

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS - BACHARELADO**

**ATIVIDADE FOTOSSÍNTÉTICA DE *Aechmea blanchetiana* E  
(BROMELIACEAE) EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO NATURAL  
DE LUZ: RESILIÊNCIA OU TOLERÂNCIA?**

**Andre Santos Amorim**

**São Mateus/ES  
Novembro/2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS - BACHARELADO**

**ATIVIDADE FOTOSSÍNTETICA DE *Aechmea blanchetiana* E  
*Alcantarea imperialis* (BROMELIACEAE) EM FUNÇÃO DA  
VARIAÇÃO NATURAL DE LUZ: RESILIÊNCIA OU  
TOLERÂNCIA?**

**Andre Santos Amorim**

Monografia de conclusão de curso apresentada ao Curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de BACHAREL EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS.

Orientador: Antelmo Ralph Falqueto

**São Mateus/ES  
Novembro/2023**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pela oportunidade e infraestrutura para realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo pelas bolsas concedidas durante a execução das minhas iniciações científicas.

Ao professor Antelmo Ralph Falqueto pelo exemplo de orientador, professor e pesquisador, por todo ensinamento acadêmico e ensinamentos sobre a vida. Obrigado pelas caronas, pelas risadas e principalmente por ter acreditado no meu potencial.

Ao Clodoaldo Pinheiros Leites, pelo papel de coorientador, de companheiro. Sou grato pelas risadas nas reuniões online e por toda a paciência me ensinando estatística, só tenho a agradecer.

À professora Karina Mancini, que foi quem me deu a primeira oportunidade na universidade e que me mostrou os caminhos que hoje quero seguir. Sou extremamente grato por sua vida, sua amizade.

A todos os professores que fizeram parte dessa jornada, pela contribuição na minha formação acadêmica.

Aos meus amigos de graduação e segunda família: Ana Paula Millani, Korina Blunk, Ana Larissa Coffler, Luana Tonini, Bruna Caliari, Ana Caroline Pariz, Lívia Batista, Julia Felipe, Thalia Rainha, Victor Alysson, Esther Fernandes, Walber Carmo, Vinicius Fonseca, Lucas Almeida, João Pedro Porto e Gustavo Amaral. Obrigado por toda a companhia, vocês têm um lugar reservado no meu coração, eu amo vocês.

Aos colegas de turma pelo convívio e bate-papo que enriqueceram a minha formação.

À minha mãe, Andreia Amorim, ao meu pai, Morílio Amorim, à minha irmã, Maria Eduarda Amorim! Obrigado por nunca desistirem de mim, sou eternamente grato por todo o esforço que fizeram para que eu me formasse, essa conquista é dedicada a vocês, minha família!

Aos meus avós, Antônio, Josefina e Vitoriano que foram colhidos por Deus do jardim da vida, dedico a minha formação a vocês. **SAUDADES ETERNAS!**

Ao meu companheiro de vida, de apartamento, com quem passei a maior parte dos meus anos de graduação, Matheus Alves. Você merece um espaço nesse tópico apenas seu. Foi você quem mais confiou e me deu força em momentos que eu não tinha. Obrigado por pegar na minha mão e me encorajar em momentos que eu não encontrei coragem. Amo você e serei eternamente grato por todos os momentos vividos e que viveremos.

À minha cachorra Dandara, que me mostrou a verdadeira essência de carinho e companheirismo canino.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Obrigado!



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: **ANDRE SANTOS AMORIM**

Título:

**ATIVIDADE FOTOSSINTÉTICA DE *Aechmea blanchetiana* E *Alcantarea imperialis* (BROMELIACEAE) EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO NATURAL DE LUZ: RESILIÊNCIA OU TOLERÂNCIA?**

Monografia do Curso de Ciências Biológicas (Bacharelado)  
Defendida e aprovada em 20/11/23

Com nota 9,3 (nove vírgula três)  
pela comissão julgadora:

\_\_\_\_\_  
Orientador(a) e presidente da Comissão Examinadora  
**Prof(a). Dr(a). Antelmo Ralph Falqueto**

\_\_\_\_\_  
Examinador 1  
**Prof(a). Dr(a). Karina Carvalho Mancini**

\_\_\_\_\_  
Examinador 2  
**Prof(a). Dr(a). Elisa Mitsuko Aoyama**

\_\_\_\_\_  
Dr(a). **Clodoaldo Leites Pinheiro (EMBRAPA)**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por  
ANTELMO RALPH FALQUETO - SIAPE 1648734  
Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas - DCAB/CEUNES  
Em 15/12/2023 às 10:30

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:  
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/857089?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por  
ELISA MITSUKO AOYAMA - SIAPE 1819113  
Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas - DCAB/CEUNES  
Em 15/12/2023 às 11:20

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:  
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/857149?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por  
KARINA CARVALHO MANCINI - SIAPE 1655350  
Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas - DCAB/CEUNES  
Em 15/12/2023 às 11:34

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:  
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/857181?tipoArquivo=O>

## RESUMO

A família *Bromeliaceae* conta com aproximadamente 3.096 espécies na mata atlântica, possuindo algumas espécies em seus centros de biodiversidade, entre essas espécies se destacam a *Aechmea blanchetiana* e *Alcantarea imperialis* que vem sofrendo com a fragmentação da mata atlântica e retirada indiscriminada das plantas maduras. Com a fragmentação vem a necessidade de entender a fisiologia dessas plantas, frente a variação natural da luz, visto que a dinâmica florestal vem sendo afetada também pela ação antrópica. Nesse contexto, o experimento foi realizado no Jardim Botânico *Palmarum*, localizado na Universidade Federal do Espírito Santo – Campus São Mateus. - ES. O presente estudo visou avaliar os transientes de fluorescência da clorofila *a* e identificar os parâmetros que mais explicam o comportamento de duas espécies de *Bromeliaceae*, *Aechmea blanchetiana* e *Alcantarea imperialis*, frente a variação natural de luz, medidas em um dia sob baixa intensidade de fluxo de fótons (BI) e sob alta intensidade de fluxo de fótons (AI), a fim de descrever se as espécies possuíam um comportamento resiliente ou tolerante. O comportamento fotossintético das espécies em relação aos dias de coleta se difere pela amplitude de resposta tanto em BI quanto em AI, as diferentes intensidades de luz refletiram diretamente no conjunto de parâmetros que definiram *Aechmea blanchetiana* como tolerante e *Alcantarea imperialis* como resiliente. Sendo que o fator de tolerância de *Aechmea blanchetiana* é baseada em *quenching* de fotoinibição, como mecanismo de fotoproteção, ao passo que, a resiliência de *Alcantarea imperialis* é caracterizada em *quenching* de desempenho fotoquímico.

**Palavras-Chave:** Fluorescência da clorofila *a*. Fotoproteção. Conservação.

## ABSTRACT

The Bromeliaceae family comprises approximately 3,096 species in the Atlantic Forest, with some species located in their biodiversity centers. Among these species, *Aechmea blanchetiana* and *Alcantarea imperialis* stand out, facing challenges due to the fragmentation of the Atlantic Forest and the indiscriminate removal of mature plants. With fragmentation comes the need to understand the physiology of these plants in response to natural light variations, as forest dynamics are also affected by anthropogenic activities. In this context, the experiment was conducted at the Palmarum Botanical Garden, located at the Federal University of Espírito Santo - São Mateus Campus, ES, Brazil. This study aimed to assess chlorophyll *a* fluorescence transients and identify the parameters that best explain the behavior of two Bromeliaceae species, *Aechmea blanchetiana* and *Alcantarea imperialis*, in response to natural light variation. Measurements were taken on a day with low photon flux density (BI) and high photon flux density (AI) to determine whether the species exhibited resilient or tolerant behavior. The photosynthetic behavior of the species varied in response to collection days, with differences in response amplitude under both BI and AI. The different light intensities directly influenced the set of parameters that defined *Aechmea blanchetiana* as tolerant and *Alcantarea imperialis* as resilient. *Aechmea blanchetiana*'s tolerance is based on photoinhibition quenching as a photoprotection mechanism, while *Alcantarea imperialis* resilience is characterized by performance photochemical quenching.

**Keywords:** Chlorophyll *a* fluorescence. Photoprotection. Conservation

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	8
2. OBJETIVOS.....	10
2.1 Objetivos gerais .....	10
2.1.1 Objetivos específicos .....	10
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	10
3.1 Local de estudo e material vegetal .....	10
3.3 Análises da fluorescência transiente ou polifásica (O-J-I-P): .....	11
3.5 Análises de dados .....	13
4 RESULTADOS .....	14
4.1 Caracterização dos dias de coleta em função da luminosidade e Análise da fluorescência transiente ou polifásica (O-K-J-I-P) .....	14
4.2 Análise das bandas L e K .....	16
4.3 Análise De Coordenadas Principais .....	19
5 DISCUSSÃO .....	21
6 CONCLUSÃO.....	24
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	25

## 1. INTRODUÇÃO

A luz é a principal fonte de energia para organismos fotossintetizantes, sendo a mesma convertida em energia química por meio da fotossíntese. No entanto, o excesso de luminosidade também pode ser prejudicial para os processos fotoquímicos, pois os altos níveis de radiação solar limitam a produtividade da planta, diminuindo o rendimento quântico da fotossíntese. Essa condição é denominada fotoinibição (Araujo & Deminicis, 2009).

Diferentes intensidades luminosas determinam na planta a expressão de genes necessários para superar determinadas condições estressantes, através de realocação de recursos nutricionais, mecanismos de defesa, mudança morfológica etc. (Ballaré, 2009). Nesse contexto, pode ser dito que dias ensolarados, com alta intensidade luminosa podem causar um declínio da atividade fotossintética das plantas, interferindo no seu crescimento e produtividade (Maai *et al.* 2020).

Por outro lado, a nebulosidade diminui a incidência direta de luz solar, mas aumenta a luz difusa, interferindo diretamente na atividade fotossintética das plantas, visto que a luz difusa contém uma maior porção de comprimento de ondas azuis em comparação com a luz solar direta, estimulando uma maior abertura estomática podendo aumentar a eficiência fotoquímica da planta (Berry & Smith, 2013).

As plantas da família Bromeliaceae, demonstram apresentar mecanismos de defesa, de maneira que se adequam às condições de pouca ou muita luminosidade, sendo a adaptabilidade muito importante para a sobrevivência e crescimento das plantas em ambientes heterodinâmicos (Júnior *et al.*, 2023). Contam com aproximadamente 56 gêneros e 3.086 espécies, sendo 653 endêmicos do bioma mata atlântica, tendo como destaques algumas espécies do gênero *Aechmea* e *Alcantarea*, que apresentam domínio em seus centros de biodiversidade. Entre eles estão presentes as espécies *Aechmea blanchetiana* (Baker) L.B. Smith e *Alcantarea imperialis* (Carriere) Harms (Martinelli *et al.* 2008).

*Aechmea blanchetiana* (Baker) L.B. Smith é uma planta da família Bromeliaceae, encontrada em restingas e na mata atlântica (Floresta Ombrófila Densa). Tem sua forma epífita e terrícola, sendo caracterizada por cor amarelada quando a pleno sol e esverdeada quando na sombra (Kanashiro *et al.* 2007). A espécie apresenta o maior número de indivíduos e maior frequência dentro da família Bromeliaceae. Contudo, sua ampla distribuição vem sofrendo com a fragmentação da mata atlântica, devido a ação antrópica (Monteiro *et al.* 2014; Gomes & Silva 2013). *Alcantarea imperialis* (Carriere) Harms pertence à família Bromeliaceae e ocorre nos estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais. Está sob ameaça de extinção, visto que seu valor ornamental favoreceu a retirada indiscriminada das plantas maduras, colocando sua classificação no livro vermelho como espécie vulnerável (VU) (Martinelli & Moraes, 2013).

Frente ao exposto, a atividade fotossintética das plantas é alterada significativamente de acordo com a intensidade luminosa a qual a planta está submetida (Maai *et al.* 2020), o que demanda das plantas um alto nível de plasticidade, uma vez que, a intensidade da energia luminosa muda constantemente durante o dia (Dias & Marengo, 2006). A capacidade de alterar o seu desenvolvimento em resposta às condições ambientais dinâmicas é conhecida como plasticidade do desenvolvimento, sendo uma estratégia importante para o sucesso reprodutivo, fisiológico e a evolução das plantas, conseqüentemente, fazendo com que as plantas se desenvolvam de forma diferentes sob diferentes níveis de luz (Yadav *et al.*, 2020; Annighöfer *et al.*, 2017).

A resposta às condições de estresse define se a planta é resiliente ou tolerante, Aronson *et al.* (2011) explica que a capacidade de um organismo recuperar o seu desempenho inicial, após uma situação de estresse, pode ser definida como resiliência. Ao passo que, uma planta que mesmo com o desempenho fotossintético baixo ou em condições que indicam a possível redistribuição da energia utilizada para a fotossíntese, consiga se desenvolver, tal condição é denominada tolerância (Zahra *et al.* 2022). Isso implica, na capacidade que uma espécie vegetal tem de responder a determinadas situações, o que garante a efetividade em projetos de revegetação, enriquecimento ambiental etc. (Silva & Botezelli, 2023).

Desse modo, a fluorescência da clorofila *a* é importante para avaliar o desempenho das plantas sob condições de baixa e alta irradiação luminosa (Gonçalves *et al.* 2010), descrevendo os mecanismos fotoquímicos em duas espécies da família Bromeliaceae: *Aechmea blanchetiana* (Baker) L.B. Smith e *Alcantarea imperialis* (Carriere) Harms em resposta a variações naturais da luz do dia, abordando as seguintes questões: (1) A resposta fisiológica das duas espécies em função da variação de luz é baseada em que parâmetros fotoquímicos da fotossíntese? (2) As espécies se mostraram resilientes ou tolerantes?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

Descrever os mecanismos fotoquímicos de resposta a variações naturais de luminosidade ao longo do dia em *Aechmea blanchetiana* (Baker) L.B. Smith e *Alcantarea imperialis* (Carriere) Harms (Bromeliaceae).

#### **2.1.1 Objetivos específicos**

- Comparar as alterações causadas pela irradiância solar sobre o aparato fotossintético por meio da análise dos dados pelo teste JIP;
- Compreender o comportamento fotoquímico das espécies a partir da fluorescência transiente ou polifásica (O-J-I-P)
- Identificar possíveis danos ao aparelho fotossintético das plantas em resposta à luz por meio de análises das bandas L e K;
- Analisar a resiliência funcional das plantas em relação à variação de luz, a partir da Análise de coordenadas principais (PCoA).

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Local de estudo e material vegetal**

O estudo foi conduzido no Jardim Botânico Palmarum, localizado na Universidade Federal do Espírito Santo – Campus São Mateus. As amostras foram coletadas em duas condições: 1 – sob alta densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (AI), com medições feitas em um dia ensolarado sem nuvens; e 2 – sob baixa densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (BI), medida em um dia nublado. Plantas cultivadas de duas espécies da família Bromeliaceae foram utilizadas: *Aechmea blanchetiana* (Baker) L.B.Sm. e *Alcantarea imperialis* (Carrière) Harms (Figura 1).



Figura 1. Espécies de Bromeliaceae utilizadas na pesquisa. 1- *Aechmea blanchetiana*; 2 - *Alcantarea imperialis*

Fonte: Autor (2023)

### 3.3 Análises da fluorescência transiente ou polifásica (O-J-I-P):

A fluorescência transiente da clorofila *a* foi medida em folhas jovens totalmente expandidas, utilizando-se um fluorômetro portátil (Handy PEA, Hanstech, UK). As avaliações foram realizadas em BI em três horários do dia (8h – 12h – 17h) e em AI em quatro horários (6h-12h-17h-6h – Recuperação/REC). Todas as leituras foram realizadas em folhas previamente adaptada ao escuro (uso de cliques foliares) durante 30 minutos, período suficiente para a oxidação completa do sistema fotossintético (Figura 2). Logo após, as folhas foram submetidas a um flash de luz saturante na cor vermelha de 1 s [ $650\text{ nm}$ ,  $3000\ \mu\text{mol}(\text{fótons})\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ ], com duração de 1s. Foram avaliadas as variáveis derivadas da curva de emissão de fluorescência rápida: fluorescência inicial ou basal,  $F_0$ , medida a  $50\ \mu\text{s}$ ; a fluorescência máxima,  $F_M$ ; e a fluorescência variável,  $F_V$ , que representa a diferença entre  $F_M$  e  $F_0$ , ainda, foram analisadas as razões de rendimento quântico máximo do FSII,  $\phi_{P0}$ , ( $\text{TR}_0/\text{ABS} = F_V/F_M$ ).



Figura 2- Fluorômetro portátil (Handy PEA, Hanstech, UK) e cliques foliares

As variáveis biofísicas que quantificam o fluxo de energia através do FSII foram analisadas pelo teste JIP (Tabela 1) Assim, o fluxo específico de absorção de energia luminosa,  $ABS/RC$ , pôde ser calculado a partir do número total de fótons absorvidos pelas moléculas de todos os RCs dividido pelo número total de RC ativos, representando o tamanho real da antena de um centro de reação ativo; o fluxo específico de captura de energia de excitação,  $TR_0/RC$ , ou taxa de captura máxima do FSII, trata-se da taxa máxima com que a energia de excitação é capturada pelo RC resultando na redução de  $Q_A$  ( $Q_A^+ \xrightarrow{-E^-} Q_A^-$ ); o fluxo específico de dissipação da energia ao nível das clorofilas da antena,  $DI_0/RC$ , representa a razão da dissipação total de energia de excitação não capturada nos RCs pelo número de RCs ativos.

Tabela 1. Explicação dos parâmetros de teste JIP selecionados (Strasser *et al.* 2004; Strasser *et al.* 2000)

Glossário de termos utilizados para análise de <i>quenching</i>	
$V_j$	Fluorescência variável relativa em 2 ms
$DI_0/RC$	Fluxo de Dissipação de energia na forma de calor por Centro de reação ativo
$PI_{ABS}$	Índice de desempenho (potencial) para conservação de energia desde éxcitons capturados até a redução dos aceptores de elétrons do interistema
$F_0/F_M$	Produção quântica dos processos não fotoquímicos do FSII
$ABS/RC$	Fluxo de absorção de energia por centro de reação ativo
$\phi P_0$	Rendimento quântico fotoquímico máximo para fotoquímica primário
$\phi D_0$	Rendimento quântico fotoquímico para dissipação de calor

### **3.5 Análises de dados**

O software Biolyser 4HP (Biolyser© R. M. Rodriguez, Bioenergetics Laboratory, University of Geneva, Geneva, Switzerland, version 3.06) foi usado para obter os transientes OJIP e Excel versão Windows 2010 será utilizado para a construção dos gráficos do transientes OJIP (Curvas OJIP e normalizações). Os parâmetros do JIP-test serão avaliados por meio do Software Multiv. Com a finalidade de casualizar o experimento, foram escolhidas aleatoriamente 10 unidades amostrais de cada espécie (folhas jovens, não danificadas e totalmente expandidas), sendo a unidade amostral cada espécime.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterização dos dias de coleta em função da luminosidade e Análise da fluorescência transiente ou polifásica (O-K-J-I-P)

No contexto deste estudo, foram analisadas duas espécies (*Aechmea blanchetiana* e *Alcantarea imperialis*) em dois dias distintos de coleta: sob baixa intensidade de fluxo de fótons (BI) (Figura 3A) e sob alta intensidade de fluxo de fótons (AI) (Figura 3B). Foi notável a diferença na intensidade luminosa, uma vez que, em BI, a luminosidade variou entre 4,0 Klux e 25Klux, enquanto no dia AI, a luz oscilou entre 10 Klux e 70 Klux, sendo que ambos os dias apresentaram maior intensidade luminosa no horário do meio-dia.

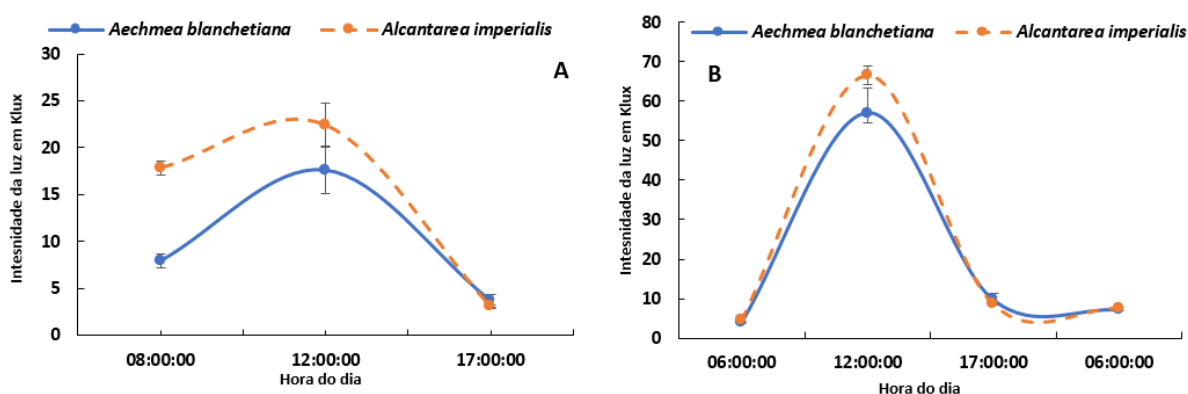


Figura 3. Intensidade luminosa durante os dias de coleta BI e AI. A- Intensidade luminosa durante 3 horários do dia em BI. B- Intensidade Luminosa durante 4 horários do dia em AI.

A intensidade máxima de fluorescência ( $F_M$ ) ocorre quando toda  $Q_A$  está reduzida e os centros de reação não conseguem aumentar as reações fotoquímicas até sua capacidade máxima (Baker, 2004). Nesse contexto, observamos que em ambos os dias de coleta, *Alcantarea imperialis* alcançou sua máxima fluorescência com maior intensidade nos horários de menor luminosidade. No dia BI (Figura 4A), esse pico de fluorescência ocorreu às 8h e 17h e no dia AI (Figura 4B),  $F_M$  também foi maior em horários de menor intensidade luminosa, ou seja, às 6h, 17h e 6h (Recuperação = rec.) Por outro lado, *Aechmea blanchetiana* exibiu valores mais baixos de fluorescência da clorofila *a* em ambos os dias de coleta quando comparado a *Alcantarea imperialis*. No entanto, dentro de sua capacidade fotoquímica, mostrou valores mais elevados às 8h em BI e 6h e 6h rec. em AI.

A partir da curva Polifásica OJIP, percebe-se que no dia sob baixa intensidade de fluxo de fótons BI, ambas as espécies apresentaram uma maior fluorescência máxima, (apresentada no ponto P), nos horários menor intensidade luminosa às 17 horas, mostrando também um decréscimo da fluorescência da clorofila *a*, nos horários com maior intensidade luminosa às 12 horas. Em relação ao dia sob maior intensidade de fluxo de fótons AI, nota-se uma grande diferença nas curvas, sendo que o efeito no decréscimo de fluorescência da clorofila *a* às 12h

em *Alcantarea imperialis* é evidente, quando comparado com BI. Contudo, *Alcantarea imperialis* apresentou os maiores valores de Fluorescência máxima nos horários com menos intensidade luminosa (6h e 6h – REC). *Aechmea blanchetiana* em AI apresentou valores mais baixos em todos os horários quando comparados ao dia BI, não apresentando diferença na amplitude da curva polifásica nos horários de 12h e 17h.

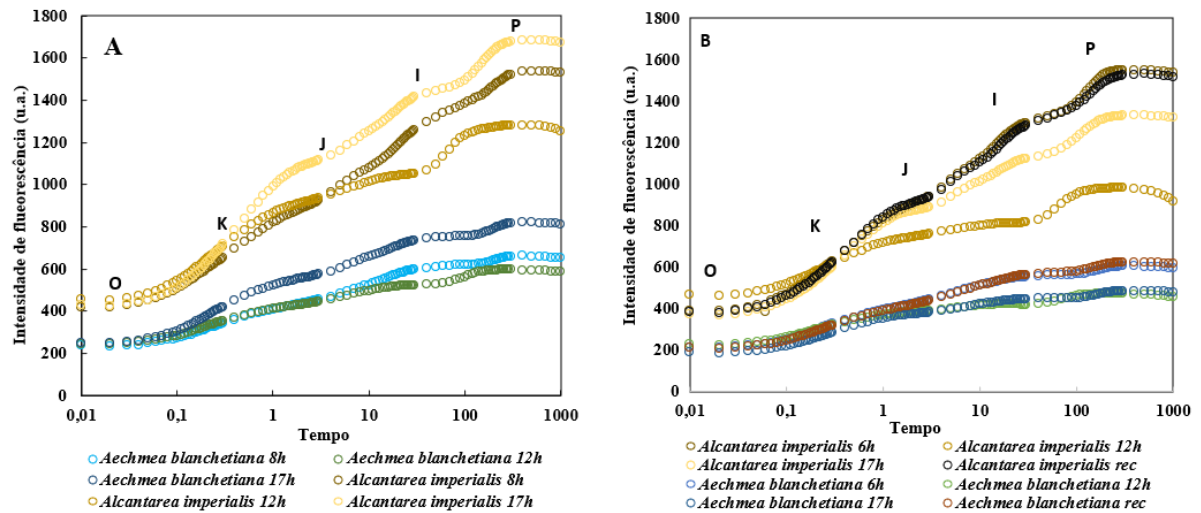


Figura 4. Curva polifásica OJIP de emissão da fluorescência da clorofila *a*. A: sob baixa intensidade de fluxo de fótons; B: Sob Alta intensidade de fluxo de fótons.

Para evidenciar as diferenças entre cada ponto da curva OJIP, foram calculadas as diferenças cinéticas dos transientes da fluorescência da clorofila *a* relativa ao controle ( $\Delta V_t = (\text{tratamento}) - V_t(\text{controle})$ ). Deste modo, pôde-se observar que no dia BI (Figura 5- imagem A-B), as curvas apresentaram amplitude positiva nas fases O-J, seguida de um declive em I-P para a *Aechmea blanchetiana* nos as 12h e 17h quando comparados ao horário controle (8h) (Figura 4B). *Alcantarea imperialis* (Figura 5- imagem B) apresentou uma banda positiva bastante expressiva na fase O-J, com um ligeiro declive, voltando a ficar positivo na fase I-P, sendo a curva no horário de 12h mais alta do que às 17h. Em AI, a espécie *Aechmea blanchetiana* (Figura 5C), apresentou um comportamento diferente quando comparado ao dia BI no horário com mais intensidade luminosa (12h) (ver figura 1B). *Aechmea blanchetiana* apresentou uma banda positiva mais expressiva em comparação com o primeiro dia de coleta e com os demais horários do segundo dia de coleta, apresentando um declive gradual até o horário de recuperação, 17 e 6h-rec, respectivamente, sendo que no horário de 6h -Rec a banda ficou negativa. Em relação a *Alcantarea imperialis* em AI (Figura 5D), a espécie apresentou uma banda positiva na fase O-J, seguida por um declive expressivo na fase I-P no horário de 12h e comportamento similar nos demais horários (17h e 6h- Rec.), no entanto, com uma amplitude menor.

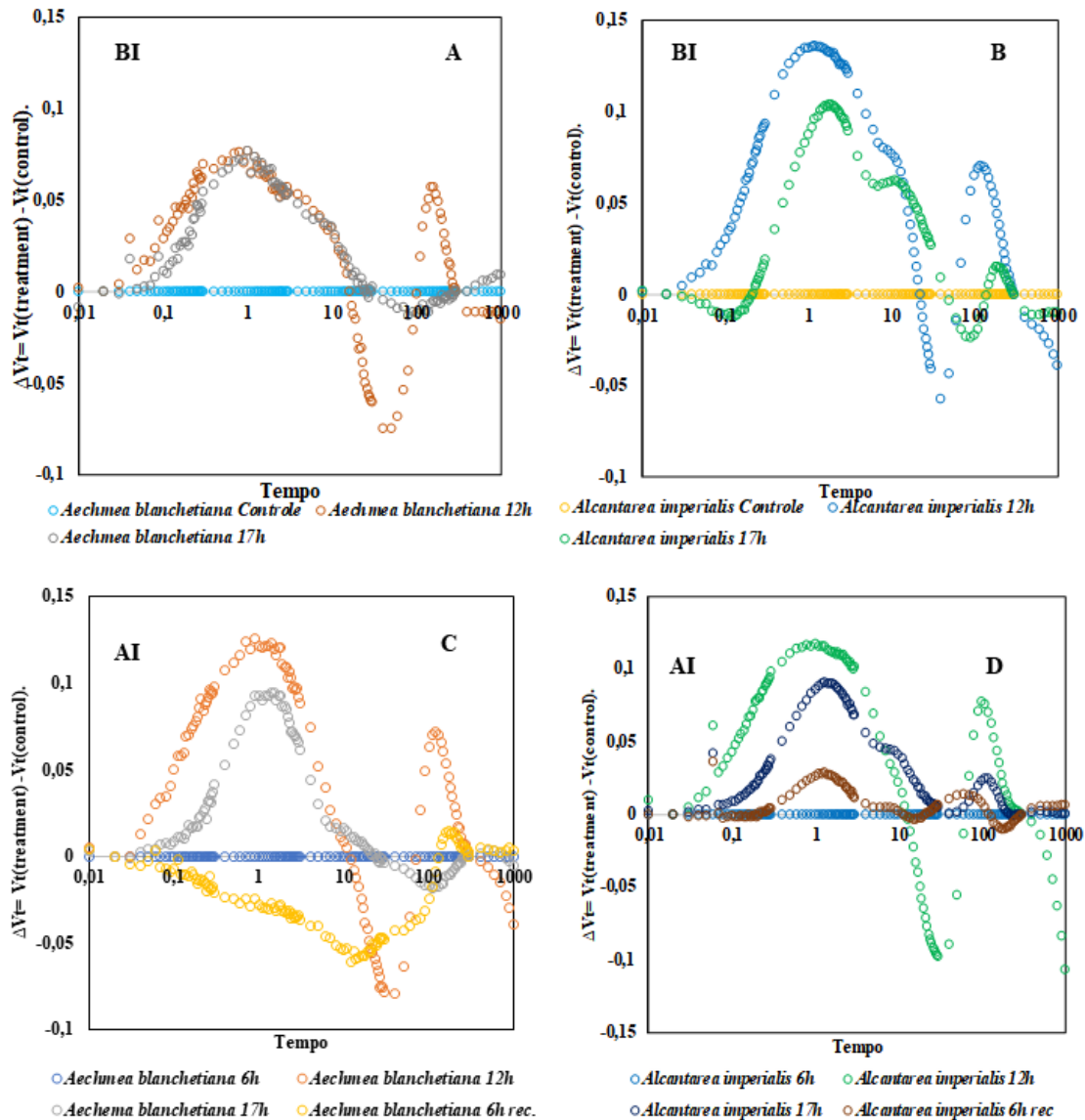


Figura 5: Diferença cinética entre os pontos O (0,02 ms) e P (300 ms) ou  $\Delta VOP$  estabelecidas entre 0,01 e 300 ms a partir da normalização  $\Delta VOP = [VOP(\text{controle}) - VOP(\text{tratamento})]$ . A – Dia sob Baixa intensidade de fluxo de fótons (BI), normalização de *Aechmea blanchetiana*. B - Dia BI, referente a *Alcantarea imperialis*. C - Dia AI referente a *Aechmea blanchetiana*. D – Dia sob alta intensidade de fluxo de fótons *Alcantarea imperialis* (AI).

#### 4.2 Análise das bandas L e K

A normalização entre as fases O-K, também chamada de Banda L, mostra respostas diferentes entre as espécies nos dois dias de coleta. No dia BI (Figura 6A) com exceção da *Aechmea blanchetiana* no horário do meio-dia, todas as outras medidas apresentaram bandas negativas, sendo que *Alcantarea imperialis*, destaca-se por apresentar a banda com maior amplitude negativa no horário de 17h. Em AI (Figura 6B) a amplitude da banda positiva observada foi maior e estava presente nas duas espécies (*Aechmea blanchetiana* e *Alcantarea imperialis*) no

horário do meio-dia. Nos demais horários de coleta as bandas foram negativas para ambas as espécies.

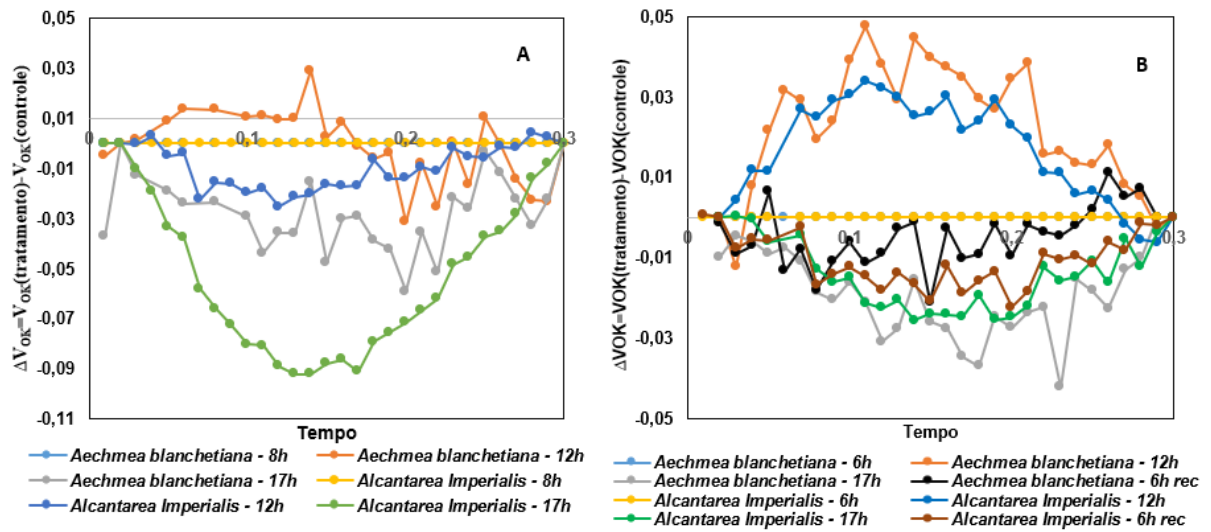


Figura 6.  $\Delta V_{OJ}$  estabelecida a partir da dupla normalização  $\Delta V_{OJ} = [V_{OJ}(\text{controle}) - V_{OJ}(\text{tratamento})]$ . A- Dia sob baixa intensidade de fluxo de fótons. B- Dia sob alta intensidade de fluxo de fótons.

A normalização O-J, também conhecida como Banda K, mostra que no dia BI (Figura 7A), com exceção da *Alcantarea imperialis* no horário das 17h, todas as outras medidas apresentaram curvas positivas. No dia AI, *Aechmea blanchetiana* (Figura 7B) apresentou banda positiva ao meio-dia e nos demais horários bandas negativas quando comparado com controle. *Alcantarea imperialis* (Figura 7C) não demonstrou resposta diferente, apresentando curva positiva ao meio-dia e nos demais horários banda negativa quando comparado ao controle.

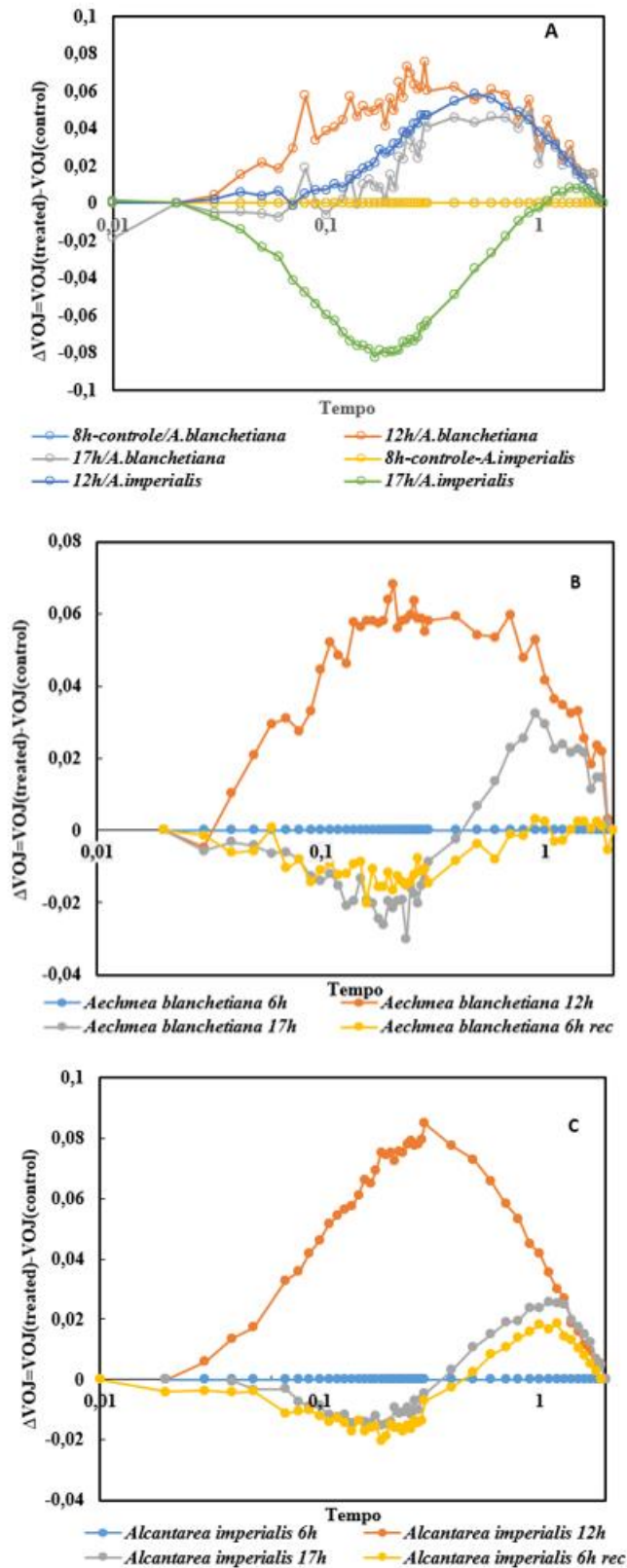


Figura 7: Variação da banda L ou  $\Delta VOK$  estabelecidas entre 0 e 0,3 ms a partir da dupla normalização  $\Delta VOK = [VOK(\text{controle}) - VOK(\text{tratamento})]$ . A - Banda L referente ao dia sob baixa intensidade de fluxo de fótons de *Alcantarea imperialis* e *Aechmea blanchetiana*. B - Banda L referente ao dia sob alta intensidade de fluxo de fótons de *Aechmea blanchetiana*. C - Banda L referente ao dia sob alta intensidade de fluxo de fótons de *Alcantarea imperialis*.

### 4.3 Análise De Coordenadas Principais

A Análise de Coordenadas Principais (PCoA) nos proporciona a possibilidade de observar a dissimilaridade a partir da distância euclidiana entre as amostras dentro de um conjunto de dados. A figura referente ao dia BI (Figura 8A) mostra o comportamento das duas bromélias em diferentes horários do dia. Os pontos 21, 22, 23 correspondem aos resultados obtidos para *Alcantarea imperialis* nos horários de 8h, 12h e 17h, respectivamente, enquanto os pontos 11, 12, 13 em vermelho representam a *Aechmea blanchetiana* nos mesmos horários (Figura 8 A e B). A magnitude da seta indica a magnitude da resposta fisiológica ao fator abiótico ao qual a planta está submetida e a proximidade com os parâmetros indica maior eficiência da variável que está próxima a planta no horário medido. Nota-se que *Alcantarea imperialis* ao meio-dia (22) apresenta uma maior distância em relação aos parâmetros  $P_i(\text{abs})$  e  $\phi P_0$ , indicando valores mais baixos para esses parâmetros nesse horário. Em contrapartida, o comportamento fisiológico nos horários de 8h e 17h pode ser explicado pela proximidade a esses mesmos parâmetros. *Aechmea blanchetiana*, por sua vez, apresenta uma magnitude de resposta menor, permanecendo próxima dos mesmos parâmetros ( $DI_0/RC$ ,  $F_0/F_M$ ,  $ABS/RC$ ) ao decorrer do dia. Ao que se refere ao dia AI (Figura 8B), foi acrescentado um novo horário de medida (6h-rec). Então, os pontos 21,22,23,24 correspondem à *Alcantarea imperialis* nos horários de 6h, 12h, 17, 6h-rec. Respectivamente. O mesmo também se aplica a *Aechmea blanchetiana* representada pelos pontos 11,12,13,14. Foi observado que no dia AI a magnitude e formato de resposta das duas espécies são diferentes quando comparados ao dia BI. *Alcantarea imperialis*, apresentou uma resposta triangular com uma menor magnitude de resposta, sendo que os pontos 21,23 e 24 podem ser explicados pela variável  $PI(\text{abs})$ , ao passo que, o ponto 22 pode ser explicado pelas variáveis  $DI_0/RC$  e  $ABS/RC$  junto com ao ponto 12 de *Aechmea blanchetiana* que também se apresentou próxima aos mesmos parâmetros. *Aechmea blanchetiana* também apresentou um comportamento diferente do dia BI, mostrando uma resposta linear em todos os pontos no dia AI, podendo essa resposta ser explicada pelo parâmetro  $V_J$ .

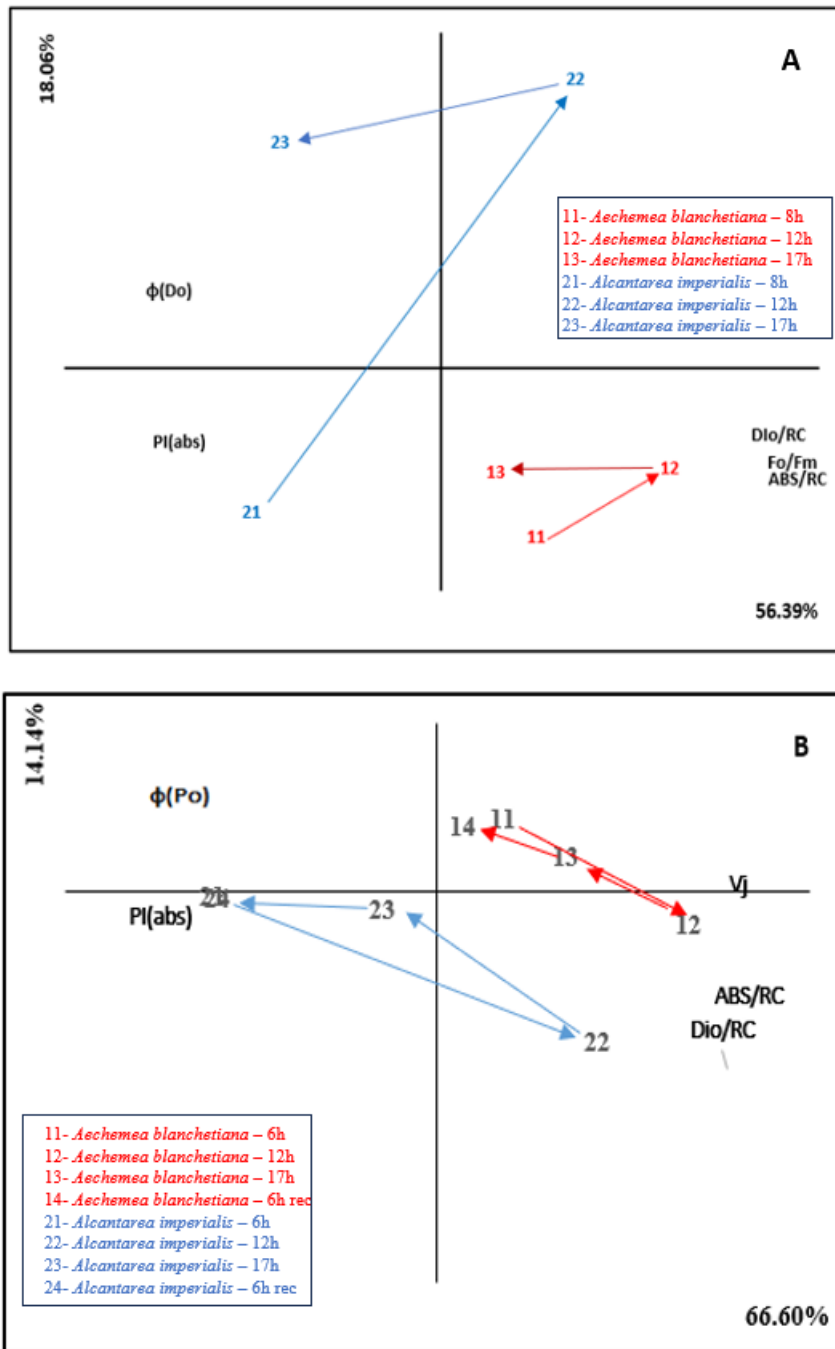


Figura 8: (PCoA) Análise de Coordenação Principal – Teste de similaridade entre as espécies. A - Referente ao dia sob baixa intensidade de fluxo de fótons. B- Referente ao dia sob alta intensidade de fluxo de fótons.

## 5 DISCUSSÃO

Os dados obtidos nesse estudo permitiram avaliar a resposta fisiológica de duas espécies de Bromeliaceae em condições diferentes de fluxo de fótons, onde as diferenças fotoquímicas entre elas acompanharam a mudança da intensidade luminosa durante o dia. A curva OJIP e as normalizações realizadas a partir dela, são muito sensíveis a fatores abióticos, principalmente de caráter estressante, tornando possível identificarmos o efeito dessas situações na estrutura e funcionamento do FSII, possibilitando a elaboração de imagens que são caracterizadas pela Intensidade da Fluorescência da clorofila *a* e pelo Teste JIP (Strasser *et al.* 2004). Nesse contexto, é possível dizer que existe uma relação direta entre a luz excessiva e a fotoinibição da fotossíntese, de modo que em horários de maior irradiação solar, a fotoinibição pode vir a ocorrer, atuando como um mecanismo fotoprotetor (Pinto *et al.* 2023).

A fotoinibição dinâmica descrita por Taiz & Zeiger (2004), explica que tal condição pode ser observada com o decréscimo da eficiência quântica da fotossíntese, seguida por aumento da dissipação da energia absorvida em forma de calor, interferindo na regulação dos processos biofísicos e bioquímicos da fotossíntese, afetando estrutural e funcionalmente os complexos de coleta de luz e nos fotossistemas II e I (Barták *et al.* 2023). Porém, é uma situação temporária e a eficiência quântica pode retornar ao seu valor inicial, quando o fluxo de fótons decresce. De acordo com Aronson *et al.* (2011) a capacidade de um organismo retornar para a sua situação inicial após um distúrbio ou estresse é denominada resiliência. Um estudo de Júnior *et al.* (2019), com a espécie *Phaseolus lunatus* L. mostrou que após um período de seca, quando reidratada mostrou indícios de recuperação fisiológica a partir de parâmetros fotossintéticos, mostrando-se uma espécie resiliente.

Os transientes da fluorescência OJIP (ver figura 2) mostraram um decréscimo da intensidade da fluorescência máxima ( $F_M$ ) no horário com maior intensidade luminosa (12h) nos dois dias de coleta e nas duas espécies avaliadas. De acordo com Dias e Marengo (2007), a redução de  $F_M$  é atribuída a dissipação não fotoquímica da energia luminosa, principalmente por meio do ciclo da xantofila, onde o excesso de energia é drenado para os carotenoides do ciclo, como por exemplo a luteína, essa característica pode ser atribuídas à sua estrutura, que possibilita que a energia seja dissipada em forma calor protegendo o fotossistema II de danos oxidativos induzidos pela alta radiação solar (Stringheta *et al.* 2006).

A partir disso, a diferença cinética dos pontos O-J e O-K permite a visualização da banda L e K, respectivamente, sendo que a banda L está relacionada à transferência de energia entre o complexo antena e o centro de reação (Yusuf *et al.* 2010). Logo, quando melhor for essa transferência de energia, mais eficiente será a utilização da energia de excitação, como verificado por Pascoalini, 2014, num estudo sobre eficiência fotoquímica de manguezais. Isso

é representado pela amplitude das bandas, que quando positivas sugerem uma redução na conectividade entre as unidades do Fotossistema II refletindo no desempilhamento dos tilacóides (Yusuf *et al.* 2010). O aparecimento da banda K positiva ocorre em situações de desequilíbrio entre o lado doador e receptor do Fotossistema II, que estão ligados ao complexo de evolução do oxigênio (CEO) (Yusuf *et al.* 2010). No presente estudo, foram observadas bandas positivas L e K nos dias BI e AI, principalmente nos horários com maior intensidade luminosa, o que confirma o estudo de Lemos-Filho (2010).

A partir das análises da fluorescência transiente OJIP, Strasser (2000) propôs um teste que foi intitulado Teste JIP, que consiste na aplicação dos dados armazenados no primeiro segundo da fluorescência, fornecendo parâmetros bioenergéticos. O conceito do Teste JIP é baseado na Teoria de Fluxo de Energia em Biomembranas (Figura 9) (Strasser et al. 2000, 2004), onde ABS refere-se ao fluxo de fótons absorvidos pelos pigmentos antena. A energia absorvida vai seguir por 3 rotas, parte é dissipada como calor e como fluorescência (F), outra parte é capturada (“trapping flux” - TR) pelo Centro de Reação e convertida em força redox, permitindo a redução do receptor primário de elétrons,  $Q_A$  para  $Q_A^-$ . Quando o receptor de elétrons é reoxidado se inicia o transporte de elétrons (“electron transport” - ET) entre o FSII e FSI (Strasser et al. 2000, 2004).

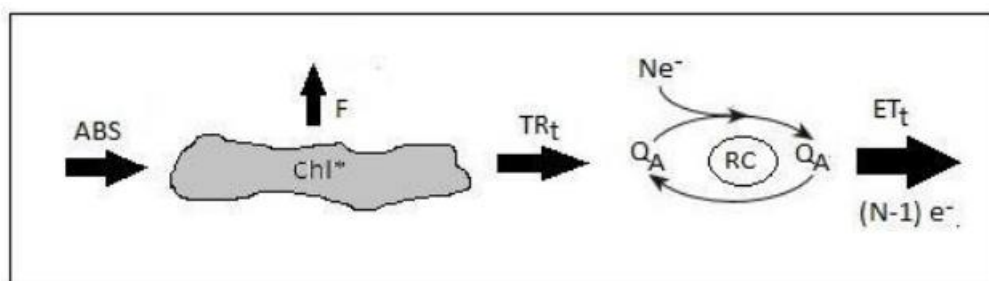


Figura 9. Modelo simplificado da Teoria de Fluxo em Biomembranas (Strasser 2000).

Desse modo, a partir do teste JIP, foi realizada uma análise de coordenadas principal (retornar a figura 6), essa análise mantém a integridade da estrutura dos dados, além de que, com esta) abordagem, é possível explorar ainda mais os padrões de resposta fisiológica e as correlações das variáveis que são mais sensíveis para mostrar os efeitos do ambiente no estudo. Sendo assim, é possível perceber que em AI, parâmetros relacionados com *quenching* da fotoinibição como  $DI_0/RC$ ,  $V_J$  e  $F_0/F_M$  aumentam, enquanto parâmetros relacionados ao *quenching* de desempenho como  $PI( abs)$  e  $F_V/F_M$  diminuem e que cada espécie apresenta um comportamento fotoquímico diferente, representada por uma trajetória triangular em *Alcantarea imperialis* e linear em *Aechmea blanchetiana* em AI, enquanto que no dia (BI), observamos respostas similares, mas com magnitude de resposta diferente, devido a intensidade luminosa (Boas *et al.*

2023), onde ambas as espécies apresentam uma tendência triangular em suas trajetórias fotoquímicas ao longo do dia.

A resposta fisiológica em função da variação da luz nesse estudo corrobora com o estudo de Pinheiro *et al.* (2019) que aborda a trajetória triangular como um parâmetro de resiliência de uma planta e a trajetória linear para descrever a fotoinibição dinâmica que também foi observada no estudo de Pinheiro *et al.* (2019) nas plantas de Poaceae, sob baixa e alta intensidade de fluxo de fótons em *Axonopus affinis*. No entanto, as repostas fisiológicas na gramínea foram diferentes, no dia sob baixa intensidade de fluxo de fótons ela demonstrou estado de fotoinibição dinâmica e no dia sob alta intensidade de fluxo de fótons ela demonstrou um comportamento histerético ou tolerante (Pinheiro *et al.* 2019)

Diante disso, pode-se dizer a resposta de tolerância de *Aechmea blanchetiana* é baseada em parâmetros como  $DI_0/RC$ ,  $F_0/F_M$  e  $ABS/RC$  por apresentar uma menor variação em função da variação de luz, o que foi observado tanto no dia AI como no BI. Enquanto, *Alcantarea imperialis*, segue o conceito de resiliência posto por Aronson *et al.* (2011), mostrando uma magnitude de resposta maior em função do estresse abiótico. Essas mudanças de curto prazo na fotoquímica do fotossistema II, mostram que essas plantas estão bem adaptadas e episódios fotoinibitórios de curto prazo, e que possuem mecanismos para tolerar tais episódios (Barták *et al.* 2023).

Sendo assim, de acordo com os conceitos ecológicos sobre resiliência definidos por Aronson *et al.* (2011), a trajetória triangular e linear descrita por Pinheiro *et al.* (2019) e a fotoinibição dinâmica descrita por Taiz & Zeiger (2004), *Alcantarea imperialis* pode ser considerada uma espécie resiliente, com a capacidade de aclimatar e buscar estratégias fotoquímicas de acordo com o estresse abiótico a qual está submetida, demonstrando uma maior magnitude de resposta em função da variação de luz, caracterizada pela resposta triangular. Ao passo que, *Aechmea blanchetiana* se mostra uma espécie tolerante, visto que, apresenta uma trajetória linear e com menor magnitude de resposta, o que sustenta o motivo do sucesso da espécie em projetos de revegetação em ambientes com altos níveis de estresse, justificando então o motivo pelo qual a espécie é utilizada para enriquecimento ambiental e facilitação para outras espécies em locais mais estressantes, como descrito no estudo de Ribeiro *et al.* (2021).

## 6 CONCLUSÃO

Por fim, nesse estudo foi possível observar que, em horários com maior intensidade de luz, as espécies buscam medidas fotoprotetoras como a dissipação de energia como calor e diminuindo a eficiência fotoquímica, alterando a dinâmica do aparato fotossintético, sendo observadas tanto no dia BI como em AI. Desse modo, *Alcantarea* se mostrou uma espécie tolerante em função da variação de luz, demonstrando isso da sua trajetória fotoquímica linear, baseado em parâmetros relacionados com o *Quenching* de fotoinibição, como um mecanismo fotoprotetor. Em contraponto, *Alcantarea imperialis* se mostrou uma espécie resiliente, a partir da sua trajetória triangular, baseada principalmente no mecanismo de fotoinibição dinâmica, baseada no ajuste de parâmetros relacionados ao *Quenching* de desempenho fotoquímico. Portanto, isso mostra que espécies de bromélia cultivadas, mesmo em condições similares de luz, possuem estratégias de fotoproteção diferentes, o que ajuda principalmente, na tomada de decisões em relação ao manejo e reintrodução dessas espécies no Jardim Botânico Palmarum.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, A. M. D. (2011). *Radiação Solar Global e fotossinteticamente ativa (PAR) Acima e abaixo do dossel de floresta de mata atlântica no estado de Alagoas*, 1- 73.
- Annighöfer, P., Petritan, A. M., Petritan, I. C., & Ammer, C. (2017). Disentangling juvenile growth strategies of three shade-tolerant temperate forest tree species responding to a light gradient. *Forest Ecology and Management*, 391, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.010>
- Aronson, J., Durigan, G., & Brancalion, P. H. (2011). Conceitos e definições correlatos à ciência e à prática da restauração ecológica. *Série Registros*, 1(1), 1–63.
- Baker, N. R. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55(403), 1607–1621. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh196>
- BALLARÉ, C. L. (2009). Illuminated behaviour: phytochrome as a key regulator of light foraging and plant anti-herbivore defence. *Plant, Cell & Environment*, 32(6), 713–725. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01958.x>
- Berry, Z. C., & Smith, W. K. (2013). Ecophysiological importance of cloud immersion in a relic spruce–fir forest at elevational limits, southern Appalachian Mountains, USA. *Oecologia*, 173(3), 637–648. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2653-4>
- Dias, D. P., & Marengo, R. A. (2006). Photoinhibition of photosynthesis in *Minquartia guianensis* and *Swietenia macrophylla* inferred by monitoring the initial fluorescence. *Photosynthetica*, 44(2), 235–240. <https://doi.org/10.1007/s11099-006-0013-x>
- Dias, D. P., & Marengo, R. A. (2006). Photoinhibition of photosynthesis in *Minquartia guianensis* and *Swietenia macrophylla* inferred by monitoring the initial fluorescence. *Photosynthetica*, 44(2), 235–240. <https://doi.org/10.1007/s11099-006-0013-x>
- Gomes, J. M. L., & Silva, N. N. F. (2013). Bromeliaceae das restingas do Estado do Espírito Santo, Brasil. *Natureza On Line*, 11(2), 79–89.
- Gonçalves, J. F. de C., Silva, C. E., Guimarães, D. G., & Bernardes, R. S. (2010). Análise dos transientes da fluorescência da clorofila a de plantas jovens de *Carapa guianensis* e de *Dipteryx odorata* submetidas a dois ambientes de luz. *Acta Amazonica*, 40(1), 89–98.
- Júnior, S. G. J., Moraes, J. G. L., Silva, F. D. B., Silva, B. do N., Souza, G. G., Oliveira, L. L. B., & Mesquita, R. O. (2019). Respostas fisiológicas de genótipos de fava (*Phaseolus lunatus* L.) submetidas ao estresse hídrico cultivadas no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34(3), 413–422.

- Maai, E., Nishimura, K., Takisawa, R., & Nakazaki, T. (2020). Light stress-induced chloroplast movement and midday depression of photosynthesis in sorghum leaves. *Plant Production Science*, 23(2), 172–181. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1673666>
- Martinelli, G., Vieira, C. M., Gonzalez, M., Leitman, P., Piratininga, A., Costa, A. F., & Forzza, R. C. (2008). Bromeliaceae da mata atlântica brasileira: lista de espécies, distribuição e conservação. *Rodriguésia*, 59(1), 209–258.
- Martinellil, G., & Moraes, M. A. (2013). *Livro Vermelho da Flora do Brasil* (CNCLORA).
- Monteiro, M. M., Giaretta, A., Pereira, O., & Menezes, L. F. (2014). Composição e estrutura de uma restinga arbustiva aberta no norte do Espírito Santo e relações florísticas com formações similares no Sudeste do Brasil. *Rodriguésia*, 65(1), 61–72.
- Pinheiro, C. L., Rosa, L. M. G., & Falqueto, A. R. (2019). Resilience in the functional responses of *Axonopus affinis* Chase (Poaceae) to diurnal light variation in an overgrazed grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 266–267, 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.007>
- Pinto, J. M., Silva, M. B. da, Brochado, L. N., Bianchini, A. P., & Barreto, A. B. (2022). Analysis of biological control in combating coconut sandpaper. *Agriculturae*, 4(1), 16–21. <https://doi.org/10.6008/CBPC2674-645X.2022.001.0002>
- Ribeiro, Izabela Ferreira, Luiz Fernando Menezes, and Marcelo Trindade Nascimento. "Papel da bromélia *Aechmea blanchetiana* (baker) lb sm na resposta ecofisiológica de *psidium cattleianum* sabine em uma área degradada de restinga em processo de revegetação no espírito santo-brasil." (2021).
- Strasser, R. (2004). Analysis of the Chlorophyll a Fluorescence Transient . *Springer*, 1, 321–362.
- Stringheta, P. C., Nachtigal, A. M., Oliveira, T. T., & Ramos, A. M. (2006). LUTEÍNA: PROPRIEDADES ANTIOXIDANTES E BENEFÍCIOS À SAÚDE. *Alim. Nutr*, 17(2), 229–238.
- Vilas-Boas, T., Duarte, A. A., della Torre, F., Lovato, M. B., & Lemos-Filho, J. P. (2023). Does acclimation in distinct light conditions determine differences in the photosynthetic heat tolerance of coffee plants? *Plant Biology*, 25(7), 1101–1108. <https://doi.org/10.1111/plb.13574>
- YADAV, A. et al. Light signaling and UV-B-mediated plant growth regulation. *Journal of Integrative Plant Biology*, v. 62, n. 9, p. 1270–1292, 1 set. 2020.
- Yusuf, Mohd. A., Kumar, D., Rajwanshi, R., Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., Govindjee, & Sarin, N. B. (2010). Overexpression of  $\gamma$ -tocopherol methyl transferase gene in transgenic *Brassica juncea* plants alleviates abiotic stress: Physiological and chlorophyll a fluorescence measurements. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1797(8), 1428–1438. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2010.02.00>