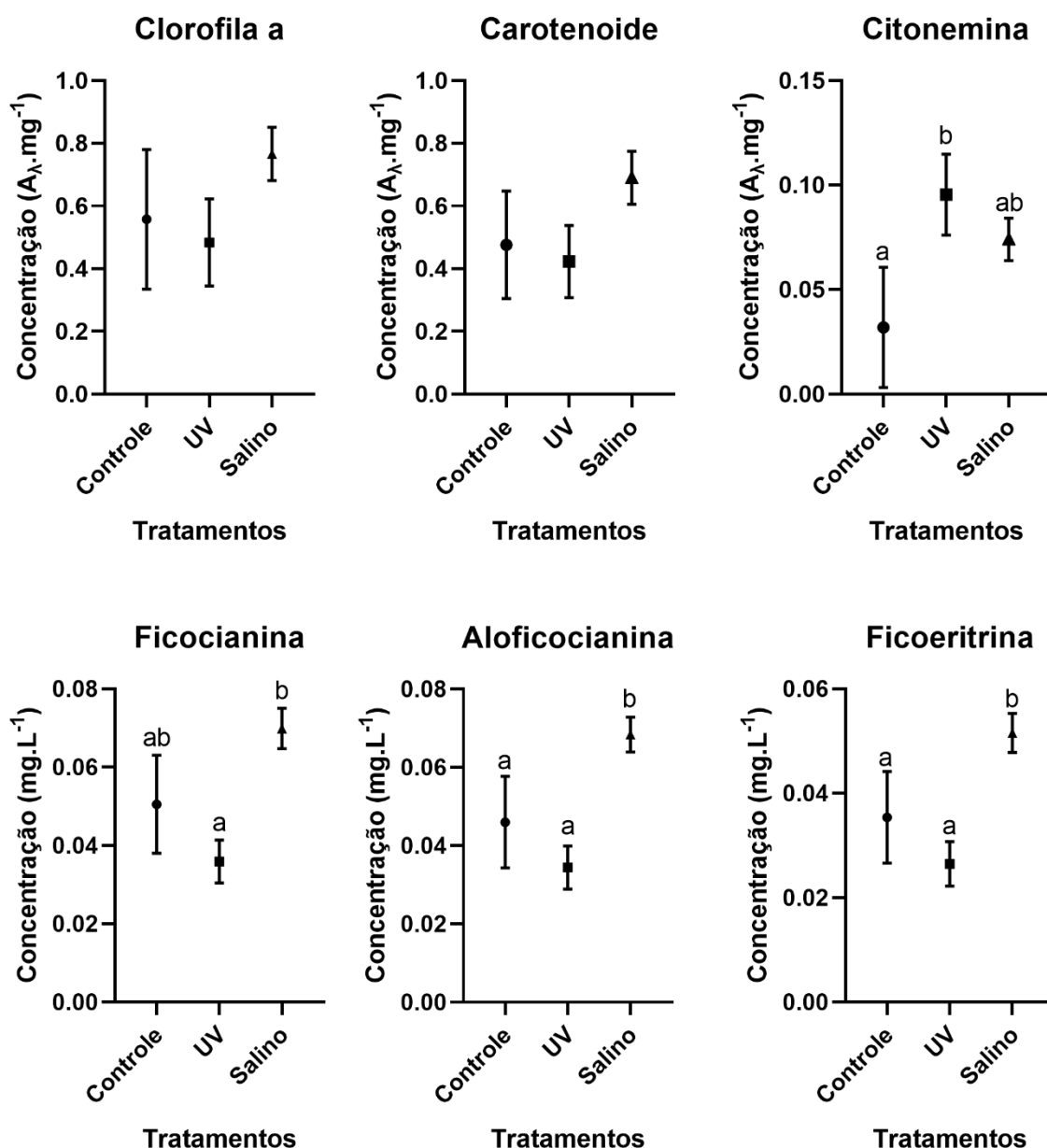
**Figura 10.** Valores médio e desvio padrão da concentração de clorofila a, carotenoides, citoneminas, ficocianina, alococianina e ficoeritrina para a cepa *Nostoc interbryum* CCAPE 77 quando exposta a diferentes tratamentos.



**Figura 11.** Valores médio e desvio padrão na concentração de clorofila a, carotenoides, citoneminas, ficocianina, aloficocianina e ficoeritrina para a cepa *Nostoc* sp.2 CCAPE 102 quando exposta a diferentes tratamentos.

A cepa *Nostoc* sp.1 CCAPE 85 (Figura 12) também exibiu concentração dos metabólitos de interesse para todos os tratamentos. Todavia, a concentração do pigmento citonemina foi significativamente maior ( $p= 0,0227$ ) no tratamento de exposição à radiação UV (UVA e UVB) em relação ao tratamento controle (luz branca). É visto que a citonemina atua de forma passiva e demonstra proteger a maquinaria fotossintética dos danos causados pela irradiação UVA, especialmente quando a atividade metabólica não é possível (SOULE; STOUT; SWINGLEY; MEEKS *et al.*, 2007). A produção significativa de citonemina no tratamento de exposição à radiação UV, em comparação com o controle, comprova, ainda mais, que a síntese de

citonemina está diretamente relacionada com a exposição à radiação UVA, faixa em que absorve mais radiação incidente ( $\lambda_{\max}= 384$  nm). Também é visto que a citonemina pode absorver cerca de 90% da radiação UVA total que incide sobre as células (BALSKUS; WALSH, 2008) e pode absorver energia nas regiões UVC (250 nm) e UVB (280-320 nm) (MISHRA; TANDON; KESARWANI; SINGH *et al.*, 2015). Além da radiação UV, o estresse salino também é capaz de induzir a síntese de citonemina (RATH; MANDAL; ADHIKARY, 2012), como pôde ser observado para a cepa CCAPE 85 (Figura 12). A citonemina apresenta importância ecológica e econômica, além de seu potencial para ser utilizado em vários ramos da biologia, incluindo a farmacologia e a astrobiologia (PATHAK; PANDEY; MAURYA; RAJNEESH *et al.*, 2020). As indústrias farmacêutica e cosmética podem utilizar a citonemina isolada de cianobactérias no combate e prevenção ao fotoenvelhecimento e aos danos à pele, criando produtos fotoprotetores e cosmecêuticos (FUENTES-TRISTAN; PARRA-SALDIVAR; IQBAL; CARRILLO-NIEVES, 2019).



**Figura 12.** Valores médio e desvio padrão na concentração de clorofila a, carotenoides, citoneminas, ficocianina, aloficocianina e ficoeritrina para a cepa *Nostoc* sp.1 CCAPE 85 quando exposta a diferentes tratamentos. Letras diferentes representam diferenças significativas.

Além da citonemina, a concentração da ficocianina – uma das ficobiliproteínas com coloração azul – foi significativamente maior ( $p= 0,0063$ ) após exposição à salinidade, em comparação com o tratamento de irradiação UV para a cepa CCAPE 85. Ainda em relação às ficobiliproteínas, a proteína com pigmentação avermelhada (ficoeritrina) e a aloficocianina igualmente foram significativamente mais produzidas no tratamento salino do que nos tratamentos controle (sem salinidade) ( $p= 0,0307$  e  $p= 0,0385$ , respectivamente) e irradiação UV ( $p= 0,0045$  e  $p= 0,0054$ ,

respectivamente) (Figura 12). A maior concentração de ficobiliproteínas após exposição ao estresse salino, em relação ao estresse UV, pode ser devido ao fato de que pigmentos proteicos são os alvos primários da radiação UV (PATHAK; KUMAR; SINGH; AHMED *et al.*, 2022). Não obstante, por mais que a salinidade tenha sido descrita como um fator danoso para cianobactérias isoladas de ambientes não hipersalinos (CASERO; HERRERO; DE LA ROCHE; QUESADA *et al.*, 2024), não foi observado nenhum efeito negativo nas cepas analisadas nesse presente estudo (isoladas de ambientes terrestres e dulcícolas).

As cianobactérias são consideradas como uma das principais fontes naturais de ficobiliproteínas, juntamente com as algas vermelhas, que podem ser utilizados como matéria prima para valiosos produtos de base biológica (BELLVER; ALTAMIRA-ALGARRA; GARCÍA; FERRER *et al.*, 2024). PAGELS; GUEDES; AMARO; KIJOA *et al.* (2019) defendem que condições de alta salinidade, geralmente, inibem a atividade fotossintética e a produção de ficobiliproteínas em cianobactérias. Porém, diversos estudos recentes apontam que a produção de ficobiliproteínas pode ser estimulada em espécies específicas sob condições de alta concentrações de salinidade (LEE; NOH; HONG; LEE *et al.*, 2021), comportamento comprovado pelos dados aqui apresentados. As ficobiliproteínas desempenham um papel importante no complexo de captação de luz, direcionando energia através da clorofila *a* e dos centros de reação fotossintéticos (ASSUNÇÃO; AMARO; TAVARES; MALCATA *et al.*, 2023).

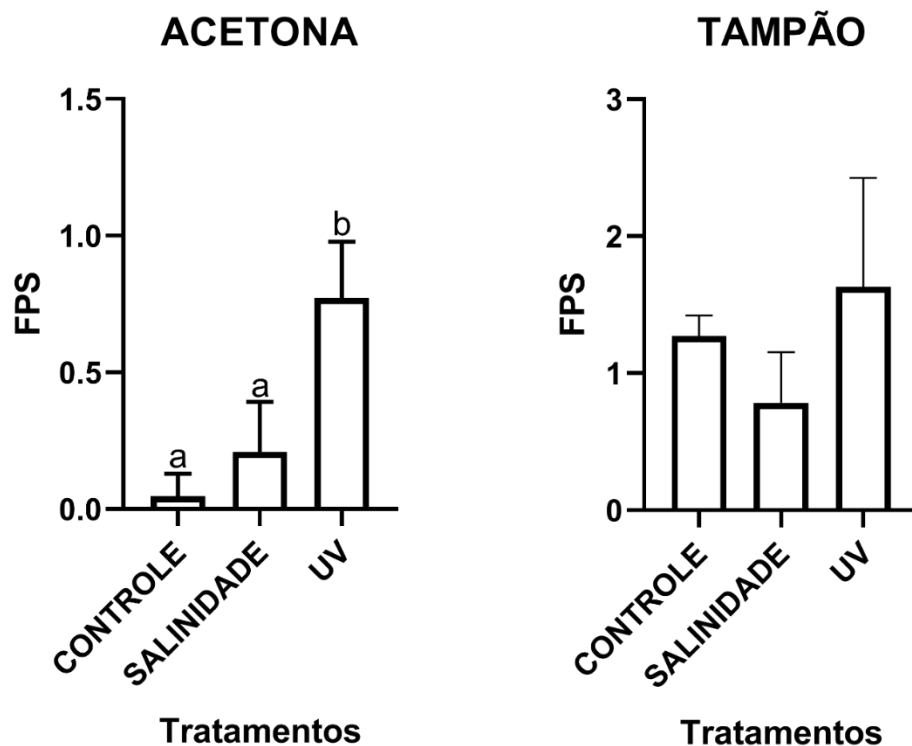
Além disso, essas proteínas são usadas na indústria alimentícia como corantes naturais (para balas, geleias e sorvetes), para aplicações cosméticas (em maquiagem e produtos de cuidados pessoais) e para aplicações biomédicas (e.g., reagente de marcação fluorescente para citometria de fluxo, imunoenensaio fluorescente imunohistoquímica) (LIJASSI; ARAHOU; KOUDI; WAHBY *et al.*, 2024). Diversas organizações ao redor do mundo começaram a restringir o uso de corantes artificiais nos alimentos, visto que esses corantes sintéticos aumentam o risco de câncer e reações alérgicas (MA; HU; SHA; MENG *et al.*, 2024), logo, é essencial a busca por pigmentos de origem natural, como as cianobactérias.

Como visto nesse estudo, as cianobactérias do complexo *Nostoc* possuem um grande potencial de produção e acumulação de metabólitos secundários com atividade biológica, que podem ser utilizados nas mais diversas indústrias. As

cianobactérias são organismos autótrofos de crescimento relativamente mais rápido, passíveis de manipulação genética e que requerem requisitos nutricionais mínimos para seu crescimento (SRIVASTAVA; SHUKLA, 2022). Essas características as tornam uma fábrica microbiana ideal e conferem a elas uma vantagem sobre outros autótrofos (algas e plantas derivadas) e organismos heterotróficos (SRIVASTAVA; THAPA; CHAKDAR; BABELE *et al.*, 2024).

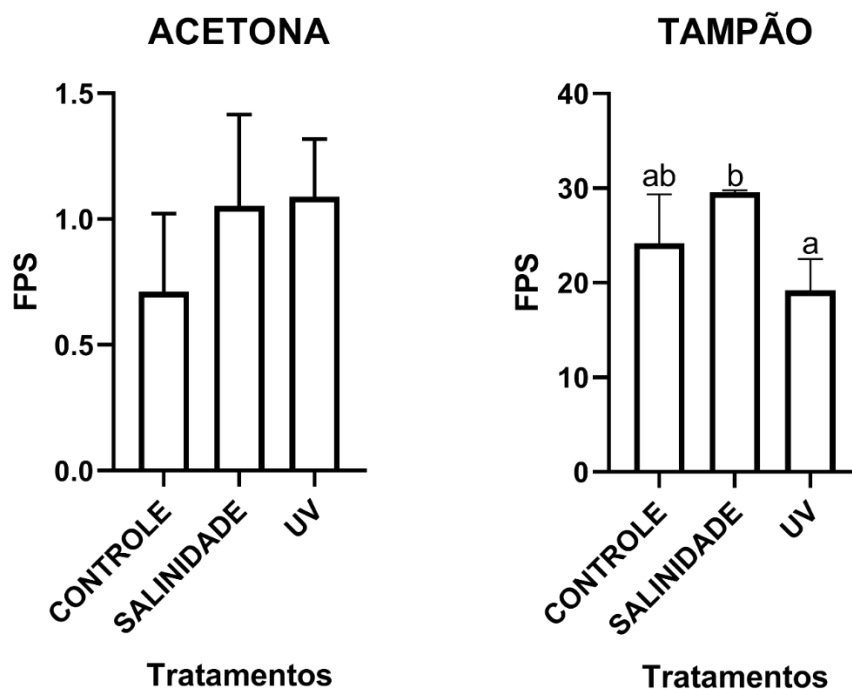
#### **5.4. Fator de Proteção Solar (FPS) dos Extratos Analisados**

O Fator de Proteção Solar (ou FPS) representa a eficácia de agentes fotoprotetores contra radiação UVB. Quanto maior o seu valor, maior o tempo que o composto é capaz de proteger a pele de danos relacionados à irradiação UVB. Os extratos da cepa *Nostoc interbryum* CCAPE 77 (Figura 13) apresentaram valores médios de FPS que vão de 0 a 2, aproximadamente. Os extratos aquosos apresentaram maior FPS, porém sem diferença significativa entre os tratamentos. Para os extratos acetônicos, a amostra exposta a irradiação UV apresentou significativamente maior FPS que as amostras expostas ao controle e a salinidade (**p= 0,0042** e **p= 0,0141**, respectivamente. Isso evidencia que a exposição à radiação UV (nesse caso, uma mistura entre radiação UVA e UVB) favoreceu a produção de compostos capazes de proteger a pele contra essa radiação. Mesmo com valores baixos, é possível o uso dessa cepa na elaboração de produtos fotoprotetores, principalmente como elemento sinérgico a outros compostos mais potentes para a proteção solar (PINHEIRO; ALVES; CAMPOS; FURTADO *et al.*, 2020).



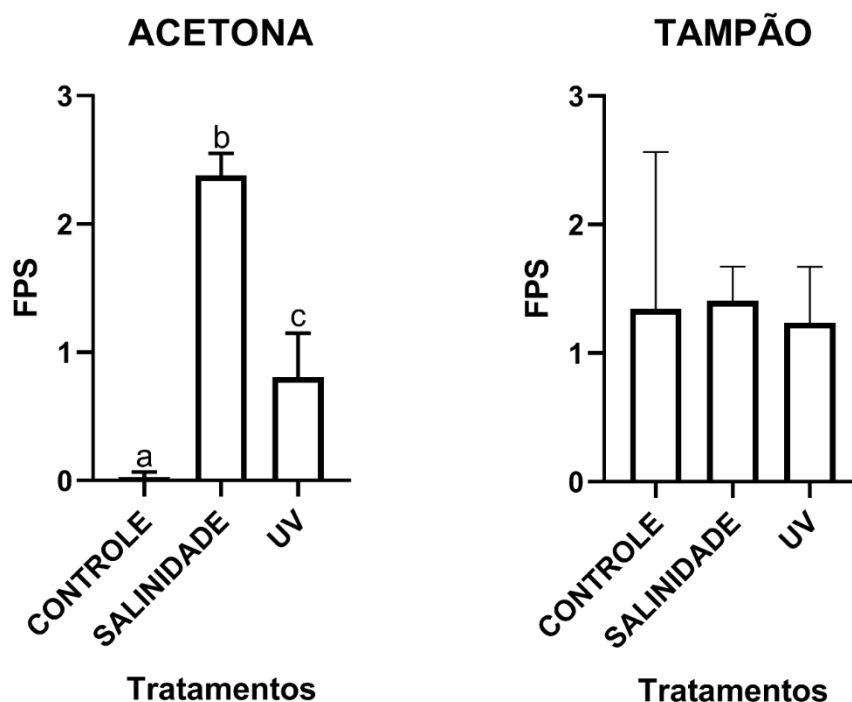
**Figura 13.** Valores médio e desvio padrão no FPS de diferentes extratos (acetona e tampão fosfato) da cepa *Nostoc interbryum* CCAPE 77 exposta a diferentes tratamentos. Letras diferentes representam diferenças significativas.

Para a cepa *Nostoc* sp.1 CCAPE 85 (Figura 14), foi possível observar que os extratos obtidos através de extração com o solvente tampão fosfato 7,4 apresentaram altos valores, entre 20 e 30, de FPS. Ademais, foi possível constatar que o estresse salino foi significativamente mais favorável ( $p= 0,0272$ ) para o Fator de Proteção Solar do que o estresse UV. Em contrapartida, os extratos de acetona apresentaram valores baixos de FPS, entre 0,5 e 1, sem nenhuma diferença significativa entre os tratamentos.



**Figura 14.** Valores médio e desvio padrão no FPS de diferentes extratos (acetona e tampão fosfato) da cepa *Nostoc* sp.1 CCAPE 85 exposta a diferentes tratamentos. Letras diferentes representam diferenças significativas.

Em relação a cepa *Nostoc* sp.2 CCAPE 102, para os extratos de acetona, o tratamento salino apresentou um FPS significativamente maior que os tratamentos controle ( $p < 0,0001$ ) e UV ( $p = 0,0003$ ), exibindo valor, aproximadamente, de 3 FPS. O tratamento de irradiação UV apresentou 1 FPS, fazendo-se significativamente diferente do controle ( $p = 0,0125$ ). Em contrapartida, os extratos aquosos apresentaram FPS constante de cerca de 1 FPS, sem nenhuma diferença significativa entre os tratamentos.



**Figura 15.** Valores médio e desvio padrão no FPS de diferentes extratos (acetona e tampão fosfato) da cepa *Nostoc* sp.2 CCAPE 102 exposta a diferentes tratamentos. Letras diferentes representam diferenças significativas.

Compostos naturais que são filtros de UV seguros e eficazes são potenciais ingredientes de produtos fotoprotetores, pois eles apresentam maior assimilação de UV e capacidade antioxidante quando comparados aos produtos sintéticos (HE; LI; LI; TANG *et al.*, 2021). A busca por compostos fotoprotetores se dá, principalmente, ao fato de que a exposição excessiva a radiação UV causa um impacto negativo, podendo danificar as células e aumentar o risco de doenças cutâneas, como queimaduras solares, fotoenvelhecimento e câncer de pele (MOROCHO-JÁCOME; FREIRE; DE OLIVEIRA; DE ALMEIDA *et al.*, 2021). Devido a importância dos protetores solares, muitos extratos naturais vêm sendo testados para determinar seu potencial fotoprotetor, com isso é possível observar que muitos desses extratos apresentam compostos com atividade fotoprotetora ou sinérgica em associação com filtros solares (PINHEIRO; ALVES; CAMPOS; FURTADO *et al.*, 2020).

A determinação *in vivo* do FPS tem sido utilizada há muitos anos e, embora útil e precisa, consome muito tempo, sendo um processo demorado, caro e que envolve voluntários humanos. Portanto, diversos pesquisadores defendem o uso de métodos *in vitro* para avaliar a eficácia dos compostos na proteção solar (RUČOVÁ; VILKOVÁ;

SOVOVÁ; VARGOVÁ *et al.*, 2023). A maior parte dos extratos avaliados nesse estudo apresentaram baixo FPS, variando entre 0 e 3. Segundo a ANVISA (2012), o fator de proteção solar mínimo aceito é de  $FPS \geq 6$ , assim, esses extratos não podem ser utilizados na formulação de protetores solares como princípios ativos, apenas em conjunto com outros compostos. Ademais, ainda assim podem ser utilizados na formulação desses produtos como coadjuvantes a outros compostos com maior FPS. Mais ainda, os extratos aquosos da cepa *Nostoc* sp.1 CCAPE 85 apresentaram um fator de proteção solar excepcionalmente alto, por volta de 30 FPS. Logo, mostrando ser viável o uso dessa cepa como produto principal na formulação de produtos fotoprotetores. O alto potencial dessa cepa como um filtro solar pode estar relacionada a metabólitos secundários diferentes ao que foram analisados nesse estudo, assim se fazendo a necessidade de novos estudos para caracterizar esses possíveis compostos.

## 6. CONCLUSÃO

Com o objetivo de avaliar a produção de ficobiliproteínas, carotenoides e cionemina por cianobactérias do tipo-*Nostoc* expostas a radiação UV e estresse salino, foram utilizadas três cepas mantidas previamente na CCAPE. As cepas identificadas como *Nostoc interbryum* CCAPE 77, *Nostoc* sp.1 CCAPE 85 e *Nostoc* sp.2 CCAPE 102, apresentaram concentração de todos os pigmentos analisados em todos os tratamentos a que foram expostas, com destaque para a cepa CCAPE 85 que, além de apresentar um ótimo crescimento, produziu significativamente mais cionemina após ser exposta a irradiação UVA e UVB (em comparação com aquelas que foram exposta somente a luz branca) e apresentou concentrações significativas de ficobiliproteínas (i.e., ficocianina, aloficocianina e ficoeritrina) após ser exposta ao estresse salino. Outro objetivo aqui avaliado foi a determinação do FPS dos extratos cianobacterianos, onde foi visto que a maior parte dos extratos das cepas exibiram um FPS baixo ( $\leq 3$ ). Apesar disso, o extrato de tampão fosfato da cepa CCAPE 85 apresentou altos valores de FPS (entre 20 e 30 FPS), assim demonstrando o seu potencial como um ingrediente ativo em formulações fotoprotetoras.

Em vista disso, com esse estudo foi possível comprovar o potencial de cepas pertencentes ao complexo *Nostoc* como produtoras de metabólitos secundários que apresentam potencial de aplicação em diferentes áreas.

## 7. REFERÊNCIAS

- ADIR, N.; BAR-ZVI, S.; HARRIS, D. The amazing phycobilisome. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, 1861, n. 4, p. 148047, 2020/04/01/ 2020.
- ALVAREZ, D.; YANG, Y.; SAITO, Y.; BALAKRISHNA, A. *et al.* Characterization of a  $\beta$ -carotene isomerase from the cyanobacterium *Cyanobacteria aponinum*. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, 379, n. 1914, p. 20230360, 2024/09/30 2024.
- ASSUNÇÃO, J.; AMARO, H. M.; TAVARES, T.; MALCATA, F. X. *et al.* Effects of Temperature, pH, and NaCl Concentration on Biomass and Bioactive Compound Production by *Synechocystis salina*. **Life**, v.13, n. 1, DOI: 10.3390/life13010187.
- BALSKUS, E. P.; WALSH, C. T. Investigating the Initial Steps in the Biosynthesis of Cyanobacterial Sunscreen Scytonemin. **Journal of the American Chemical Society**, 130, n. 46, p. 15260-15261, 2008/11/19 2008.
- BELLVER, M.; ALTAMIRA-ALGARRA, B.; GARCÍA, J.; FERRER, I. *et al.* Enhancing pigment production with cyanobacteria-rich microbiomes: Effect of light quality and exposure time. **Algal Research**, 83, p. 103726, 2024/10/01/ 2024.
- BODEN, J. S.; KONHAUSER, K. O.; ROBBINS, L. J.; SÁNCHEZ-BARACALDO, P. Timing the evolution of antioxidant enzymes in cyanobacteria. **Nature Communications**, 12, n. 1, p. 4742, 2021/08/06 2021.
- BORNET, E.; FLAHAULT, C. **Revision des Nostocacées hétérocystées contenues dans les principaux herbiers de France**. {sn}, 1888.
- BOUYAHYA, A.; BAKRIM, S.; CHAMKHI, I.; TAHA, D. *et al.* Bioactive substances of cyanobacteria and microalgae: Sources, metabolism, and anticancer mechanism insights. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, 170, p. 115989, 2024/01/01/ 2024.
- BROWNE, N.; OTERO, P.; MURRAY, P.; SAHA, S. K. Rapid Screening for Mycosporine-like Amino Acids (MAAs) of Irish Marine Cyanobacteria and Their Antioxidant Potential. **Sustainability**, 15, n. 4, p. 3792, 2023.
- CAI, F.; YU, G.; LIU, Y.; SUN, Y. *et al.* Description of two new species of *Nostoc* from China based on the polyphasic approach. **Fottea**, 21, n. 2, p. 259-271, 2021// 2021.

CASERO, M. C.; HERRERO, M. Á.; DE LA ROCHE, J. P.; QUESADA, A. *et al.* Effect of salinity on scytonemin yield in endolithic cyanobacteria from the Atacama Desert. **Scientific Reports**, 14, n. 1, p. 9731, 2024/04/28 2024.

CHINI ZITTELLI, G.; LAUCERI, R.; FARALONI, C.; SILVA BENAVIDES, A. M. *et al.* Valuable pigments from microalgae: phycobiliproteins, primary carotenoids, and fucoxanthin. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 22, n. 8, p. 1733-1789, 2023/08/01 2023.

CUI, J.; SUN, T.; CHEN, L.; ZHANG, W. Engineering salt tolerance of photosynthetic cyanobacteria for seawater utilization. **Biotechnology Advances**, 43, p. 107578, 2020/11/01/ 2020.

DUTRA, E. A.; OLIVEIRA, D. A. G. d. C. e.; KEDOR-HACKMANN, E. R. M.; SANTORO, M. I. R. M. Determination of sun protection factor (SPF) of sunscreens by ultraviolet spectrophotometry. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, 40, 2004.

EL-SHEEKH, M. M.; ALWALEED, E. A.; IBRAHIM, A.; SABER, H. Detrimental effect of UV-B radiation on growth, photosynthetic pigments, metabolites and ultrastructure of some cyanobacteria and freshwater chlorophyta. **International Journal of Radiation Biology**, 97, n. 2, p. 265-275, 2021/02/01 2021.

FABROWSKA, J.; MESSYASZ, B.; SZYLING, J.; WALKOWIAK, J. *et al.* Isolation of chlorophylls and carotenoids from freshwater algae using different extraction methods. **Phycological Research**, 66, n. 1, p. 52-57, 2018.

FUENTES-TRISTAN, S.; PARRA-SALDIVAR, R.; IQBAL, H. M. N.; CARRILLO-NIEVES, D. Bioinspired biomolecules: Mycosporine-like amino acids and scytonemin from *Lyngbya* sp. with UV-protection potentialities. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, 201, p. 111684, 2019/12/01/ 2019.

GAO, X.; JING, X.; LIU, X.; LINDBLAD, P. Biotechnological Production of the Sunscreen Pigment Scytonemin in Cyanobacteria: Progress and Strategy. **Marine Drugs**, v.19, n. 3, DOI: 10.3390/md19030129.

GAO, X.; YUAN, X.; ZHENG, T.; JI, B. Promoting efficient production of scytonemin in cell culture of *Nostoc flagelliforme* by periodic short-term solar irradiation. **Bioresource Technology Reports**, 21, p. 101352, 2023/02/01/ 2023.

GARCIA-PICHEL, F.; SHERRY, N. D.; CASTENHOLZ, R. W. Evidence for an ultraviolet sunscreen role of the extracellular pigment scytonemin in the terrestrial cyanobacterium *Chlorogloeopsis* sp. **Photochemistry and Photobiology**, 56, n. 1, p. 17-23, 1992/07/01 1992.

GARCIA-PICHEL, F.; ZEHR, J. P.; BHATTACHARYA, D.; PAKRASI, H. B. What's in a name? The case of cyanobacteria. **Journal of Phycology**, 56, n. 1, p. 1-5, 2020/02/01 2020.

GARCIA-PICHEL, F.; CASTENHOLZ, R. W. Characterization and biological implications of scytonemin, a cyanobacterial sheath pigment. **Journal of Phycology**, 27, n. 3, p. 395-409, 1991.

GONZÁLEZ-PEÑA, M. A.; ORTEGA-REGULES, A. E.; ANAYA DE PARRODI, C.; LOZADA-RAMÍREZ, J. D. Chemistry, Occurrence, Properties, Applications, and Encapsulation of Carotenoids—A Review. **Plants**, v.12, n. 2, DOI: 10.3390/plants12020313.

GOVINDJEE; SHEVELA, D. Adventures with Cyanobacteria: A Personal Perspective. **Frontiers in Plant Science**, 2, 2011. Review.

GR, S.; YADAV, R. K.; CHATRATH, A.; GERARD, M. *et al.* Perspectives on the potential application of cyanobacteria in the alleviation of drought and salinity stress in crop plants. **Journal of Applied Phycology**, 33, n. 6, p. 3761-3778, 2021/12/01 2021.

GROMKOWSKA-KĘPKA, K. J.; PUŚCION-JAKUBIK, A.; MARKIEWICZ-ŻUKOWSKA, R.; SOCHA, K. The impact of ultraviolet radiation on skin photoaging — review of in vitro studies. **Journal of Cosmetic Dermatology**, 20, n. 11, p. 3427-3431, 2021/11/01 2021.

HÄDER, D.-P.; WILLIAMSON, C. E.; WÄNGBERG, S.-Å.; RAUTIO, M. *et al.* Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 14, n. 1, p. 108-126, 2015. 10.1039/C4PP90035A.

HE, h.; LI, a.; LI, s.; TANG, j. *et al.* Natural components in sunscreens: Topical formulations with sun protection factor (SPF). **Biomedicine & Pharmacotherapy**, 134, p. 111161, 2021/02/01/ 2021.

HE, Y.; CHEN, Y.; TAO, H.; ZHOU, X. *et al.* Secondary metabolites from cyanobacteria: source, chemistry, bioactivities, biosynthesis and total synthesis. **Phytochemistry Reviews**, 2024/04/22 2024.

HOTOS, G. N.; ANTONIADIS, T. I. The Effect of Colored and White Light on Growth and Phycobiliproteins, Chlorophyll and Carotenoids Content of the Marine Cyanobacteria *Phormidium* sp. and *Cyanothece* sp. in Batch Cultures. **Life**, v.12, n. 6, DOI: 10.3390/life12060837.

HUANG, J. J.; XU, W.; LIN, S.; CHEUNG, P. C. K. The bioactivities and biotechnological production approaches of carotenoids derived from microalgae and cyanobacteria. **Critical Reviews in Biotechnology**, p. 1-29, 2024.

HUANG, Y.; CHEN, Z.-Q.; WU, S.; FENG, X. Anisian (Middle Triassic) stromatolites from Southwest China: Biogeological features and implications for variations of filament size and diversity of Triassic cyanobacteria. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 601, p. 111150, 2022/09/01/ 2022.

JACINAVICIUS, F. R.; GAMA JÚNIOR, W.; AZEVEDO, M. d. P.; SANTANNA, C. **Manual para cultivo de cianobactérias**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2013.

JACINAVICIUS, F. R.; GERALDES, V.; CRNKOVIC, C. M.; DELBAJE, E. *et al.* Effect of ultraviolet radiation on the metabolomic profiles of potentially toxic cyanobacteria. **FEMS Microbiology Ecology**, 97, n. 1, p. f1aa243, 2021.

JAESCHKE, D. P.; TEIXEIRA, I. R.; MARCZAK, L. D. F.; MERCALI, G. D. Phycocyanin from *Spirulina*: A review of extraction methods and stability. **Food Research International**, 143, p. 110314, 2021/05/01/ 2021.

JASSER, I.; KHOMUTOVSKA, N.; SANDZEWICZ, M.; ŁACH, Ł. *et al.* High altitude may limit production of secondary metabolites by cyanobacteria. **Ecohydrology & Hydrobiology**, 2024/04/23/ 2024.

JHA, S.; SINGH, V. K.; SINGH, A. P.; GUPTA, A. *et al.* The Radiant World of Cyanobacterial Phycobiliproteins: Examining Their Structure, Functions, and Biomedical Potentials. **Targets**, v.2, n. 1, p. 32-51, DOI: 10.3390/targets2010002.

JI, L.; QIU, S.; WANG, Z.; ZHAO, C. *et al.* Phycobiliproteins from algae: Current updates in sustainable production and applications in food and health. **Food Research International**, 167, p. 112737, 2023/05/01/ 2023.

KANG, M. R.; JO, S. A.; LEE, H.; YOON, Y. D. *et al.* Inhibition of Skin Inflammation by Scytonemin, an Ultraviolet Sunscreen Pigment. **Marine Drugs**, v.18, n. 6, DOI: 10.3390/md18060300.

KAWAKAMI, K.; HAMAGUCHI, T.; HIROSE, Y.; KOSUMI, D. *et al.* Core and rod structures of a thermophilic cyanobacterial light-harvesting phycobilisome. **Nature Communications**, 13, n. 1, p. 3389, 2022/06/17 2022.

KHALIFA, S. A. M.; SHEDID, E. S.; SAIED, E. M.; JASSBI, A. R. *et al.* Cyanobacteria—From the Oceans to the Potential Biotechnological and Biomedical Applications. **Marine Drugs**, v.19, n. 5, DOI: 10.3390/md19050241.

KOVACIK, L.; JEZBEROVÁ, J.; KOMÁRKOVÁ, J.; KOPECKY, J. *et al.* Ecological characteristics and polyphasic taxonomic classification of stable pigment-types of the genus *Chroococcus* (Cyanobacteria). **Preslia**, 83, p. 145-166, 02/01 2011.

KOVALESKI, G.; KHOLANY, M.; DIAS, L. M. S.; CORREIA, S. F. H. *et al.* Extraction and purification of phycobiliproteins from algae and their applications. **Frontiers in Chemistry**, 10, 2022. Review.

KUMARI, N.; PANDEY, A.; GUPTA, A.; MISHRA, S. *et al.* Characterization of UV-screening pigment scytonemin from cyanobacteria inhabiting diverse habitats of Varanasi, India. **Biologia**, 78, n. 2, p. 319-330, 2023/02/01 2023.

LARA, Y.; DEMOULIN, C.; VANSTEENKISTE, A.; JAVAUX, E. Cyanobacterial photoprotective pigments as example of robust signatures of life. *In*: BEACON 2023 Biennial European Astrobiology Conference, 2023, Fuencaliente, La Palma, Spain. Acesso em: 7-12 May 2023.

LEE, H.; NOH, Y.; HONG, S.-J.; LEE, H. *et al.* Photosynthetic pigment production and metabolic and lipidomic alterations in the marine cyanobacteria *Synechocystis* sp.

PCC 7338 under various salinity conditions. **Journal of Applied Phycology**, 33, n. 1, p. 197-209, 2021/02/01 2021.

LI, W.; SU, H.-N.; PU, Y.; CHEN, J. *et al.* Phycobiliproteins: Molecular structure, production, applications, and prospects. **Biotechnology Advances**, 37, n. 2, p. 340-353, 2019/03/01/ 2019.

LIANG, Y.; ZHANG, M.; WANG, M.; ZHANG, W. *et al.* Freshwater Cyanobacterium *Synechococcus elongatus* PCC 7942 Adapts to an Environment with Salt Stress via Ion-Induced Enzymatic Balance of Compatible Solutes. **Applied and Environmental Microbiology**, 86, n. 7, p. e02904-02919, 2020.

LIJASSI, I.; ARAHOU, F.; KOUDI, S. T. H.; WAHBY, A. *et al.* Optimized extraction of phycobiliproteins from *Arthrospira platensis*: quantitative and qualitative assessment of C-Phycocyanin, Allophycocyanin, and Phycoerythrin. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, 2024/01/18 2024.

MA, J.; HU, J.; SHA, X.; MENG, D. *et al.* Phycobiliproteins, the pigment-protein complex form of natural food colorants and bioactive ingredients. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 64, n. 10, p. 2999-3017, 2024/04/14 2024.

MANSUR, J. d. S.; BREDER, M. N. R.; MANSUR, M. C. d. A.; AZULAY, R. D. Determinação do fator de proteção solar por espectrofotometria. **An. Bras. Dermatol**, p. 121-124, 1986.

MAOKA, T. Carotenoids as natural functional pigments. **Journal of Natural Medicines**, 74, n. 1, p. 1-16, 2020.

MARTIN-ANDRES, I.; SOBRADO, J.; CAVALCANTE, E.; QUESADA, A. Survival of an Antarctic cyanobacterial mat under Martian conditions. **Frontiers in Microbiology**, 15, 2024. Original Research.

MEHDIZADEH ALLAF, M.; PEERHOSSAINI, H. Cyanobacteria: Model Microorganisms and Beyond. **Microorganisms**, v.10, n. 4, DOI: 10.3390/microorganisms10040696.

MICHAEL F, H. Biological Effects of Sunlight, Ultraviolet Radiation, Visible Light, Infrared Radiation and Vitamin D for Health. **Anticancer Research**, 36, n. 3, p. 1345, 2016.

MISHRA, A.; TANDON, R.; KESARWANI, S.; SINGH, R. *et al.* Emerging applications of cyanobacterial ultraviolet protecting compound scytonemin. **Journal of Applied Phycology**, 27, n. 3, p. 1045-1051, 2015/06/01 2015.

MIZUHO, S.; TAKESHI, K.; KAISEI, M.; MAI, W. *et al.* Functional Modification of Cyanobacterial Phycobiliprotein and Phycobilisomes through Bilin Metabolism Control. **bioRxiv**, p. 2024.2002.2004.578791, 2024.

MOROCHO-JÁCOME, A. L.; FREIRE, T. B.; DE OLIVEIRA, A. C.; DE ALMEIDA, T. S. *et al.* In vivo SPF from multifunctional sunscreen systems developed with natural compounds—A review. **Journal of Cosmetic Dermatology**, 20, n. 3, p. 729-737, 2021/03/01 2021.

MOUGA, T.; PEREIRA, J.; MOREIRA, V.; AFONSO, C. Unveiling the Cultivation of *Nostoc* sp. under Controlled Laboratory Conditions. **Biology**, v.13, n. 5, DOI: 10.3390/biology13050306.

NABI, F.; ARAIN, M. A.; RAJPUT, N.; ALAGAWANY, M. *et al.* Health benefits of carotenoids and potential application in poultry industry: A review. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**, 104, n. 6, p. 1809-1818, 2020/11/01 2020.

NÄGELI, C. **Gattungen einzelliger Algen physiologisch und systematisch bearbeitet**. Zürich: Friedrich Schulthess, 1849.

NARAYANAN, D. L.; SALADI, R. N.; FOX, J. L. Review: Ultraviolet radiation and skin cancer. **International Journal of Dermatology**, 49, n. 9, p. 978-986, 2010/09/01 2010.

NATESUNGNOEN, M.; PONGRAKHANANON, V.; LINDBLAD, P.; JANTARO, S. Overexpressing Carotenoid Biosynthetic Genes in *Synechocystis* sp. PCC 6803 Improved Intracellular Pigments and Antioxidant Activity, Which Can Decrease the Viability and Proliferation of Lung Cancer Cells In Vitro. **International Journal of Molecular Sciences**, v.24, n. 11, DOI: 10.3390/ijms24119370.

NOVOVESKÁ, L.; ROSS, M. E.; STANLEY, M. S.; PRADELLES, R. *et al.* Microalgal Carotenoids: A Review of Production, Current Markets, Regulations, and Future Direction. **Marine Drugs**, v.17, n. 11, DOI: 10.3390/md17110640.

NOWRUZI, B.; SARVARI, G.; BLANCO, S. The cosmetic application of cyanobacterial secondary metabolites. **Algal Research**, 49, p. 101959, 2020.

ORAZIO, J.; JARRETT, S.; AMARO-ORTIZ, A.; SCOTT, T. UV Radiation and the Skin. **International Journal of Molecular Sciences**, v.14, n. 6, p. 12222-12248, DOI: 10.3390/ijms140612222.

PAGELS, F.; GUEDES, A. C.; AMARO, H. M.; KIJJOA, A. *et al.* Phycobiliproteins from cyanobacteria: Chemistry and biotechnological applications. **Biotechnology Advances**, 37, n. 3, p. 422-443, 2019/05/01/ 2019.

PAGELS, F.; PEREIRA, R. N.; VICENTE, A. A.; GUEDES, A. C. Extraction of Pigments from Microalgae and Cyanobacteria—A Review on Current Methodologies. **Applied Sciences**, v.11, n. 11, DOI: 10.3390/app11115187.

PAGELS, F.; VASCONCELOS, V.; GUEDES, A. C. Carotenoids from Cyanobacteria: Biotechnological Potential and Optimization Strategies. **Biomolecules**, v.11, n. 5, DOI: 10.3390/biom11050735.

PANDEY, A.; PATHAK, J.; SINGH, D. K.; AHMED, H. *et al.* Photoprotective role of UV-screening pigment scytonemin against UV-B-induced damages in the heterocyst-forming cyanobacterium *Nostoc* sp. strain HKAR-2. **Brazilian Journal of Botany**, 43, n. 1, p. 67-80, 2020.

PANDEY, V. D.; PANDEY, A.; VIBHU, S. Biotechnological applications of cyanobacterial phycobiliproteins. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, 2, n. 9, p. 89-97, 2013.

PATHAK, J.; KUMAR, D.; SINGH, D.; AHMED, H. *et al.* Ultraviolet Radiation and Salinity-Induced Physiological Changes and Scytonemin Induction in Cyanobacteria Isolated from Diverse Habitats. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, 12, p. 3590-3606, 06/15 2022.

PATHAK, J.; PANDEY, A.; MAURYA, P. K.; RAJNEESH, R. *et al.* Cyanobacterial Secondary Metabolite Scytonemin: A Potential Photoprotective and Pharmaceutical Compound. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences**, 90, n. 3, p. 467-481, 2020/09/01 2020.

PECUNDO, M. H.; CHEN, T.; DELA CRUZ, T. E. E.; GRIFFITH, M. P. *et al.* Discovery of Cyanobacteria Associated with Cycads and Description of Three Novel Species in *Desmonostoc* (Nostocaceae). **Diversity**, v.15, n. 11, DOI: 10.3390/d15111132.

PERERA, R. M. T. D.; HERATH, K. H. I. N. M.; SANJEEWA, K. K. A.; JAYAWARDENA, T. U. Recent Reports on Bioactive Compounds from Marine Cyanobacteria in Relation to Human Health Applications. **Life**, v.13, n. 6, DOI: 10.3390/life13061411.

PÉREZ-GÁLVEZ, A.; VIERA, I.; ROCA, M. Carotenoids and Chlorophylls as Antioxidants. **Antioxidants**, v.9, n. 6, DOI: 10.3390/antiox9060505.

PINHEIRO, N. A. P.; ALVES, A. M. B.; CAMPOS, A. E. Q. R.; FURTADO, M. L. *et al.* Avaliação in vitro da atividade fotoprotetora de *Bryophyllum laetivirens* (desc.) V.v. byalt. **Revista Coleta Científica**, 4, n. 7, p. 11-16, 06/20 2020.

POPALL, R. M.; BOLHUIS, H.; MUYZER, G.; SÁNCHEZ-ROMÁN, M. Stromatolites as Biosignatures of Atmospheric Oxygenation: Carbonate Biomineralization and UV-C Resilience in a *Geitlerinema* sp. - Dominated Culture. **Frontiers in Microbiology**, 11, 2020-May-19 2020. Original Research.

PUDDICK, J.; NAEHER, S.; PEARMAN, J. K.; PAGE, C. D. *et al.* Characterizing carotenoids in cyanobacterial cultures – Opportunities and implications for paleolimnological studies. **Harmful Algae**, 127, p. 102481, 2023/08/01/ 2023.

RACHEDI, R.; FOGLINO, M.; LATIFI, A. Stress Signaling in Cyanobacteria: A Mechanistic Overview. **Life**, v.10, n. 12, DOI: 10.3390/life10120312.

RATH, J.; MANDAL, S.; ADHIKARY, S. P. Salinity induced synthesis of UV-screening compound scytonemin in the cyanobacterium *Lyngbya aestuarii*. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, 115, p. 5-8, 2012/10/03/ 2012.

ŘEHÁKOVÁ, K.; JOHANSEN, J. R.; CASAMATTA, D. A.; XUESONG, L. *et al.* Morphological and molecular characterization of selected desert soil cyanobacteria: three species new to science including *Mojavia pulchra* gen. et sp. Nov. **Phycologia**, 46, n. 5, p. 481-502, 2007/09/01 2007.

ROCHA, F.; ESTEBAN LUCAS-BORJA, M.; PEREIRA, P.; MUÑOZ-ROJAS, M. Cyanobacteria as a Nature-Based Biotechnological Tool for Restoring Salt-Affected Soils. **Agronomy**, v.10, n. 9, DOI: 10.3390/agronomy10091321.

RODRIGUES, L.; MORONE, J.; HENTSCHKE, G. S.; VASCONCELOS, V. *et al.* Anti-Inflammatory Activity of Cyanobacteria Pigment Extracts: Physiological Free Radical Scavenging and Modulation of iNOS and LOX Activity. **Marine Drugs**, v.22, n. 3, DOI: 10.3390/md22030131.

RUČOVÁ, D.; VILKOVÁ, M.; SOVOVÁ, S.; VARGOVÁ, Z. *et al.* Photoprotective and antioxidant properties of scytonemin isolated from Antarctic cyanobacterium *Nostoc commune* Vaucher ex Bornet & Flahault and its potential as sunscreen ingredient. **Journal of Applied Phycology**, 35, n. 6, p. 2839-2850, 2023/12/01 2023.

RUPALI, B.; SHARMA, P. K. Effect of UV-B radiation on physiological and biochemical changes in a freshwater cyanobacterium, *Scytonema hofmannii*. **Environmental and Experimental Biology**, 19, n. 2, p. 89–96, 2021.

SAINI, D. K.; PABBI, S.; SHUKLA, P. Cyanobacterial pigments: Perspectives and biotechnological approaches. **Food and Chemical Toxicology**, 120, p. 616-624, 2018/10/01/ 2018.

SÁNCHEZ-BARACALDO, P.; BIANCHINI, G.; WILSON, J. D.; KNOLL, A. H. Cyanobacteria and biogeochemical cycles through Earth history. **Trends in Microbiology**, 30, n. 2, p. 143-157, 2022.

SÁNCHEZ-BARACALDO, P.; CARDONA, T. On the origin of oxygenic photosynthesis and Cyanobacteria. **New Phytologist**, 225, n. 4, p. 1440-1446, 2020/02/01 2020.

SAYRE, R. M.; AGIN, P. P.; LEEVEE, G. J.; MARLOWE, E. A COMPARISON OF IN VIVO AND IN VITRO TESTING OF SUNSCREENING FORMULAS. **Photochemistry and Photobiology**, 29, n. 3, p. 559-566, 1979/03/01 1979.

SEN, S.; MALLICK, N. Scytonemin: Unravelling major progress and prospects. **Algal Research**, 64, p. 102678, 2022/05/01/ 2022.

SHEIBANI MADRAHI, G.; NAEIMPOOR, F. Effect of synchronized abiotic stressors and UV on scytonemin synthesis by marine cyanobacterium *Leptolyngbya mycodia* in sequential two-stage cultivation. **Journal of Applied Phycology**, 35, n. 1, p. 43-56, 2023/02/01 2023a.

SHEIBANI MADRAHI, G.; NAEIMPOOR, F. Overproduction of cyano-sunscreen scytonemin by *Leptolyngbya mycodia* in two stage illuminated photobioreactor: From

submerged to attached cultivation. **Algal Research**, 74, p. 103169, 2023/07/01/2023b.

SINGH, P.; ŠNOKHOUSOVÁ, J.; SARAF, A.; SURADKAR, A. *et al.* Phylogenetic evaluation of the genus *Nostoc* and description of *Nostoc neudorfense* sp. nov., from the Czech Republic. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, 70, n. 4, p. 2740-2749, 2020.

SINGH, V. K.; JHA, S.; RANA, P.; MISHRA, S. *et al.* Resilience and Mitigation Strategies of Cyanobacteria under Ultraviolet Radiation Stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v.24, n. 15, DOI: 10.3390/ijms241512381.

SOULE, T.; STOUT, V.; SWINGLEY, W. D.; MEEKS, J. C. *et al.* Molecular Genetics and Genomic Analysis of Scytonemin Biosynthesis in *Nostoc punctiforme* ATCC 29133. **Journal of Bacteriology**, 189, n. 12, p. 4465-4472, 2007.

SRIVASTAVA, A.; SHUKLA, P. Emerging tools and strategies in cyanobacterial omics. **Trends in Biotechnology**, 40, n. 1, p. 4-7, 2022/01/01/ 2022.

SRIVASTAVA, A.; THAPA, S.; CHAKDAR, H.; BABELE, P. K. *et al.* Cyanobacterial myxoxanthophylls: biotechnological interventions and biological implications. **Critical Reviews in Biotechnology**, 44, n. 1, p. 63-77, 2024/01/02 2024.

STRUNECKÝ, O.; IVANOVA, A. P.; MAREŠ, J. An updated classification of cyanobacterial orders and families based on phylogenomic and polyphasic analysis. **Journal of Phycology**, 59, n. 1, p. 12-51, 2023/02/01 2023.

SUGIYAMA, K.; TAKAICHI, S. Carotenogenesis in cyanobacteria: CruA/CruP-type and CrtL-type lycopene cyclases. **The Journal of General and Applied Microbiology**, 66, n. 2, p. 53-58, 2020.

SUI, S.-F. Structure of Phycobilisomes. **Annual Review of Biophysics** 50, n. Volume 50, 2021, p. 53-72, 2021.

YADAV, P.; SINGH, R. P.; ALODAINI, H. A.; HATAMLEH, A. A. *et al.* Impact of dehydration on the physiochemical properties of *Nostoc calcicola* BOT1 and its untargeted metabolic profiling through UHPLC-HRMS. **Frontiers in Plant Science**, 14, 2023. Original Research.

YANG, W.; WANG, F.; LIU, L.-N.; SUI, N. Responses of Membranes and the Photosynthetic Apparatus to Salt Stress in Cyanobacteria. **Frontiers in Plant Science**, 11, 2020. Mini Review.

YU, C.; XU, H.-F.; LIU, Y.-R.; YAN, W.-W. *et al.* The transcription factor RppA regulates chlorophyll and carotenoid biosynthesis to improve photoprotection in cyanobacteria. **Plant Physiology**, p. kiae502, 2024.

ZHENG, L.; ZHENG, Z.; LI, X.; WANG, G. *et al.* Structural insight into the mechanism of energy transfer in cyanobacterial phycobilisomes. **Nature Communications**, 12, n. 1, p. 5497, 2021/09/17 2021.

ZIELINSKA-DABKOWSKA, K. Vitamin D. The truth about Vitamin D and sun exposure demystified. Finding the balance for personal health. **Professional Lighting Design**, p. 40-48, 05/01 2014.