

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA VEGETAL

GEOVANE SOUZA GUDIN

**Eficiência fotossintética de *Canavalia rosea* (Sw.) DC. e
Eugenia astringens Cambess expostas a rejeito de mineração**

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a Diolina Moura Silva

Coorientador: Dr. Pedro Corrêa Damasceno Junior

Linha de Pesquisa no PPGBV: Ecologia Funcional de Algas e Plantas

Vitória, ES

2021

GEOVANE SOUZA GUDIN

**Eficiência fotossintética de *Canavalia rosea* (Sw.) DC. e
Eugenia astringens Cambess expostas a rejeito de mineração**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Biologia Vegetal.

Orientadora: Prof^a. Dra. Diolina Moura Silva

Coorientador: Dr. Pedro Corrêa Damasceno Junior

Vitória, ES

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

G922e Gudín, Geovane Souza, 1994-
Eficiência fotossintética de *Canavalia rosea* (Sw.) DC. e *Eugenia astringens* Cambess expostas a rejeito de mineração / Geovane Souza Gudín. - 2021.
62 f. : il.

Orientadora: Diolina Moura Silva.
Coorientador: Pedro Corrêa Damasceno Junior.
Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais.

1. Fotossíntese. 2. Fluorescência da clorofila a. 3. Ecofisiologia. 4. Restinga. 5. Elementos-traço. 6. Etapa fotoquímica. I. Silva, Diolina Moura. II. Damasceno Junior, Pedro Corrêa. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Humanas e Naturais. IV. Título.

CDU: 57

Geovane Souza Gudín

“Eficiência fotossintética de *Canavalia rosea* (Sw.) DC. e *Eugenia astringens* Cambess expostas à rejeito de mineração”.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Centro de Ciências Humanas e Naturais, da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Biologia Vegetal.

Aprovada em 09 de março de 2021.

Comissão Examinadora:

Profa. Dra. Diolina Moura Silva (UFES)

Orientadora e Presidente da Comissão



Prof. Dr. Pedro Correa Damasceno Junior (UFRRJ)

Coorientador

Prof. Dr. Antelmo Ralph Falqueto (UFES)

Examinador interno

Profa. Dra. Mariela Mattos da Silva (UFES)

Examinadora Interna

Prof. Dr. Ivoney Gontijo (CEUNES/UFES)

Examinador Externo

AURELIANO NOGUEIRA DA COSTA Assinado de forma digital por AURELIANO NOGUEIRA DA COSTA
Dados: 2021.03.29 21:15:58 -03'00'

Prof. Dr. Aureliano Nogueira da Costa (SFA/ES-MAPA)

Examinador Externo

Aos meus pais Ivanir e Oziene.

Aos meus avós Olavo (*in memoriam*) e Irani, Pedro e Maria (*in memoriam*).

Às minhas irmãs e sobrinha Gleiciene, Leisiene e Nicolly.

Dedico esse trabalho.

Agradecimentos

A Deus pelo sustento, capacitação, graça e dom da vida.

À Universidade Federal do Espírito Santo e ao Departamento de Ciências Biológicas pela oportunidade oferecida para realizar esse curso.

Ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal, juntamente à coordenação e professores do programa, pelos ensinamentos, amizade e incentivo.

À Rede Rio Doce Mar e à Fundação Espírito-santense de Tecnologia pela oportunidade de trabalho e aprendizado.

À Profa. Diolina Moura Silva pela amizade, carinho e ensinamentos e pela oportunidade de trabalhar e aprender em seu laboratório. Agradeço também pela orientação tanto acadêmica quanto profissional e pela dedicação na orientação desse trabalho.

Ao Prof. Pedro Correa Damasceno Jr. pela coorientação desse trabalho.

À minha ex-orientadora Dalza Gomes da Silva pelo incentivo, ensinamentos, carinho e amizade.

Ao Núcleo de Estudos da Fotossíntese, aos meus amigos do grupo, em especial a Dra. Thaís Araújo dos Santos, pela amizade, ensinamentos, momentos de distração, força e cuidado.

Aos meus amigos do grupo de pesquisa da Restinga pelos momentos de muito aprendizado, distrações, amizade e companheirismo.

Aos meus amigos pela força, momentos de distração e carinho.

Aos meus colegas de turma pelas trocas de experiências e pelos ensinamentos.

À minha família pelas orações e apoio.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

*O princípio da sabedoria é: Adquire a sabedoria; sim, com tudo o que possuis
adquire o entendimento. Provérbios 4:7.*

*Se, porém, algum de vós necessita de sabedoria, peça-a a Deus, que a todos
dá liberalmente, e nada lhes impropéria; e ser-lhe-á concedida. Tiago 1:5.*

Versão ARA – Bíblia Sagrada.

Resumo Geral

As plantas na Restinga estão adaptadas a ambientes com alta temperatura e salinidade. Entretanto, qualquer fator antropogênico pode influenciar na manutenção da homeostase e sobrevivência dessas plantas. O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana-MG, impactou todos os seres vivos que, direta ou indiretamente, entraram em contato com a lama contendo rejeito de mineração. Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi avaliar a resposta fotoquímica das plantas de *Canavalia rosea* (Sw.) DC. e *Eugenia astringens* Cambess ao rejeito, nas fitofisionomias Herbácea e Arbustiva, respectivamente, nas Restingas de Linhares e São Mateus, no norte do estado do Espírito Santo. Foram realizadas duas avaliações no ano de 2019: uma no período chuvoso e outra no período seco. Foram coletados solo e folhas para quantificação de elementos-traço e, pela técnica de fluorescência transiente da clorofila *a* foi avaliado o efeito desses elementos na etapa fotoquímica da fotossíntese dessas plantas. Foram detectados elementos-traço no solo e nas folhas das plantas bem como observou-se influência dos elementos-traço nas folhas durante a etapa fotoquímica da fotossíntese. Em *C. rosea* os parâmetros que correspondem a absorção, captura, redução e dissipação de energia foram alterados na presença de Chumbo (Pb), Cobalto (Co), Cobre (Cu) e Níquel (Ni). O Estanho (Sn) provocou aumento da fluorescência inicial (F_0) e diminuiu a eficiência de redução dos aceptores de elétrons do fotossistema I (δR_0). Já em *E. astringens*, Cádmio (Cd) e Chumbo (Pb) aumentaram a dissipação de energia (DI_0/RC) e o Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Ferro (Fe) e Chumbo (Pb) reduziram a eficiência do transporte de elétrons aos 30 mseg (F_5). Observou-se a desestruturação de componentes da cadeia de transporte de elétrons em ambas as espécies, nas duas épocas avaliadas, o que indicou o efeito negativo dos elementos-traço sobre a cadeia de transporte de elétrons. Assim, a extensão dos danos desses elementos na etapa fotoquímica da fotossíntese apresentou-se desde o mau funcionamento do centro de evolução do oxigênio e conectividade dos componentes do fotossistema II até a oxirredução dos aceptores finais de elétrons do fotossistema I. Tais resultados sugerem que os elementos-traço estão impactando a vegetação e interferindo no funcionamento do aparato fotoquímico das plantas.

Palavras-chave: Ecofisiologia; Degradação; Resíduos; Mata Atlântica.

Abstract

The plants in Restinga are adapted to environments with high temperature and salinity. However, any anthropogenic factor can influence the maintenance of homeostasis and survival of these plants. The rupture of the Fundão dam, in Mariana-MG, impacted all living beings that, directly or indirectly, came into contact with the mud containing mining waste. In this sense, the objective of this study was to evaluate the photochemical response of *Canavalia rosea* (Sw.) DC. and *Eugenia astringens* Cambess to the tailings, in Herbácea and Arbustiva phytophysiologicals, respectively, in Restingas de Linhares and São Mateus, in the north of the state of Espírito Santo. Two assessments were carried out in 2019: one in the rainy season and another in the dry season. Soil and leaves were collected for quantification of trace elements and, using the chlorophyll a transient fluorescence technique, the effect of these elements on the photochemical stage of photosynthesis of these plants was evaluated. Trace elements were detected in the soil and in the leaves of the plants, as well as the influence of trace elements in the leaves during the photochemical step of photosynthesis. In *C. rosea*, the parameters that correspond to energy absorption, capture, reduction and dissipation were changed in the presence of Lead (Pb), Cobalt (Co), Copper (Cu) and Nickel (Ni). Tin (Sn) caused an increase in the initial fluorescence (F_0) and decreased the efficiency of reduction of electron acceptors of photosystem I (δR_0). In *E. astringens*, Cadmium (Cd) and Lead (Pb) increased energy dissipation (DI_0/RC) and Cadmium (Cd), Cobalt (Co), Iron (Fe) and Lead (Pb) reduced the efficiency of electron transport at 30 msec (F_5). The disruption of components of the electron transport chain was observed in both species, in the two periods evaluated, which indicated the negative effect of trace elements on the electron transport chain. Thus, the extent of damage to these elements in the photochemical step of photosynthesis ranged from the malfunction of the center of evolution of oxygen and connectivity of the components of photosystem II to the oxidation of the final electron acceptors of photosystem I. Such results suggest that the trace elements are impacting vegetation and interfering with the functioning of the plant's photochemical apparatus.

Keywords: Ecophysiology; Degradation; Waste; Atlantic Forest.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

- Figura 1** Restinga no Estado do Espírito Santo. Fitofisionomia Herbácea (A), *Eugenia astringens* Cambess em floração (B), Fitofisionomia Arbustiva (C), *Eugenia astringens* Cambess em frutificação (D) e *Canavalia rosea* (Sw.) DC. (E). (Fonte imagens: Oberdan José Pereira) 17
- Figura 2:** Mapa de estudo fisiológico de *Canavalia rosea* e *Eugenia astringens*, no norte do Estado do Espírito Santo - Brasil. (Edição: Sidnei Vieira, Escritório de Projetos, Fundação Espírito-santense de Tecnologia) 17
- Figura 3:** Precipitação e temperatura ao longo do ano de 2019 nas regiões de Linhares e São Mateus, na região norte do Espírito Santo, Brasil. Edição: Dra. Thais Araújo dos Santos. Fonte: Incaper, INMET, 2019 19
- Figura 4:** Parâmetros da Curva OJIP em *Canavalia rosea* na Restinga do Norte do Espírito Santo exposta a rejeito de mineração, avaliada em duas épocas do ano de 2019 – chuvosa e seca – e em duas áreas: São Mateus (A1) e Linhares (A5). A normalização das etapas O – K, O – J e I – P para visualização das bandas foi realizada da seguinte forma, respectivamente: $[W_{OK} = (F_t - F_0) / (F_K - F_0)]$; $[W_{OJ} = (F_t - F_0) / (F_J - F_0)]$; $[W_{IP} = (F_t - F_i) / (F_P - F_i)]$ 32
- Figura 5:** Parâmetros do Teste JIP em *Canavalia rosea* na Restinga do Norte do Espírito Santo exposta a rejeito de mineração, avaliada em duas épocas do ano 2019 – chuvosa e seca – e em duas áreas: São Mateus (A1) e Linhares (A5). As análises foram submetidas ao Teste de Tukey $p > 0,05$ 34
- Figura 6:** Análise de Componentes Principais entre parâmetros da fluorescência da clorofila a e elementos-traço no solo e em folhas de *Canavalia rosea* na Restinga do Norte do Espírito Santo exposta a rejeito de mineração, avaliada em duas épocas do ano de 2019 – chuvosa e seca – e em duas áreas: Linhares e São Mateus. Edição: Dra. Sabrina Garcia Broetto 35
- Figura 7:** Dendrograma gerado a partir da Distância Euclidiana combinada ao método de agrupamento UPGMA em variáveis da fluorescência da clorofila a de plantas de *Canavalia rosea* em duas áreas: Linhares (Lin) e São Mateus (SM), no norte do Espírito Santo, considerando os períodos e locais. Edição: Dr. Pedro Corrêa Damasceno Junior. 36
- Figura 8:** Concentração de Cd (A), Fe (B), Pb (C) e Co (D) no tecido foliar de *Eugenia astringens* de quatro áreas de Restinga do Norte do Espírito Santo exposta a rejeito de mineração, avaliada nos períodos chuvoso e seco do ano de 2019 47
- Figura 9:** Parâmetros da curva OJIP de plantas de *Eugenia astringens* nos períodos chuvoso (quadrado) e seco (círculo) do ano de 2019, localizadas em quatro áreas amostrais (A), na Restinga Norte Capixaba 47
- Figura 10:** Parâmetros da curva OJIP de plantas de *Eugenia astringens* nos períodos chuvoso (quadrado) e seco (círculo) do ano de 2019, localizadas em quatro áreas amostrais (A), na Restinga Norte Capixaba. A normalização das etapas O – K, O – J e I - P para visualização das bandas foi realizada da seguinte forma, respectivamente: $[W_{OK} = (F_t - F_0) / (F_K - F_0)]$; $[W_{OJ} = (F_t - F_0) / (F_J - F_0)]$; $[W_{IP} = (F_t - F_i) / (F_P - F_i)]$. 48
- Figura 11:** Parâmetros do teste JIP de plantas de *Eugenia astringens* nos períodos chuvoso (C) e seco (S) do ano de 2019, localizadas em quatro áreas amostrais(A), na Restinga Norte Capixaba. 50

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Coordenadas geográficas das áreas amostrais das análises de *Canavalia rosea* e *Eugenia astringens*, na Restinga Norte Capixaba 18
- Tabela 2:** Significados dos parâmetros da fluorescência da clorofila *a* calculados pelo teste JIP baseado nos parâmetros descritos por Strasser et al. (2010) 21
- Tabela 3:** Quantificação de elementos-traço em folhas de *Canavalia rosea* e solos de duas áreas amostrais de Restinga (Linhares e São Mateus – Espírito Santo) 33
- Tabela 4:** Correlação dos parâmetros do Test JIP de plantas de *Eugenia astringens* com o teor de metais nas folhas de plantas localizadas em quatro áreas amostrais 50

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

µg	Micrograma
ANOVA	Análise de variância unilateral
APA	Área de Proteção Ambiental
As	Arsênio
Cd	Cádmio
Co	Cobalto
Con	Controle
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DNA	Ácido desoxirribonucleico
PS	Peso seco
F AAS	Espectrometria de absorção atômica por chama
Fe	Ferro
FSI	Fotossistema I
FSII	Fotossistema II
HNO ₃	Ácido nítrico
ICP-MS	Espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado
Incaper	Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Teste JIP	Parâmetros obtidos por meio de cálculos biofísicos dos dados de OJIP
Lat.	Latitude
LHCII	Complexo coletor de luz
Lin	Linhares
Long.	Longitude
mg	Miligramma
Mn	Manganês
ms	Milissegundo
Ni	Níquel
ns	Não significativo
OJIP	Técnica de fluorescência de clorofila adaptada ao escuro usada para medir estresse em plantas
Pb	Chumbo
PCA	Análise de Componentes Principais
PEA	Analisador de Eficiência da Planta
SM	São Mateus
Sn	Estanho
SPAD	Medidor de clorofila (<i>Soil Plant Analysis Development</i>)
UK	Reino Unido
UPGMA	Método de grupos de pares não ponderados usando uma média aritmética
V	Vanádio
Zn	Zinco
µmol	Micromol
µs	Microsssegundo

Sumário

1. INTRODUÇÃO GERAL	13
2. OBJETIVO GERAL	15
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	16
4.1 Área de estudo e material vegetal	16
4.2 Fluorescência de clorofila <i>a</i>	19
4.3 Determinação de elementos-traço na folha	22
4.4 Determinação de elementos-traço no solo	22
4.5 Análise estatística	23
4.5.1 <i>Canavalia rosea</i>	23
4.5.2 <i>Eugenia astringens</i>	23
5. REFERÊNCIAS	24
Capítulo 1	29
Respostas fotoquímicas de <i>Canavalia rosea</i> (Sw.) DC. aos elementos-traço dos rejeitos de mineração	
Resumo	29
Abstract	30
1. Introdução	31
2. Resultados	32
3. Discussão	36
4. Conclusão	39
6. Referências	40
Capítulo 2	43
Inibição da fotossíntese em plantas de <i>Eugenia astringens</i> Cambess induzida por elementos-traço contidos em rejeito de mineração, utilizando a fluorescência transiente da clorofila <i>a</i>	
Resumo	43
Abstract	44
1. Introdução	45
2. Resultados	46
3. Discussão	51
4. Conclusão	54
6. Referências	55
CONSIDERAÇÕES FINAIS	60

1. INTRODUÇÃO GERAL

O rompimento da barragem de Fundão, no município de Mariana, no estado de Minas Gerais, no Brasil, foi responsável pelo lançamento de um grande volume de rejeito proveniente da atividade de mineração, sendo considerado o pior desastre ambiental brasileiro. Ao percorrer todo o curso do Rio Doce, passando pelos estados de Minas Gerais (MG) e Espírito Santo (ES) até chegar à foz, no município de Linhares, a onda de rejeitos de mineração atingiu o litoral norte do estado do Espírito Santo e afetou as suas comunidades vizinhas. Essa contaminação pode provocar consequências por mais de cem anos, fazendo-se necessários monitoramentos e avaliações mais detalhadas sobre os impactos e organismos que serão afetados (BRASIL 2015; BENSUSAN 2016; CASTRO e ALMEIDA 2019; MINAS GERAIS e SEDRU 2016; SANTOS 2018; SILVA et al. 2020).

A Restinga é formada por um conjunto de depósitos arenosos costeiros e espécies vegetais que recobrem as praias e os cordões arenosos litorâneos e está sob áreas com teores variáveis de umidade e argila no solo. Essa formação é influenciada pelos ventos, deriva litorânea, regressão e transgressão marinha (BASTOS, 1995; CERQUEIRA, 2000; ESTEVES e LACERDA, 2000).

A composição vegetal na Restinga varia entre plantas rasteiras, passando por arbustos até plantas arbóreas. Mesmo em fragmentos de Restinga de regiões urbanizadas, pode-se encontrar espécies das famílias Fabaceae, Myrtaceae, Rubiaceae, Euphorbiaceae, Cyperaceae, Lauraceae e Sapindaceae (LACERDA et al., 1984; PEREIRA et al., 2000; SARTORELLI e CAMPOS FILHO, 2017; TURCQ, 1984).

A vegetação encontrada no ambiente de restinga possui alta capacidade de tolerância e adaptação à salinidade e altas temperaturas. Entretanto essas plantas também estão sujeitas a efeitos antropogênicos e ambientais que podem provocar modificações na sua estrutura e até mesmo na manutenção da biodiversidade. Dessa forma, condições ambientais adversas, como exposição a minerais em quantidades tóxicas, podem limitar o desenvolvimento, determinando suas chances de sobrevivência (FANTI, 2004).

O mecanismo de sobrevivência de uma planta depende do seu estado nutricional. Segundo Malavolta (1980), o elemento essencial é aquele que participa de reações vitais ou faz parte de um composto sem o qual ela não

sobrevive. Por outro lado, elementos que não fazem parte de seu metabolismo ou estrutura podem trazer consequências severas e limitar a sobrevivência da espécie no ambiente.

No solo são encontrados “elementos-traço” que são definidos como metais catiônicos e aniônicos presentes normalmente em baixas concentrações. Esses elementos-traço estão intimamente ligados à poluição e à toxicidade (independentemente de serem essenciais ou não). Exceção deve ser feita ao Alumínio (Al) e ao Ferro (Fe) encontrados em altas concentrações em alguns ambientes, mas que também são considerados como elementos-traço por alguns autores devido a sua toxicidade (YADA et al., 2020; KABATA-PENDIAS, 2001; SPARKS, 1995). Em 2002, Duffus abordou o termo “metal pesado” relatando as controvérsias existentes no uso desta expressão causadas pela utilização da densidade ou toxicidade do elemento para defini-lo. Nesse sentido preferiu-se utilizar o termo “elemento-traço” no presente trabalho.

De acordo com Das Dores e Zago (2017), o rejeito de minério do rompimento da barragem de Fundão, Mariana – MG, provocou um retardamento no crescimento vegetativo de *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty, assim como diminuiu a ação de micorrizas no solo. Do mesmo modo, Da Silva Cruz (2018), avaliando o efeito desse desastre na germinação de sementes e plantas arbóreas de diferentes famílias da Mata Atlântica, mostrou que os rejeitos reduziram a área foliar, o teor de clorofila e o rendimento quântico do fotossistema II (FSII) das plantas avaliadas.

A fotossíntese, processo primordial de sobrevivência das plantas, utiliza a energia luminosa para a excitação de elétrons nas moléculas de clorofila que, quando transferidos para a cadeia de transporte de elétrons (CTE), são usados na sua etapa fotoquímica. Uma pequena parte da energia de excitação não é utilizada na etapa fotoquímica, sendo dissipada como calor ou emitida como fluorescência.

Em 1931, Kautsky e Hirsh descobriram que o tecido fotossintético, depois de um tempo de adaptação ao escuro, apresenta modificações nas características de emissão da fluorescência da clorofila *a* quando expostas a luz, conhecido como efeito Kautsky. As técnicas de fluorescência transiente são bastantes úteis para avaliar as propriedades fotossintéticas funcionais de uma planta. Estudos com a fluorescência da clorofila *a* podem indicar a influência

externa inibindo ou estimulando o desenvolvimento da planta (KAUTSKY e HIRSCH, 1931; STIRBET et al., 2014; STRASSER e STRASSER, 1995; STRASSER et al., 2000; STRASSER et al., 2010). Cuchiara (2013) testou o aumento dos teores de Zinco (Zn) em plantas de *Ipomoea batatas* (L.) Lam. e mostrou que este elemento influenciou positivamente a estrutura e funcionalidade do fotossistema I (FSI), assim como aumentou a dissipação de energia luminosa no FSII.

As espécies vegetais que vivem em ambiente alterado pela ação antrópica merecem destaque e estudos, pois possuem propriedades fisiológicas ainda desconhecidas que lhes proporcionam tolerância às condições adversas. O estudo do comportamento ecofisiológico dessas espécies pode propiciar a descoberta de novos compostos e mecanismos de tolerância ao estresse, bem como podem auxiliar no monitoramento e tomada de ações mais efetivas para conter o avanço dos impactos antrópicos.

Sendo assim, com base nessas informações, observou-se a necessidade de analisar as respostas das plantas expostas ao rejeito que chegou no litoral de São Mateus e Linhares pela foz do Rio Doce em plantas de *Canavalia rosea* (Sw.) DC. e *Eugenia astringens* Cambess de forma rápida e não invasiva pela técnica da fluorescência transiente da clorofila *a*.

2. OBJETIVO GERAL

Analisar as respostas fotossintéticas de plantas de *Canavalia rosea* (Sw.) DC. e *Eugenia astringens* Cambess expostas a rejeito de mineração nas Restingas do Norte do Espírito Santo.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a concentração de elementos-traço no solo de cinco áreas da Restinga do Norte do Espírito Santo;
- Determinar a concentração de elementos-traço em folhas de *Canavalia rosea* e *Eugenia astringens* expostas a rejeito de mineração;
- Analisar a atividade fotoquímica em folhas de plantas de *Canavalia rosea* e *Eugenia astringens* expostas a rejeito de mineração, utilizando a fluorescência da clorofila *a*;

- Correlacionar os parâmetros da curva OJIP e do Teste JIP obtidos pela cinética da fluorescência da clorofila *a* de plantas de *Canavalia rosea* e *Eugenia astringens* com os elementos-traço do solo de cinco áreas na Restinga do Norte do Espírito Santo;

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo e material vegetal

Foram escolhidas duas espécies de plantas na Restinga: *Canavalia rosea* (Sw.) DC., na fitofisionomia Herbácea, e *Eugenia astringens* Cambess, na fitofisionomia Arbustiva (Figura 1). As análises de *Canavalia rosea* foram realizadas em duas áreas amostrais (A1 e A5) e, as de *Eugenia astringens*, em quatro áreas amostrais (A1, A2, A3 e A4) (Figura 2; Tabela 1), na Restinga, ao longo da planície costeira do estado do Espírito Santo, Brasil, nos meses de abril (período seco) e de outubro (período chuvoso) de 2019, seguindo a classificação climatológica de Pezzopane et al. (2012). De acordo com Cunha et al. (2016) o solo dessas áreas é classificado como Neossolo Quartzarênico. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2013), o Neossolo Quartzarênico apresenta textura areia ou areia franca em todos os horizontes e são essencialmente quartzosos, com 95% de quartzo, calcedônia e opala nas frações areia grossa e areia fina, e praticamente sem minerais primários alteráveis (menos resistentes ao intemperismo).



Figura 1 Restinga no Estado do Espírito Santo. Fitofisionomia Herbácea (A), *Eugenia astringens* Cambess em floração (B), Fitofisionomia Arbustiva (C), *Eugenia astringens* Cambess em frutificação (D) e *Canavalia rosea* (Sw.) DC. (E). (Fonte imagens: Oberdan José Pereira)

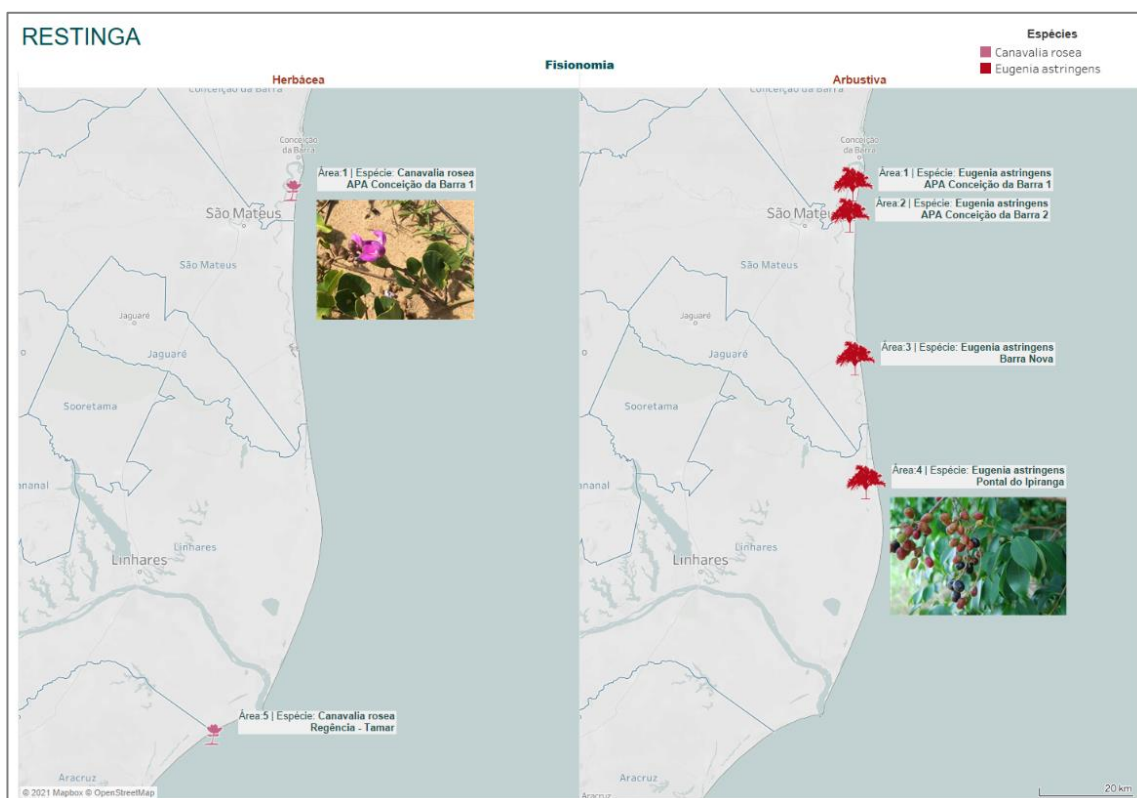


Figura 2: Mapa de estudo fisiológico de *Canavalia rosea* e *Eugenia astringens*, no norte do Estado do Espírito Santo - Brasil. (Edição: Sidnei Vieira, Escritório de Projetos, Fundação Espírito-santense de Tecnologia)

Tabela 1: Coordenadas geográficas das áreas amostrais das análises de *Canavalia rosea* e *Eugenia astringens*, na Restinga Norte Capixaba

Área	Restinga	Região	Latitude/Longitude
A1	APA de Conceição da Barra	São Mateus	-18° 37' 37.84" S 39° 44' 4.88" W
A2	APA de Conceição da Barra	São Mateus	-18° 40' 57.13" S 39° 44' 41.08" W
A3	Barra Nova Sul	São Mateus	-18° 57' 29.09" S 39° 44' 14.02" W
A4	Pontal do Ipiranga	Linhares	-19° 11' 21.36" S 39° 42' 26.34" W
A5	Projeto Tamar/Regência	Linhares	-19° 66' 9.48" S 39° 88' 73.63" W

Os dados da precipitação e temperaturas máxima e mínima foram cedidos pelo Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper) das estações instaladas do INMET em Linhares (Lat.: -19.36, Long.: -40.07; 40 m de altitude) e em São Mateus (Lat.: -18.68, Long.: -39.86; 28,66 m de altitude) (Figura 3) (BRITTO et al., 2019).

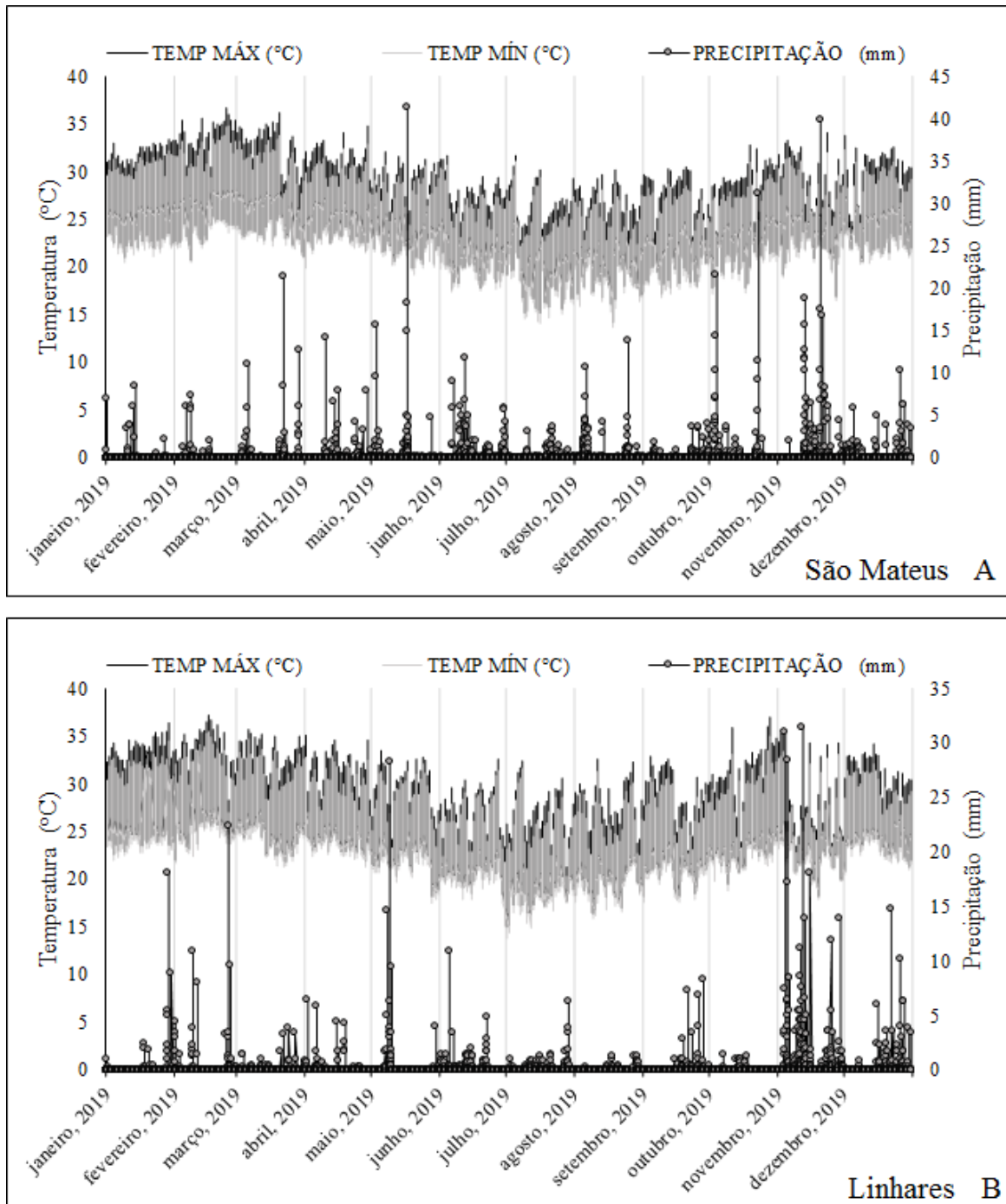


Figura 3: Precipitação e temperatura ao longo do ano de 2019 nas regiões de Linhares e São Mateus, na região norte do Espírito Santo, Brasil. Edição: Dra. Thais Araújo dos Santos. Fonte: Incaper, INMET, 2019

4.2 Fluorescência de clorofila *a*

As medições de fluorescência da clorofila *a* foram realizadas usando um fluorômetro portátil (HandyPEA, Hansatech Instruments®, King's Lynn, Norfolk, UK) em folhas jovens totalmente expandidas entre 8 h e 10 h (hora solar). Cinco plantas foram selecionadas em cada área de estudo com medições realizadas

em quatro folhas por planta. As folhas foram previamente adaptadas ao escuro por 1 hora usando cliques foliares (Hansatech, UK), a fim de se obter total oxidação dos componentes da cadeia de transporte de elétrons. Os sinais de fluorescência foram registrados a cada 10 μ s durante 1 s de iluminação (3.000 μ mol fótons $m^{-2} s^{-1}$), seguindo as orientações de Strasser e Strasser (1995) e Strasser et al. (2000, 2004). Os resultados da cinética de fluorescência foram tabulados em planilha eletrônica com o software PEA Plus v1.10 para obtenção da curva OJIP e dos parâmetros do teste JIP (Tabela 2).

A normalização da curva OJIP foi realizada usando as seguintes etapas: O ($F_0 = 0,02$ ms) e P (fluorescência máxima, $F_M = \sim 300$ ms), que forneceram uma base para comparação entre as diferentes curvas. A área de coleta 1 (A1) estudada neste trabalho refere-se à Área de Proteção Ambiental de Conceição da Barra (18 ° 37' 37,84" S 39 ° 44' 4,88" W), aproximadamente 110 km ao norte da foz do Rio Doce, e foi usada como controle por ser mais distante da foz do Rio Doce e ser uma área protegida.

As curvas foram expressas como cinética da fluorescência transiente da clorofila *a* relativa entre os passos O e P [$W_{OP} = (F_t - F_0) / (F_M - F_0)$]. No cálculo da diferença cinética entre as curvas normalizadas da fluorescência variável relativa, curvas positivas (acima do controle) indicam que houve uma perda (emissão) de energia na forma de fluorescência (KALAJI et al. 2012; STRASSER et al. 2010).

Para permitir a visualização da banda L ($\sim 0,15$ ms), a fluorescência variável relativa foi normalizada entre as etapas O (0,02 ms) e K (0,3 ms) [$W_{OK} = (F_t - F_0) / (F_K - F_0)$] e a diferença cinética foi denominada ΔW_{OK} . A banda K ($\sim 0,3$ ms) foi visualizada quando a normalização foi realizada entre as etapas O (0,02 ms) e J (2 ms) [$W_{OJ} = (F_t - F_0) / (F_J - F_0)$], e a diferença cinética foi marcada como ΔW_{OJ} . Para observação da banda G (~ 100 ms), os dados foram normalizados entre as etapas I (30 ms) e P (~ 300 ms) [$W_{IP} = (F_t - F_I) / (F_P - F_I)$] e a diferença foi denominada ΔW_{IP} (MORALES et al. 2013; PERBONI et al. 2015).

O índice de clorofila total foi determinado nas mesmas folhas usadas para medições de desempenho fotoquímico por meio de um medidor de clorofila portátil (modelo SPAD-502 Plus, Konica Minolta Optics Inc., Osaka Japão). Este equipamento fornece um método conveniente e de baixo custo para medir o

conteúdo relativo de clorofila de uma amostra de folha usando medições de absorvância óptica de comprimento de onda duplo (620 e 940 nm) (MARKWELL et al., 1995).

Tabela 2: Significados dos parâmetros da fluorescência da clorofila a calculados pelo teste JIP baseado nos parâmetros descritos por Strasser et al. (2010)

Parâmetro	Definição
Area	Área acima da curva de fluorescência da clorofila entre F_0 e F_M (refletindo o tamanho do pool de plastoquinona).
F_0	Fluorescência inicial (com 20 μ s) após o início da iluminação actínica.
F_M	Fluorescência máxima (quando todos os centros de reação (RC) do FSII estão fechados) – igual a F_P .
F_V	Fluorescência máxima variável.
F_4	Fluorescência máxima no tempo 2 ms.
F_5	Fluorescência máxima no tempo 30 ms.
F_0/F_M	Produção quântica basal do processo não-fotoquímico no FSII.
F_V/F_M	Performance fotoquímica do FSII.
S_M	Area normalizada acima da curva OJIP.
N	O número que indica quantas vezes a quinona A (Q_A) é reduzida até atingir o valor da fluorescência máxima.
ABS/RC	Fluxo de absorção de luz por centro de reação ativo do FSII.
DI_0/RC	Fluxo de energia dissipada por RC ativo no tempo = 0.
TR_0/RC	Fluxo de captura de energia (levando à redução de Q_A) por RC, em t=0.
ET_0/RC	Fluxo de transporte de elétrons (além de Q_A) por RC.
RE_0/RC	Fluxo de elétrons reduzindo aceptores finais de elétrons no lado acceptor do FSI por RC.
ϕP_0	Rendimento quântico máximo do fotossistema II.
ψE_0	Rendimento quântico do transporte de elétrons de Q_A para os aceptores de elétrons do intersistema.
ϕE_0	Rendimento do transporte de elétrons.
δR_0	Eficiência com que um elétron pode se mover a partir do intersistema para os receptores de elétrons no FSI.
ϕR_0	Rendimento quântico de redução dos aceptores finais de elétrons do FSI por fótons absorvidos.
PI_{ABS}	Índice de desempenho (potencial) para a conservação de energia de fótons absorvidos pelo FSII para a redução aceptores de elétrons do intersistema.
PI_{TOTAL}	Índice de desempenho (potencial) para conservação de energia de fótons absorvidos pelo FSII para a redução de aceptores finais de FSI.

4.3 Determinação de elementos-traço na folha

Folhas de *C. rosea* e *E. astringens* foram coletadas, armazenadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar a 60 °C até obtenção de peso constante. Em seguida, foram enviadas para análises de elementos-traço (As, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sn, V, Zn e Al) ao Laboratório de Espectrometria Atômica do Departamento de Química da Universidade Federal do Espírito Santo.

Foram utilizados cerca de 0,1 g da amostra de folha pulverizada para a decomposição com 5,0 mL de ácido nítrico (HNO₃) concentrado destilado e 1,0 mL de água (H₂O). As amostras foram deixadas em repouso por 10 minutos para uma pré-decomposição e, em seguida, levadas ao micro-ondas, onde foram submetidas a uma rampa de aquecimento de 5 minutos, até alcançar 180 °C e permanecerem nesta temperatura por 20 minutos. Após resfriamento, a mistura foi filtrada e avolumada com água ultrapura para 25,0 mL. Posteriormente as amostras foram analisadas por ICP-MS (espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado) e F AAS (espectrometria de absorção atômica por chama), em que foram determinadas as concentrações de metais.

4.4 Determinações de elementos-traço do solo

Foram coletadas amostras de solo da camada de 0-20 cm do perfil do solo, em 10 pontos de amostragem diferentes em zigue-zague, nas áreas avaliadas. Para a quantificação das concentrações de elementos-traço (As, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sn, V, Zn e Al), foi utilizado um trado de coleta de solo (Sonda Amostradora). Eles foram armazenados em temperatura ambiente e, posteriormente, encaminhados ao Laboratório de Espectrometria Atômica do Departamento de Química da Universidade Federal do Espírito Santo para determinação das concentrações totais de elementos-traço.

As amostras de sedimento foram quarteadas e peneiradas a fim de obter uma fração <63 µm. Para a decomposição, foi utilizado cerca de 0,250 g das amostras, adicionado 10 mL de ácido nítrico (HNO₃). As amostras foram submetidas ao aquecimento assistido por radiação micro-ondas através de um programa de temperatura que consiste em aquecimento por 5,5 ± 0,25 min até atingir a temperatura de 175 ± 5°C, com permanência nessa temperatura por 4,5 minutos. Após resfriamento, a mistura foi filtrada e avolumada com água ultrapura (H₂O) para 15,0 mL. Posteriormente, as amostras foram analisadas por

ICP-MS (espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado) e F AAS (espectrometria de absorção atômica por chama), em que foram determinadas as concentrações de metais.

4.5 Análise estatística

4.5.1 *Canavalia rosea*

Foram avaliadas, em duas áreas amostrais, cinco plantas de *C. rosea* por área. As análises estatísticas dos dados de *Canavalia rosea* foram realizadas da seguinte forma: foi estimada a diversidade das variáveis da fluorescência da clorofila *a* por meio da combinação entre a Distância Euclidiana média e o método de agrupamento por otimização de Tocher, e, para fim comparativo, entre a Distância Euclidiana e o método hierárquico Unweighted pair-group method using an arithmetic average (UPGMA). As análises foram realizadas pelo programa R (CLARKE e GREEN, 1988; KELLEY et al., 1996; R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

4.5.2 *Eugenia astringens*

Foram avaliadas, em quatro áreas amostrais, cinco plantas de *E. astringens* por área. Para os dados de *Eugenia astringens*, foi realizada uma análise de variância unilateral (ANOVA) e um teste de Duncan para determinar a existência de diferenças. A diferença foi considerada estatisticamente significativa quando $p < 0,05$ ($n = 5$). Para identificar parâmetros significativos associados a diferentes áreas e períodos de coleta, aplicou-se uma análise estatística multivariada: análise de componentes principais (PCA). Todas as análises estatísticas foram calculadas usando o software InfoStat 2018 (Statistical Software, Córdoba, Argentina).

5. REFERÊNCIAS

BASTOS, M. de N. do C. **A importância das formações vegetais na Restinga e do manguezal para as comunidades pesqueiras.** 1995.

BENSUSAN, N. De Mariana a Abrolhos, a pedagogia da lama em dez lições. In: **Inst. Socioambiental.** Disponível em: <https://www.socioambiental.org/pt-br/blog/blog-do-ppds/de-mariana-a-abrolhos-a-pedagogia-da-lama-em-dez-licoes> 2016.

BRASIL, IB de MI. **Água e Mineração: fatos e verdades.** 2015.

BRITO, T., PELLA, B., PANTOJA, P., MACHADO, A. D. J., SPADETO, J., RAMOS, H. D. A., ... e MEDEIROS NETO, J. **Boletim climatológico trimestral do Espírito Santo. Incaper,** 2019.

CASTRO, L. S. de, ALMEIDA, E. S. de. Desastres e desempenho econômico: avaliação do impacto do rompimento da barragem de Mariana. *Geosul* 34:406–429. doi: 10.5007/2177-5230.2019v34n70p406 2019.

CERQUEIRA, R. **Biogeografia das Restingas. Ecologia de Restingas e lagoas costeiras,** v. 1, p. 65-75, 2000.

CLARKE, K. R.; GREEN, R. H. Statistical design and analysis for a 'biological effects' study. **Marine Ecology Progress Series.** v. 92, p. 213-226, 1988.

CUCHIARA, C. C. Efeito do Cu e sua interação com o Zn no cultivo de plantas de batata-doce: alterações morfofisiológicas e bioquímicas. **Tese. Universidade Federal de Pelotas.** 2013.

CUNHA, A. de M.; FEITOZA, H. N.; FEITOZA, L. R.; OLIVEIRA, F. S. de.; ANI, J. L.; CARDOSO, J. K. F.; TRINDADE, F. S. Atualização da legenda do mapa de reconhecimento de solos do Estado do Espírito Santo e implementação de interface no GEOBASES para uso dos dados em SIG. **Geografares,** [S.L.], n. 23, p. 32 a 66, dez. 2016.

DA SILVA CRUZ, F. V. **Desempenho de sementes e plântulas de espécies arbóreas no rejeito oriundo do rompimento da Barragem de Fundão**

(Mariana, MG). Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais. 2018.

DAS DORES, N. C.; ZAGO, V. C. P. **II-517 – Crescimento De Vetiver (*Chrysopogon Zizanioides*) Em Rejeitos Do Rompimento Da Barragem De Fundão No Município De Mariana-Mg**. Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – FENASAN. 2017.

DUFFUS, J. H. “Heave metals” – a meaningless term? *Pure and Applied Chemistry*, **Oxford**, v.74, n.5, p.793-807, 2002.

ESTEVES, F. de A.; LACERDA, L. D. **Ecologia de Restingas e lagoas costeiras**. Macaé: NUPEM/UFRJ, 2000.

FANTI, S. C. et al. Processo germinativo de sementes de paineira sob estresses hídrico e salino. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 9, p. 903-909, 2004.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**–CRC Press. Boca Raton, p. 403, 2001.

KALAJI, H.M.; GOLTSEV, V.; BOSA, K.; ALLAKHVERDIEV, S.I.; STRASSER, R.J.; GOVINDJEE. Experimental in vivo measurements of light emission in plants: A perspective dedicated to David Walker. *Photosynth Res* 114:69–96. doi: 10.1007/s11120-012-9780-3 2012.

KAUTSKY, H.; HIRSCH, A. Neue versuche zur kohlenensäureassimilation. *Naturwissenschaften*, v. 19, n. 48, p. 964-964, 1931r

KELLEY, L. A.; GARDNER, S. P.; SUTCLIFFE, M. J. An automated approach for clustering an ensemble of NMRderived protein structures into conformationally-related subfamilies. *Protein Engineering*, v. 9, p. 1063-1065, 1996.

LACERDA, L. D. de et al. **Restingas: origem, estrutura, processos**. Niterói: CEUFF, p. 159-193, 1984.

MALAVOLTA, E. et al. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.

MARKWELL, J.; OSTERMAN, J.C.; MITCHELL, J.L. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. **Photosynthesis Research**, v. 46, p. 467-472, 1995.

MINAS GERAIS, G. DO E. De; SEDRU, S. De e De; DRPU e GM. Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana - MG. **Secr Estado Desenvolv Reg Urbana e Gestão Metrop** 287. 2016.

MORALES, F.; AGUILAR, M.; KING, B.; LOTINA-HENNSEN B. Derivatives of diterpen labdane-8 α ,15-diol as photosynthetic inhibitors in spinach chloroplasts and growth plant inhibitors. **J Photochem Photobiol B** 125C:42–50. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2013.04.010 2013.

PERBONI, A.T.; MARTINAZZO, E.G.; SILVA, D.M.; BACARIN, M.A. Baixas temperaturas sobre a fluorescência da clorofila a em plantas de diferentes híbridos de canola. **Cienc Rural** 45:215–222. doi: 10.1590/0103-8478cr20131427 2015.

PEREIRA, O. J.; ASSIS, A. M. de. Florística na Restinga de Camburi, Vitória, ES. **Acta botanica brasilica**, v. 14, n. 1, p. 99-111, 2000.

PEZZOPANE, J. E. M. et al. **Agrometeorologia: aplicações para o Espírito Santo**. Alegre, ES: CAUFES, 2012.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2011. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

SANTOS, G.R. **Técnicas de reconhecimento de padrões para a avaliação de corpos hídricos afetados por rejeitos do rompimento da barragem de Fundão**. 152. 2018.

SARTORELLI, P. A. R.; CAMPOS FILHO, E. M. Guia de plantas da regeneração natural do Cerrado e da Mata Atlântica. São Paulo, **Agroicone**, 140p, 2017.

SILVA, L.C. Da; FREITAS-SILVA, L. De; ROCHA, D.I.; PEREIRA, J. De S.C.;

ASSIS, D.E. De F. Leaf Morpho-anatomical Structure Determines Differential Response Among Restinga Species Exposed to Emissions from an Iron Ore Pelletizing Plant. **Water, Air, Soil Pollut** 231:152. doi: 10.1007/s11270-020-04533-x 2020.

SOLOS, Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**: Rio de Janeiro, 2013.

SPARKS, D.L. **Environmental soil chemistry**. San Diego: Academic Press, 1995. 267p.

STIRBET, A. et al. Modeling chlorophyll a fluorescence transient: relation to photosynthesis. **Biochemistry** (Moscow), v. 79, n. 4, p. 291-323, 2014.

STRASSER, B. J., STRASSER, R. J. Measuring fast fluorescence transients to address environmental questions: The JIP-test. In: P. Mathis, (Ed.) Photosynthesis: from 74 Light to Biosphere. **Kluwer Academic Publishers**, Dordrecht, Netherlands, p. 977-980, 1995.

STRASSER, R. J.; SRIVASTAVA, A.; TSIMILLI-MICHAEL, M. **The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples**. In: Yunus, M.; Pathre, U.; Mohanty, P. (eds), Probing Photosynthesis: Mechanisms, Regulation and Adaptation, Taylor and Francis, London, 445-483 p. 2000.

STRASSER, R. J.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; QIANG, S.; GOLTSEV, V. Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820 nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant *Haberlea rhodopensis*. **Biochim. Biophys. Acta (BBA) – Bioenerg.**, p.1313-1326, 2010.

STRASSER, R.J.; TSIMILLI-MICHAEL M. e SRIVASTAVA A. Analysis of the Chlorophyll a Fluorescence Transient. In: Papageorgiou GC, Govindjee (eds) Chlorophyll a Fluorescence. **Advances in Photosynthesis and Respiration**. Springer, Dordrecht, pp 46–48 2004.

TURCQ, B. **Restingas: Origem, Estrutura e Processos**. CEUFF, Niterói, 1984.

YADA, M. M.; MELO, W. J. de; MELO, V. P. de. Elementos-traço no solo, na planta e no grão de plantas de milho cultivadas em latossolos tratados com lodo

de esgoto por 16 anos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 371-379, 2020.

Capítulo 1

Respostas fotoquímicas de *Canavalia rosea* (Sw.) DC. aos elementos-traço dos rejeitos de mineração

Canavalia rosea (Sw.) DC. photochemical responses to trace elements of mining waste

Resumo

As plantas de *Canavalia rosea* (Sw.) DC. estão inseridas em locais próximos à praia, na fitofisionomia Herbácea na Restinga. Nessas áreas as plantas estão adaptadas à altas concentrações salinas. O desastre de Mariana atingiu o Rio Doce e, conseqüentemente, o mar capixaba. Toda a vegetação dependente dessas águas ficou à mercê dos rejeitos de mineração. Portanto, as plantas de *C. rosea* receberam os rejeitos de mineração depositados nessas águas. Assim, o objetivo deste trabalho foi utilizar a técnica de fluorescência da clorofila a para avaliar as respostas fotossintéticas de plantas de *Canavalia rosea* (Sw.) DC. expostas aos rejeitos de mineração, em duas épocas – chuvosa e seca –, no ano de 2019. Detectou-se Arsênio, Cádmio, Cromo, Cobalto, Cobre, Ferro, Manganês, Níquel, Chumbo, Estanho, Vanádio, Zinco e Alumínio no solo e nas folhas das plantas. Chumbo, Cobalto, Níquel e Cobre alteraram os valores dos parâmetros que correspondem a absorção, captura, redução e dissipação de energia. A fluorescência inicial e a eficiência dos aceptores de elétrons do fotossistema I foram prejudicadas na presença de Estanho. Observou-se a desestruturação de componentes da cadeia de transporte de elétrons na presença de elementos-traço. Tais resultados sugerem que os elementos-traço estão impactando a vegetação e interferindo o funcionamento do aparato fotoquímico das plantas.

Palavras-chave: Tolerância; Espécie nativa; Estresse abiótico; Mecanismos bioquímicos.

Abstract

The plants of *Canavalia rosea* (Sw.) DC. are inserted in places close to the beach, in the Herbaceous phytophysiology in Restinga. In these areas the plants are adapted to high salt concentrations. Mariana's disaster hit the Rio Doce and, consequently, the Espírito Santo sea. All vegetation dependent on these waters was at the mercy of mining waste. Therefore, the *C. rosea* plants received the mining waste deposited in these waters. Thus, the objective of this work was to use the chlorophyll *a* fluorescence technique to evaluate the photosynthetic responses of *Canavalia rosea* (Sw.) DC. plants exposed to mining tailings, in two seasons - rainy and dry - in 2019. Arsenic, Cadmium, Chrome, Cobalt, Copper, Iron, Manganese, Nickel, Lead, Tin, Vanadium, Zinc and Aluminum were detected in the soil and on the leaves of the plants. Lead, Cobalt, Nickel and Copper changed the values of the parameters that correspond to the absorption, capture, reduction and dissipation of energy. The initial fluorescence and the efficiency of the electron acceptors of photosystem I were impaired in the presence of tin. The disrupts of components of the electron transport chain was observed in the presence of trace elements. Such results suggest that the trace elements are impacting the vegetation and interfering with the functioning of the photochemical apparatus of the plants.

Keywords: Tolerance; Native species; Abiotic stress; Biochemical mechanisms.

1. Introdução

A Restinga é formada por um conjunto de depósitos arenosos costeiros e espécies que crescem sobre esse ambiente, recobrando as praias e os cordões arenosos litorâneos, em áreas com teores variáveis de umidade e de argila no solo. Com uma rica variedade de espécies vegetais que podem ser utilizadas de diferentes formas, a Restinga possui algumas espécies que podem ser utilizadas na farmacologia, culinária e floricultura.

Canavalia rosea (Sw.) DC. é uma espécie herbácea da família Fabaceae prostrada quando crescem em praia aberta, podendo escalar onde há suporte, e que possui folhas compostas e flores de coloração rosa. Ela pode possuir nódulos gram-negativos de *Sinorhizobium*, em que a associação simbiótica com a planta promove a fixação de nitrogênio. É uma planta com grande potencial para a recuperação de áreas degradadas, pois possui características de adaptação a ambientes de condições extremas e substâncias para uso na indústria farmacológica e agroquímica. As plantas dessa espécie são colonizadoras bem-sucedidas de linhas costeiras tropicais devido à dispersão de suas sementes pelas correntes oceânicas e à alta tolerância a pulverização de sal, substratos com baixo teor de nutrientes e alta temperatura (CHEN et al., 2000; MEIDNER, 1963; MENDOZA-GONZÁLEZ, 2014; PIPER, 1925).

O uso de *C. rosea* para recuperação de áreas degradadas se justifica pelo fato da planta possuir capacidade de sobreviver em solos com pouca exigência nutricional. Bratti et. al (2019) verificaram que a espécie de *C. rosea* exposta à fertilização ou terra vegetal não se desenvolveram tão bem quanto as plantas expostas à areia. De acordo com Mohajer et al. (2017), o nitrogênio contribui para os maiores custos na fertilização, mas quando a planta possui a capacidade de se associar com espécies fixadoras de nitrogênio, esse custo é dispensado.

Diante desses fatores, observou-se a importância de se conhecer o mecanismo de sobrevivência da *C. rosea* de áreas atingidas pelos rejeitos de minério. Assim, o objetivo desse estudo foi avaliar as respostas fotoquímicas de *Canavalia rosea* aos elementos-traço dos rejeitos de mineração.

2. Resultados

A quantificação de elementos-traço demonstrou a presença de Arsênio (As), Cádmiio (Cd), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Estanho (Sn), Vanádio (V), Zinco (Zn) e Alumínio (Al) nas folhas de *C. rosea* e no solo de São Mateus (A1) e Linhares (A5), nos períodos chuvoso e seco de 2019 (Tabela 3).

A curva OJIP (Figura 4) demonstra o desempenho fotoquímico da planta alterado pela presença de elementos-traço na folha. Notou-se diferenças entre os períodos seco e chuvoso em A5, sendo que a menor fluorescência máxima (Figura 4A) foi observada no período seco, enquanto houve diferença entre o período seco e chuvoso após a normalização da curva entre os pontos O e P (Figura 4B) e diferença cinética entre as curvas da fluorescência variável relativa (Figura 4C).

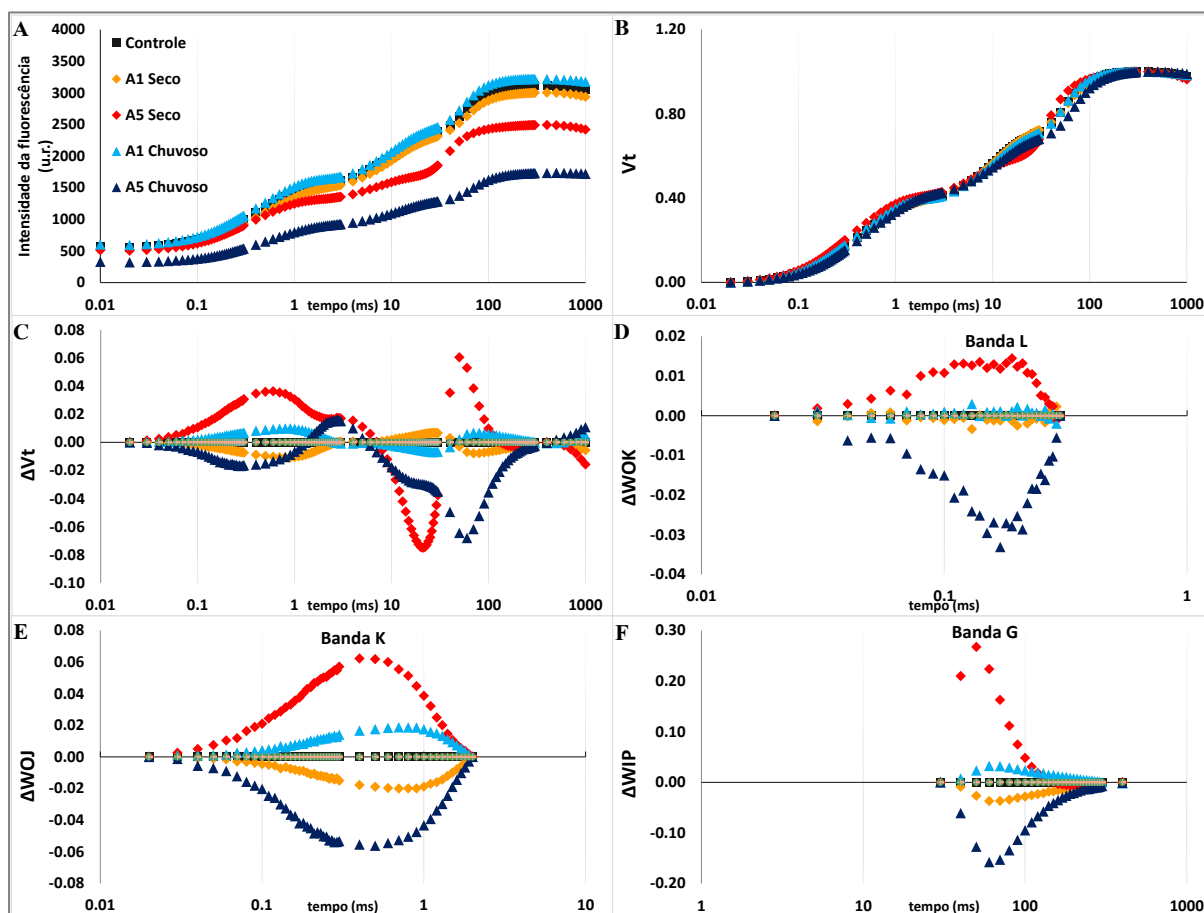


Figura 4: Parâmetros da Curva OJIP em *Canavalia rosea* na Restinga do Norte do Espírito Santo exposta a rejeito de mineração, avaliada em duas épocas do ano de 2019 – chuvosa e seca – e em duas áreas: São Mateus (A1) e Linhares (A5). A normalização das etapas O – K, O – J e I – P para visualização das bandas foi realizada da seguinte forma, respectivamente: $[W_{OK} = (F_t - F_0) / (F_K - F_0)]$; $[W_{OJ} = (F_t - F_0) / (F_J - F_0)]$; $[W_{IP} = (F_t - F_I) / (F_P - F_I)]$

Tabela 3: Quantificação de elementos-traço em folhas de *Canavalia rosea* e solos de duas áreas amostrais de Restinga (Linhares e São Mateus – Espírito Santo)

Análise	Área	Período	As $\mu\text{g g}^{-1}$	Cd $\mu\text{g g}^{-1}$	Cr $\mu\text{g g}^{-1}$	Co $\mu\text{g g}^{-1}$	Cu $\mu\text{g g}^{-1}$	Fe mg g^{-1}	Mn mg g^{-1}	Ni $\mu\text{g g}^{-1}$	Pb $\mu\text{g g}^{-1}$	Sn $\mu\text{g g}^{-1}$	V $\mu\text{g g}^{-1}$	Zn $\mu\text{g g}^{-1}$	Al mg g^{-1}
Folha	A1	Chuvoso	0,167	0,009	0,590	0,017	12,385	0,110	0,050	0,299	0,031	0,552	0,203	13,826	0,445
		Seco	0,253	0,011	2,216	0,334	7,988	0,151	0,032	1,684	0,241	0,423	0,688	18,164	0,000
	A5	Chuvoso	0,301	0,009	0,657	0,176	17,781	0,138	0,148	0,582	0,031	0,311	0,653	19,652	0,445
		Seco	0,176	0,016	1,013	0,232	7,291	0,276	0,188	2,687	0,252	0,247	0,389	11,559	0,000
Solo	A1	Chuvoso	2,450	-	5,023	0,227	1,766	2382,978	30,848	1,071	0,800	0,055	3,014	3,885	995,380
		Seco	4,215	2,850	4,234	0,481	0,572	4481,099	76,031	0,783	0,862	0,088	3,406	23,082	995,380
	A5	Chuvoso	1,953	-	8,987	0,909	1,442	4151,100	63,255	1,833	3,731	0,057	5,403	4,231	995,380
		Seco	8,587	5,447	16,061	1,577	3,230	6080,851	145,003	2,790	2,493	0,164	10,019	9,417	995,380

Os resultados em A1 apresentaram comportamentos diferentes nos quais não foram observadas diferenças significativas entre o período seco e o chuvoso, conforme mostrado na Figura 4. O aparecimento de banda L positiva (Figura 4D) foi observada no período chuvoso na A5. Nessa mesma área também houve o aparecimento de banda K e G positivas, Figuras 4E e 4F, respectivamente.

Diante dos resultados obtidos com a curva OJIP, observou-se o surgimento de bandas positivas que representam desconexões de complexos fotossintéticos, o que é mostrado detalhadamente no teste JIP (Figura 5).

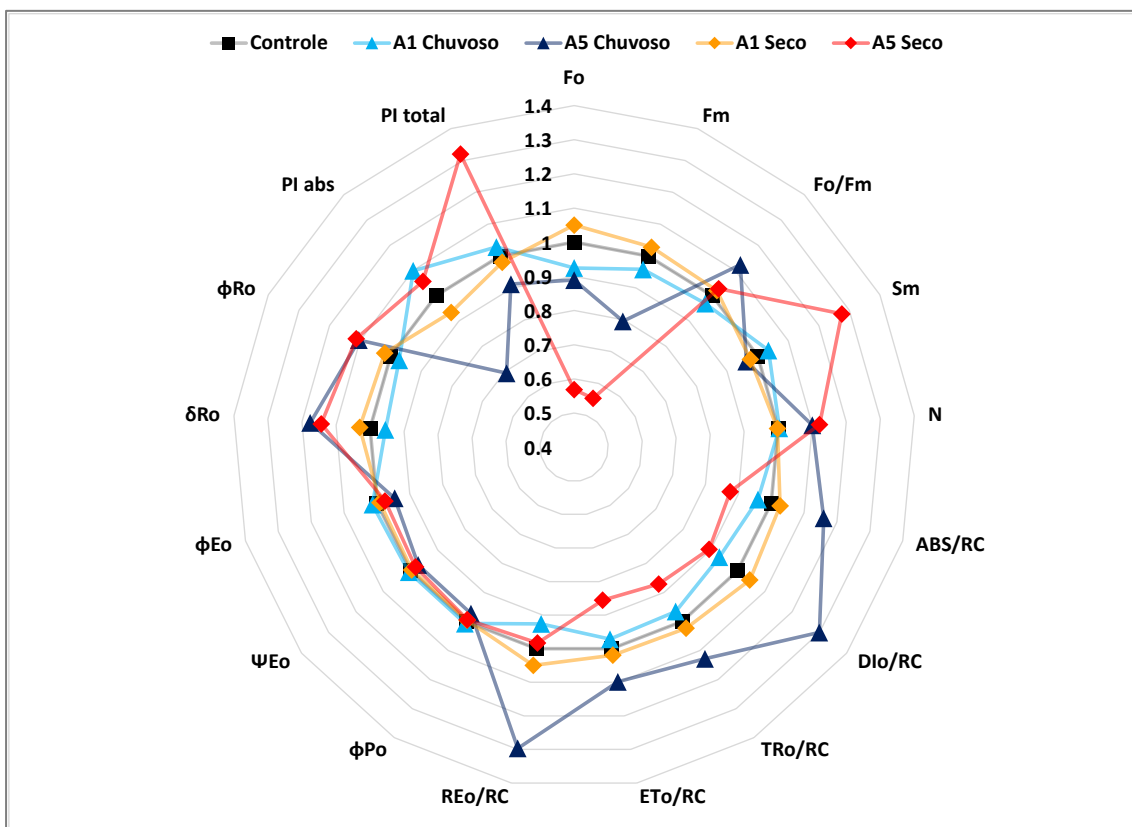


Figura 5: Parâmetros do Teste JIP em *Canavalia rosea* na Restinga do Norte do Espírito Santo exposta a rejeito de mineração, avaliada em duas épocas do ano 2019 – chuvosa e seca – e em duas áreas: São Mateus (A1) e Linhares (A5). As análises foram submetidas ao Teste de Tukey $p > 0,05$

No período chuvoso em A5, houve maior dissipação de energia (DI_o/RC) e fluxo de elétrons redutores dos aceptores finais de elétrons do FSI por centro de reação ativo (RE_o/RC). Também se observou menor valor do índice de desempenho fotoquímico do FSII (PI_{ABS}) em relação a outras áreas (Figura 5). Vale ressaltar que haviam maiores concentrações de Ar, Cu, V e Zn nas folhas das plantas em A5 nesse período (Tabela 3). Já no período seco, em A5,

observou-se menor dissipação de energia (DI_0/RC) e maior desempenho fotoquímico do FSI (PI_{total}) (Figura 5).

Para as plantas de *C. rosea* em A1, tanto no período seco, quanto no período chuvoso, não houve diferença da dissipação de energia (DI_0/RC) ou da redução dos aceptores finais de elétrons do FSI por centro de reação ativo (RE_0/RC) (Figura 5).

A Análise de Componentes Principais (PCA) da concentração de elementos-traço nas folhas e no solo mostrou o efeito na planta (Figura 6). Verificou-se que o aumento de Cd no solo provocou o aumento de Cd, Fe, Ni, Co, Mn e Pb na folha. Observou-se também que o aumento de Cd, Fe e Mn no solo proporcionou o aumento desses elementos na folha (Figura 6). O Cu na folha promoveu aumento na absorção (ABS/RC), dissipação (DI_0/RC) e captura de elétrons (TR_0/RC). Já Cd, Fe, Mn e Ni promoveu efeito contrário (Figura 6).

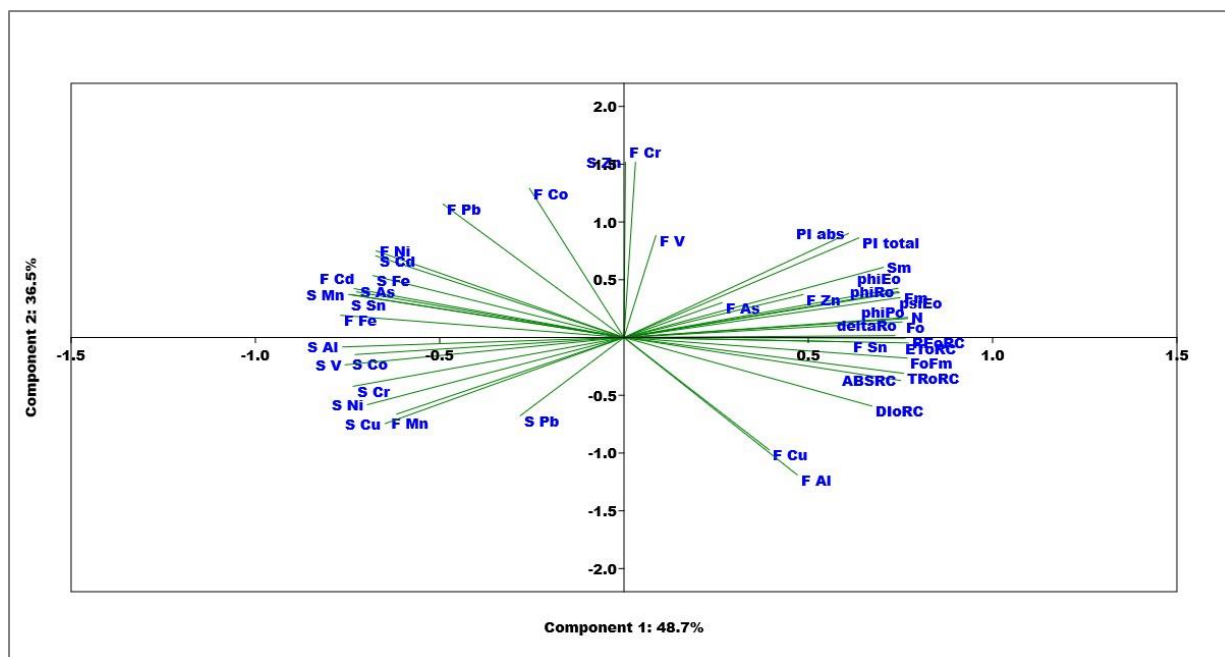


Figura 6: Análise de Componentes Principais entre parâmetros da fluorescência da clorofila a e elementos-traço no solo e em folhas de *Canavalia rosea* na Restinga do Norte do Espírito Santo exposta a rejeito de mineração, avaliada em duas épocas do ano de 2019 – chuvosa e seca – e em duas áreas: Linhares e São Mateus. Edição: Dra. Sabrina Garcia Broetto

A análise de cluster pela técnica de UPGMA realizada com as variáveis da fluorescência da clorofila a, considerando os períodos e locais avaliados, indicou similaridade entre o período seco da A1 (SM) com os períodos chuvoso e seco da A5 (Lin) (Figura 7).

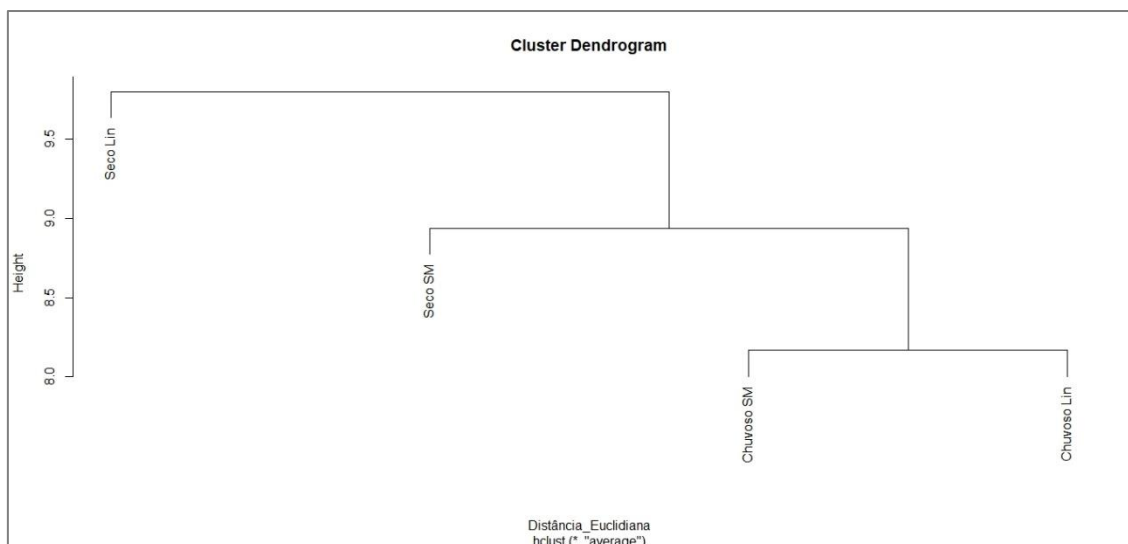


Figura 7: Dendrograma gerado a partir da Distância Euclidiana combinada ao método de agrupamento UPGMA em variáveis da fluorescência da clorofila *a* de plantas de *Canavalia rosea* em duas áreas: Linhares (Lin) e São Mateus (SM), no norte do Espírito Santo, considerando os períodos e locais. Edição: Dr. Pedro Corrêa Damasceno Junior

3. Discussão

A Restinga é constituída de solos arenosos e distróficos. E isso interfere na disponibilidade de nutrientes, bem como apresenta alta permeabilidade e consequente baixa capacidade de adsorção de íons e retenção de água. (GOMES et al., 2008).

Verificou-se a presença de elementos-traço nas plantas (Tabela 3) e a interação com os parâmetros da fluorescência da clorofila *a* (Figura 6). As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn são considerados poluentes ambientais (TILLER, 1989; GUILHERME, 1999), sendo o Cd, Cu, Zn e Pb os mais perigosos devido a suas toxicidades e potenciais de bioacumulação (CHANG et al., 1987).

De acordo com Silva (2006), Cd, Cu, Mn e Zn se encontram em frações com ligações químicas mais estáveis do solo. Foi observado que o aumento de Sn e Cr diminuíram a absorção de Mn pelas plantas de *C. rosea*, o aumento de Cr também diminuiu a concentração de Cu na folha (Figura 6). Isso foi observado também por Da Silva Costa (2020) em que é relatado que a presença de Cr na planta diminuiu a absorção de Cu e Mn. Li et al. (2019) verificaram o efeito negativo na capacidade fotossintética e no crescimento de plantas de *Brassica napus* na presença de Cr.

Cu, considerado elemento essencial, apresentou diminuição na absorção pela planta na presença de outros elementos-traço no solo (Figura 6). O Cu é altamente adsorvido nos coloides orgânicos e inorgânicos do solo e, por isso, é menos móvel, além de poder precipitar com ânions sulfeto, carbonato e hidróxido. A absorção de Cu pela planta pode ser diminuída na presença de outros elementos, como Cr (DA SILVA COSTA, 2020; KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2001; LOPES et al., 2006).

Ao longo do ano de 2019, o período de chuvas no estado do Espírito Santo foi atípico e isso provocou maiores acumulados de chuvas do que o usual (Figura 3). Carneiro et al. (2020) verificaram maior descarga de água no Rio Doce no ano de 2019, o que provocou maior afloramento dos sedimentos no fundo do rio e mar.

Verificou-se uma diferença na curva OJIP entre as épocas avaliadas nas duas áreas amostrais. No período chuvoso, em A5, houve o surgimento de bandas L, K e G positivas (Figura 4) e maiores concentrações de As, Cu, Zn e V na planta (Tabela 3). O surgimento de banda K positiva nas folhas das plantas em A5, no período chuvoso (Figura 4E), indica uma desconexão do complexo de evolução de oxigênio, enquanto a banda L positiva (Figura 4D) indica a desconexão dos agrupamentos das subunidades do FSII. Já a banda G positiva (Figura 4F), neste caso, indica danos no lado receptor do FSI.

O Cu apresentou maiores valores no período chuvoso em A5 (Tabela 3). Verificou-se que nesse período houve menor eficiência fotoquímica do FSII (PI_{abs}) (Figura 5). Carreiras et al. (2020) observaram que plantas nativas halófilas mediterrâneas de *Spartina patens*, em área contaminada com Cu, apresentam respostas fotoquímicas negativas mostradas pelo teste JIP.

C. rosea na A5, no período chuvoso, apresentou maiores valores de dissipação de energia (DI_0/RC) e menor valor do desempenho fotoquímico (PI_{total}) (Figura 5). Freitas (2018) também encontra altos índices de dissipação de energia (DI_0/RC) em cultivo de *Mangifera indica* submetida à rejeitos de mineração, e isso leva a um menor desempenho fotoquímico da planta (PI_{total}).

Quanto à interação dos elementos-traço na folha com os parâmetros obtidos pela fluorescência transiente da clorofila *a*, observou-se que o Cu na folha não

alterou os parâmetros do fluxo de energia (ABS/RC, TR₀/RC, ET₀/RC, DI₀/RC e RE₀/RC), assim como os índices de performance fotossintético (PI_{abs} e PI_{total}). Contudo, houve correlação negativa entre o Cu na folha e o rendimento quântico do transporte de elétrons de Q_A⁻ para os aceptores de elétrons do intersistema (ϕE_0) (Figura 6). Resultado semelhante foi encontrado por Cuchiara (2013), em que os parâmetros do fluxo de energia (ABS/RC, TR₀/RC, ET₀/RC e DI₀/RC) não foram afetados por doses de Cu em plantas de batata-doce (*Ipomoea batatas*).

Verificou-se que o aumento da concentração de Sn na folha causou a diminuição da eficiência com a qual um elétron pode se mover dos aceptores de elétrons do intersistema para os aceitadores finais do FSI (δR_0) e aumentou a F₀ (fluorescência inicial) (Figura 6). O estudo de Sharma e Kumar (2020) mostrou que o aumento da concentração de Sn diminuiu o índice de clorofila de plantas de *Brassica juncea* L.

O dendrograma gerado a partir da Distância Euclidiana combinada ao método de agrupamento UPGMA em variáveis da fluorescência da clorofila *a* mostrou que os períodos chuvosos, em A5, e seco, em A1, foram mais semelhantes, enquanto o período chuvoso em A1 formou um grupo separado (Figura 7). Isso mostra a eficiência do método de agrupamento por UPGMA na análise de plantas em resposta a presença de elementos-traço, podendo definir os grupos de plantas que respondem semelhantemente. Rousseau et al. (2015), através do método de UPGMA, conseguiram distinguir grupos de plantas impactados por estresse biótico, em que as plantas de *Arabidopsis thaliana* infectadas por *P. ramosa* foram distinguidas das plantas não inoculadas com o microrganismo. Damasceno Jr et al. (2015) distinguiram a diversidade genética de diferentes plantas de uma coleção de germoplasma, na qual a amplitude em cada espécie foi definida através da análise e a diferença entre as espécies também é mostrada.

Observou-se interação entre os elementos-traço na folha e os parâmetros da fluorescência da clorofila *a*, o que indica que a planta respondeu ao estresse provocado pelos elementos-traço no ambiente.

4. Conclusões

As análises realizadas pela fluorescência da clorofila *a* mostraram que as plantas de *Canavalia rosea* expostas a rejeitos de mineração foram afetadas negativamente pelos elementos-traço As, Cu, Cr, Zn e V.

A presença de bandas K, L e G positivas na época chuvosa, em A5, indicaram que as plantas de *Canavalia rosea* responderam de forma negativa aos elementos-traço.

As análises de UPGMA mostraram a dissimilaridade entre o conjunto de dados coletados nas duas regiões, onde os dados dos períodos chuvoso e seco, em A5, e período seco, em A1, foram semelhantes, formando um grupo de similaridade, enquanto o período chuvoso, em A1, formou um grupo separado.

5. Referências

BRATTI, G. et al. Germinação de sementes de *Canavalia rosea* (Sw.) DC. (Fabaceae) em diferentes substratos. **Nature and Conservation**, v. 13, n. 1, p. 1-7, 2020.

CARNEIRO, G. A.; GONÇALVES, J. A. C.; e CARNEIRO, G. C. A. A Lama de Rejeitos de Mineração e os seus Efeitos sobre a Recarga dos Aquíferos Aluvionares do Rio Gualaxo do Norte após o Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, **13(03)**, 1213-1230. 2020.

CARREIRAS, J. et al. "The effect of heavy metal contamination pre-conditioning in the heat stress tolerance of native and invasive Mediterranean halophytes." **Ecological Indicators** **111 (2020)**: 106045. 2020.

CHANG, A.C.; PAGE, A.L.; WARNEKE, J.E.; GRGUREVIC, E. Sequential extraction on soil heavy metals following a sludge application. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.13, p. 33-38, 1987.

CHEN, W-M. et al. Characterization of halotolerant rhizobia isolated from root nodules of *Canavalia rosea* from seaside Areas. **FEMS microbiology ecology**, v. 34, n. 1, p. 9-16, 2000.

CUCHIARA, C. C. "Efeito do Cu e sua interação com o Zn no cultivo de plantas de batata-doce: alterações morfofisiológicas e bioquímicas." 2013.

DA SILVA COSTA, J. R. Efeitos da toxicidade do Cr em plantas. **Revista Intertox De Toxicologia, Risco Ambiental E Sociedade**, **13(1)**, 45-46. <https://doi.org/10.22280/revintervol13ed1.463>. 2020.

DAMASCENO JR, P. C. et al. Diversidade genética em duas espécies de Caricáceas e suas relações genéticas com *Carica papaya* L. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 4, p. 733-739, 2015.

FREITAS, J.F.N. De. Crescimento inicial e eficiência fotoquímica de mangueiras cultivadas em solo contendo lama do Rio Doce. **Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo**. 2018.

GOMES, J. B. V. et al. Solos de três áreas de Restinga. I. Morfologia, caracterização e classificação. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 33, n. 11, p. 1907-1919, 1998.

GUILHERME, L.R.G. Poluição do solo e qualidade ambiental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., 1999, **Brasília. Anais.... Brasília**, SBCS, 1999. CD ROM.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soil and plants**. 3.ed. BocaRaton: CRC Press, 413p. 2001.

LI, L. et al. Synergistic effects of chromium and copper on photosynthetic inhibition, subcellular distribution, and related gene expression in *Brassica napus* cultivars. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 12, p. 11827-11845, 2019.

LOPES, A.S.; ABREU, C.A.; SANTOS, G.C.G. Micronutrientes. In: Neves, J.C.L.; Dias, L.E.; Barros, N.F.; Cantarutti, R.B.; Novais, R.F.; Alvarez, V.H. (Coord.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. No prelo. 2006.

MEIDNER, H. Sea sand, salt and sap. **South African journal of science**, v. 59, n. 11, p. 532-535, 1963.

MENDOZA-GONZÁLEZ, G.; MARTÍNEZ, M. L.; LITHGOW, D. Biological flora of coastal dunes and wetlands: *Canavalia rosea* (Sw.) DC. **Journal of Coastal Research**, v. 30, n. 4, p. 697-713, 2014.

MOHAJER, S. et al. Baybean (*Canavalia rosea* (Sw.) DC.); organogenesis, morphological and anatomical studies. **Gayana Bot**, v. 74, p. 1, 2017.

PIPER, C. V. The American species of *Canavalia* and *Wenderothia*. **Systematic studies of American plants**, 1925.

SHARMA, M e KUMAR, P. Biochemical alteration of mustard grown under tin contaminated soil. **Plant Archives**, v. 20, n. 2, p. 3487-3492, 2020.

SILVA, M. L. de S. **Avaliação do comportamento de elementos-traço essenciais e não essenciais em solo contaminado sob cultivo de plantas.**

Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2006.

ROUSSEAU, C. et al. Phenoplant: a web resource for the exploration of large chlorophyll fluorescence image datasets. **Plant Methods**, v. 11, n. 1, p. 1-12, 2015.

TILLER, K.G. Heavy metals in soil and their environmental significance. **Advances in Soil Science**, New York, v.9, p.113-142, 1989.

Capítulo 2

Inibição da fotossíntese em plantas de *Eugenia astringens* Cambess induzida por elementos-traço contidos em rejeito de mineração, utilizando a fluorescência transiente da clorofila a

Inhibition of photosynthesis in plants of *Eugenia astringens* Cambess induced by trace elements contained in mining waste, using chlorophyll a fluorescence transient

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto de elementos-traço em plantas de *Eugenia astringens* Cambess, na Restinga, no Norte Capixaba, utilizando medidas de fluorescência da clorofila a. Foram realizadas análises em plantas de *E. astringens* de quatro áreas, na Restinga do Norte Capixaba, nos períodos chuvoso e seco do ano de 2019. Foram utilizados um fluorômetro portátil (HandyPEA), para as análises de fluorescência transiente da clorofila a, e um medidor portátil de clorofila (modelo SPAD 502), para determinar a concentração de clorofila. Foram coletadas amostras de solo e de folhas das quatro áreas e enviadas ao Laboratório de Espectrometria Atômica do Departamento de Química da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) para determinação das concentrações totais de elementos-traço. Foram quantificados os teores de Cádmio, Cobalto, Ferro e Chumbo. A análise referente ao período chuvoso apresentou maiores concentrações de Cádmio, Chumbo e Ferro nas folhas e menores valores da fluorescência máxima. Os resultados obtidos sugerem que os elementos-traço Cádmio, Cobalto, Ferro e Chumbo têm efeito negativo na eficiência fotoquímica de plantas de *Eugenia astringens* Cambess. Foi possível verificar que as concentrações de elementos-traço nas folhas aumentaram no período chuvoso e que houve inibição da fotossíntese induzida pelos elementos-traço contidos nos rejeitos de mineração.

Palavras-chave: Estresse abiótico; Bioma; Mineração; Metabólitos.

Abstract

This work aimed to evaluate the impact of trace elements in plants of *Eugenia astringens* Cambess, in Restinga, in Northern Capixaba, using measurements of chlorophyll *a* fluorescence. Analyzes were carried out on *E. astringens* plants from four areas, in Restinga do Norte Capixaba, in the rainy and dry periods of the year 2019. A portable fluorometer (HandyPEA) was used for the analysis of chlorophyll *a* transient fluorescence, and a portable chlorophyll meter (model SPAD 502), to determine the chlorophyll concentration. Samples of soil and leaves were collected from the four areas and sent to the Atomic Spectrometry Laboratory of the Department of Chemistry at the Federal University of Espírito Santo (UFES) to determine the total concentrations of trace elements. The levels of Cadmium, Cobalt, Iron and Lead were quantified. The analysis related to the rainy season showed higher concentrations of Cadmium, Lead and Iron in the leaves and lower values of maximum fluorescence. The results obtained suggest that the trace elements Cadmium, Cobalt, Iron and Lead have a negative effect on the photochemical efficiency of *Eugenia astringens* Cambess plants. It was possible to verify that the concentrations of trace elements in the leaves increased in the rainy season and that there was inhibition of photosynthesis induced by the trace elements contained in the mining waste.

Keywords: Abiotic stress; Biome; Mining; Metabolites.

1. Introdução

Ao estudar a fisiologia de uma planta, observa-se características que irrompem conceitos já conhecidos e que denotam a capacidade de um indivíduo se alojar em ambientes variados e, conseqüentemente, de usar os artefatos de sobrevivência que lhe convém. Ao se utilizar de estratégias que lhe garantem uma sustentação no meio, atesta-se uma possível moldagem da planta em resposta ao espaço inserido. Desta forma, os mecanismos de sobrevivência da espécie envolvem todo o organismo, podendo alocar substâncias essenciais para o uso antrópico. Conhecer determinadas respostas garante, também, a alocação dessas plantas em ambientes que sofreram ou sofrem pela ação desastrosa do ser humano. Ações essas que envolvem desde a contaminação de áreas ambientais por elementos químicos provenientes de indústrias até a deposição exabundante de lixos, efluentes, agroquímicos, etc.

Eugenia astringens Cambess é uma planta da família Myrtaceae, popularmente conhecida como jabuticaba de praia. Endêmica do Brasil, podendo ser encontrada ao longo da costa, é uma espécie arbustiva presente na vegetação da planície costeira do Espírito Santo, no Brasil, conhecida como Restinga. Esta planta apresenta folhas elípticas, às vezes orbiculares, inflorescências ramiflorosas em nós desfolhados, flores brancas com cálice muito pequeno e persistentes lóbulos e frutas que são escuras quando maduras (SOBRAL et al. 2012; OLIVEIRA 2013; GIARETTA e PEIXOTO 2015).

Ela apresenta, em seus frutos, substâncias importantes que podem ser comercializadas, embora esta prática não seja observada, e possui propriedades antimicrobianas nas folhas (BRAGA et al. 2016, 2017; CARMINATE et al. 2017; FREIRE e MUSSI-DIAS 2019).

A espécie serve como bioindicadora ambiental, pois interage com várias espécies de insetos (MAIA e SILVA 2016), bem como responde aos impactos no ecossistema, como estresses ambientais ou pressões antrópicas, por meio de diminuições na diversidade e perda do equilíbrio populacional (OLIVEIRA, 2009). Além de ser um recurso para polinizadores, *E. astringens* também contribui para a manutenção da oferta de frutas durante os períodos de escassez (STAGGEMEIER, 2014).

As medições de fluorescência da clorofila *a* podem detectar estresse abiótico em plantas, como os impactos da seca (YUSUF et al. 2010), salinidade (KALAJI et al. 2018), temperatura (LI et al. 2020) e elementos-traço (CHEN et al. 2015).

A partir da associação com o teste JIP (STRASSER e STRASSER 1995), é possível destacar parâmetros fotoquímicos, como o transporte de energia captada pelos fotossistemas e índices de desempenho, que refletem os impactos desses fatores. A análise com um fluorômetro portátil permite a avaliação não destrutiva da viabilidade dos processos fotoquímicos nas folhas de várias espécies (STRASSER et al. 2000; KALAJI et al. 2014; SILVA et al. 2019).

Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi analisar, usando a fluorescência da clorofila *a*, os efeitos inibitórios da fotossíntese nas plantas de *Eugenia astringens* Cambess induzidos por elementos-traço contidos em rejeito de mineração, em quatro áreas de Restinga do Norte Capixaba.

2. Resultados

Os resultados das concentrações de elementos-traço nas folhas de *E. astringens* mostraram maiores concentrações de Cd, Fe, Pb e Co no período chuvoso do ano de 2019. O Cádmiio (Cd) apresentou maiores concentrações no período chuvoso nas áreas A3 e A4 (Figura 8A), que são localizadas próximas do Rio Doce.

A técnica de fluorescência transiente da clorofila *a* é um método rápido e não destrutivo para detectar e quantificar danos ao aparelho fotossintético de uma planta (MATHUR et al. 2011). Por meio desta técnica, é possível observar os danos causados por estresse luminoso (KALAJI et al. 2012), estresse nutricional (KALAJI et al. 2014), estresse de elementos-traço e estresse salino (DEMETRIOU et al. 2007; LI e ZHANG 2015).

A curva OJIP típica (Figura 9) derivada de análises de fluorescência mostrou que as plantas estavam fotossinteticamente ativas. Verificou-se curvas acima do controle, no período chuvoso (Figura 9A), e abaixo do controle, no período seco (Figura 9B). A área A4, no período chuvoso, apresentou diferença positiva na etapa O-J da curva OJIP normalizada (Figura 9C), enquanto as áreas A2 e A3,

no período seco, apresentaram diferenças positivas nas etapas J-I e I-P na curva normalizada (Figura 9D).

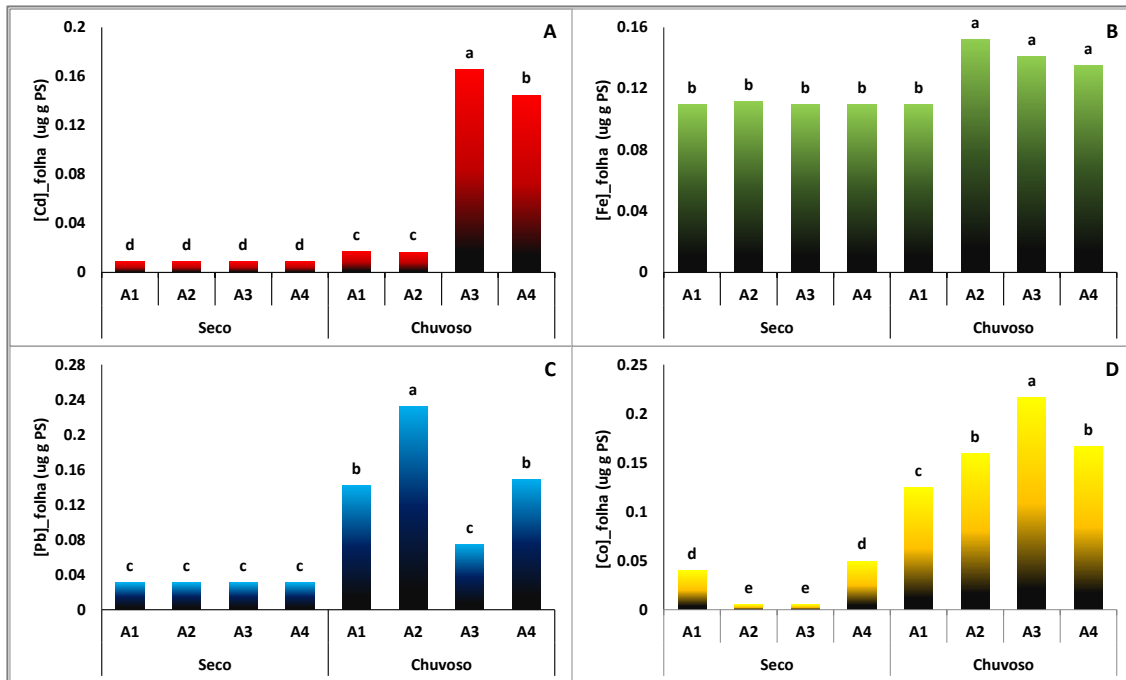


Figura 8: Concentração de Cd (A), Fe (B), Pb (C) e Co (D) no tecido foliar de *Eugenia astringens* de quatro áreas de Restinga do Norte do Espírito Santo exposta a rejeito de mineração, avaliada nos períodos chuvoso e seco do ano de 2019

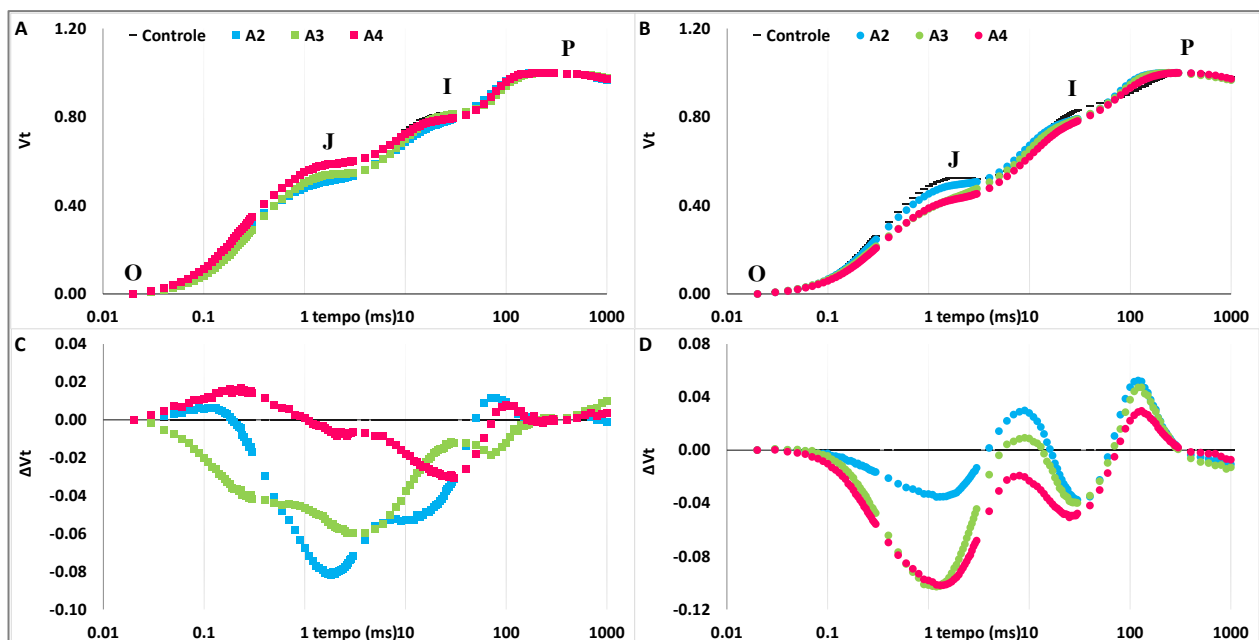


Figura 9: Parâmetros da curva OJIP de plantas de *Eugenia astringens* nos períodos chuvoso (quadrado) e seco (círculo) do ano de 2019, localizadas em quatro áreas amostrais (A), na Restinga Norte Capixaba

Ao se calcular a fluorescência variável de cada etapa da curva OJIP, foi possível observar o aparecimento de bandas positivas nas diferentes áreas analisadas (Figura 10). No período chuvoso, nas áreas A2 e A4, observou-se

banda K positiva (Figura 10A), o que indica a inativação dos complexos de evolução de oxigênio. Foi possível observar o aparecimento de banda L positiva também nas áreas A2 e A4 (Figura 10C). Uma banda L positiva indica desconexão ou desacoplamento entre as unidades FSII. As plantas na A3 exibiram, nas análises, a banda L positiva apenas na estação seca (Figura 10D). A banda L, na A3, era maior do que nas áreas A2 e A4. Observou-se também o surgimento de banda G positiva nos dois períodos de avaliação (Figura 10E e 10F), indicando redução do *pool* de plastoquinona. Novamente, a A3 apresentou banda G positiva somente na estação seca.

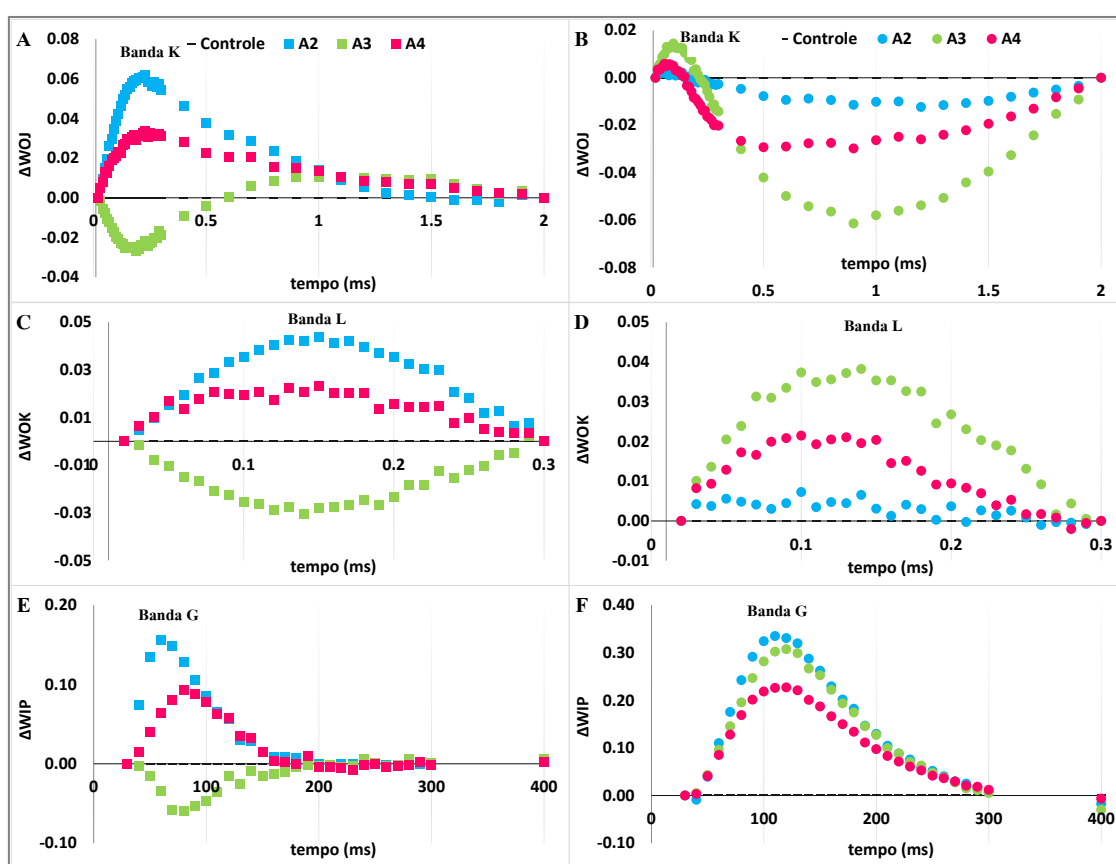


Figura 10: Parâmetros da curva OJIP de plantas de *Eugenia astringens* nos períodos chuvoso (quadrado) e seco (círculo) do ano de 2019, localizadas em quatro áreas amostrais (A), na Restinga Norte Capixaba. A normalização das etapas O – K, O – J e I - P para visualização das bandas foi realizada da seguinte forma, respectivamente: $[W_{OK} = (F_t - F_0) / (F_K - F_0)]$; $[W_{OJ} = (F_t - F_0) / (F_J - F_0)]$; $[W_{IP} = (F_t - F_i) / (F_P - F_i)]$.

O teste JIP é comumente utilizado para validar os efeitos dos estresses ambientais no processo fotossintético. Alguns parâmetros são considerados importantes validadores da eficiência fotoquímica das plantas.

Neste estudo, observou-se (Tabela 4) correlações negativas para os parâmetros do teste JIP, a saber: *Area* (área acima da curva de fluorescência da

clorofila entre F_0 e F_M), F_4 (fluorescência no tempo 2 ms), F_5 (fluorescência no tempo 30 ms), F_M (fluorescência máxima) e F_V (fluorescência variável), para os elementos analisados.

Os valores de *Area* (Figura 11) foram maiores no período seco, indicando menor fluorescência da planta causada pelo estresse dos elementos-traço nas folhas. Nas folhas, a diminuição da F_M na presença dos elementos-traço também indicou estresse da planta causado pela presença de Cd, Co, Fe e Pb nas folhas. Houve maior dissipação de energia (DI_0/RC) no período chuvoso, em A2 e A3 (Figura 11), bem como correlação positiva entre a DI_0/RC com Cd e Pb (Tabela 4). Além disso, houve correlação positiva entre a captura de energia (TR_0/RC) e Co e Pb, e correlação positiva entre δRo e Cd e Co.

No período chuvoso, houve maior TR_0/RC em A2 e A4 (Figura 11), destacando a resposta dessas plantas ao estresse induzido pelos elementos-traço. As análises de clorofila usando o índice SPAD não tiveram diferenças significativas.

Tabela 4: Correlação dos parâmetros do Teste JIP de plantas de *Eugenia astringens* com o teor de metais nas folhas de plantas localizadas em quatro áreas amostrais

	Cd	Co	Fe	Pb
Area	-0.45*	-0.58**	ns	-0.62**
F ₀	-0.55**	ns	-0.58**	ns
F ₄	ns	ns	-0.56**	ns
F ₅	-0.60**	-.59**	-0.66***	-0.53**
F _M	-0.55**	-0.59**	-0.59**	-0.58**
F _V	-0.49*	-0.59**	-0.53*	-0.64**
F ₀ /F _M	ns	ns	ns	0.66***
F _V /F _M	ns	ns	ns	-0.66***
ABS/RC	ns	0.50*	ns	0.64***
TR ₀ /RC	ns	0.51*	ns	0.58**
DI ₀ /RC	0.45*	ns	ns	0.67***
RE ₀ /RC	ns	ns	0.62**	ns
δRo	0.62**	0.44*	ns	ns

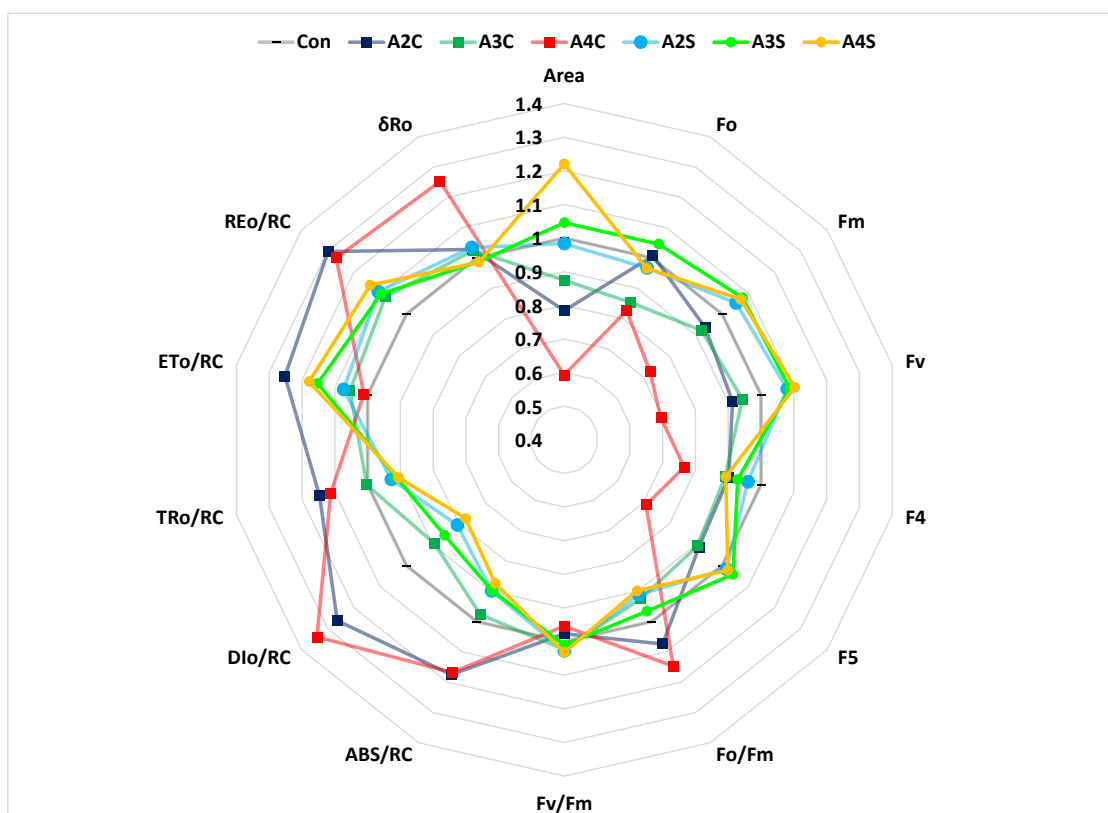


Figura 11: Parâmetros do teste JIP de plantas de *Eugenia astringens* nos períodos chuvoso (C) e seco (S) do ano de 2019, localizadas em quatro áreas amostrais(A), na Restinga Norte Capixaba.

3. Discussão

No ano de 2019, foi observado maior precipitação pluviométrica do que a série histórica do estado do Espírito Santo (Figura 3), e isso implica em um maior afloramento dos rejeitos de mineração no Rio Doce e no mar. Carneiro et al. (2020) mediram, em 2019, a vazão de um rio na bacia do Rio Doce que foi considerada maior em 2019 do que nos anos anteriores.

Foi observado a presença de banda L positiva nas análises de fluorescência com as folhas de *E. astringens* nas A2 e A4, no período chuvoso, e A2, A3 e A4, no período seco, sendo estas áreas próximas aos rejeitos de mineração, o que indica que a planta ainda está sob estresse influenciado pela presença de elementos-traço (Figuras 10C e 10D). De acordo com Li et al. (2010), a banda L indica alterações na cadeia de transporte de elétrons provocada por estresse ambiental e tem sido aplicada em estudos com toxicidade nutricional em plantas. Li et al. (2019) verificaram a presença de banda L positiva em plantas expostas ao excesso de Cu.

Da mesma forma, no presente trabalho, as plantas apresentaram, em resposta ao estresse sofrido pela presença de elementos-traço na folha, a banda K positiva em A2 e A4, no período chuvoso (Figura 10A). Estes resultados se assemelham aos obtidos por Li et al. (2019), que verificaram a presença de banda K positiva em plantas *Citrus grandis* e *Citrus sinensis* submetidas ao excesso de Cu. Do mesmo modo, Paunov et al. (2018) encontraram a banda K e a banda L positivas em plantas de trigo submetidas a doses tóxicas de Cd, com o metal contribuindo com as maiores proporções das bandas K e L positivas. De acordo com Nazar et al. (2012), nutrientes vegetais e Cd competem pelos mesmos transportadores, o que altera a captação e translocação de nutrientes essenciais, principalmente micronutrientes nas plantas, resultando em deficiência nutricional. Uma vez na planta, o Cd influencia negativamente a integridade estrutural do DNA devido a sua ligação direta com as bases do DNA (guanina, adenosina e timina) (CAI e CHERIAN 2003; NAZAR et al. 2012).

O Pb é considerado um dos poluentes mais comuns em ecossistemas aquáticos e terrestres. Além do intemperismo, as principais fontes de poluição por Pb são os gases de escapamento de automóveis, indústria, mineração e

fundição de minérios de Pb. Dentre os principais mecanismos de toxicidade do elemento em plantas, pode-se incluir a inibição da fotossíntese, estresse oxidativo e genotoxicidade (EICK et al. 1999; SHAHID et al. 2014; KÜPPER 2017).

Foi possível verificar, nas plantas de *E. astringens*, correlação positiva da dissipação de energia com o Pb, o que pode indicar danos no sistema fotoquímico da planta (Tabela 4). A absorção de elétrons por centro de reação ativo foi menor nas A3 e A4, no período seco (Figura 11). De modo geral, Fv/Fm teve correlação negativa com o Pb (Tabela 4). De acordo com Tokarz et al. (2020), a presença de Pb limita a eficiência do aparato fotossintético, causando impacto direto no número e ultraestrutura dos cloroplastos, síntese de pigmentos fotossintéticos, eficácia do ciclo de Calvin-Benson e síntese e distribuição de carboidratos.

O Pb interrompe indiretamente o metabolismo dos minerais e da água nas plantas, o que leva à criação de um desequilíbrio energético que gera espécies reativas de oxigênio. Tokarz et al. (2020) encontram, em plantas *Plumbago zeylanica* tratadas com 0,1 g L⁻¹ de Pb, diminuições significativas no conteúdo de pigmento, no tamanho do complexo coletor de luz (LHCII), na quantidade de centros de reação FSII ativos e na atividade do complexo de evolução de oxigênio, bem como na remodelação significativa da ultraestrutura do cloroplasto, indicando limitação do lado doador do centro de reação do FSII.

O Fe é um nutriente essencial para as plantas, pois está envolvido na síntese da clorofila e participa da estrutura do cloroplasto. Em solos inundados, a concentração de Fe solúvel pode aumentar dramaticamente, levando a uma maior biodisponibilidade para as plantas (SCHMIDT 1993; ROUT e SAHOO 2015). Não foi observado toxicidade por Fe nas plantas de *E. astringens* expostas aos rejeitos de mineração. As plantas apresentaram, para fluorescência inicial (F₀), correlação negativa com o Fe, assim como maior eficiência da planta na redução final de elétrons (RE₀/RC) (Tabela 4).

A Área acima da curva OJIP representa a área complementar total entre a curva de indução de fluorescência e a fluorescência máxima. Foi observado correlação negativa entre Área e Cd, Co e Pb. Isso indica o aumento da

fluorescência e diminuição da eficiência da cadeia de transportes de elétrons (Tabela 4). F_0 representa a fluorescência mínima quando todos os centros de reação estão ativos. O Cd e o Fe tiveram correlação negativa com F_0 nas plantas de *E. astringens* expostas aos rejeitos de mineração, o que indica menor fluorescência inicial (Tabela 4). F_m representa a fluorescência máxima quando todos os centros de reação estão inativos. F_v representa a fluorescência variável máxima. As plantas de *E. astringens* apresentaram correlação negativa entre F_m e F_v e Cd, Co, Fe e Pb (Tabela 4).

Fluxos de energia específicos (ABS/RC , TR_0/RC , DI_0/RC e RE_0/RC) mostram absorção, captura, dissipação e transporte de energia por centro de reação. No período chuvoso, nas áreas A2 e A4, observou-se maiores valores dos fluxos de energia específicos e correlação positiva com o Pb. Verificou-se correlação positiva entre Cd e dissipação de energia (DI_0/RC), o que indica a resposta da planta ao estresse provocado por esses elementos-traço (Tabela 4; Figura 11).

Tokarz et al. (2020) mostraram um aumento nos valores de DI_0/RC e δR_0 ao aplicar 0,1 g / L de Pb em plantas de *Plumbago zeylanica*. De acordo com Franić et al. (2018), o Cd em altas concentrações no solo causou aumento da dissipação de energia (DI_0/RC) e diminuição da eficiência fotoquímica ($Plabs$) em plantas de milho.

F_M , F_v , F_5 representam a fluorescência máxima, fluorescência máxima variável e a fluorescência máxima em 30 ms, respectivamente. F_v/F_M indica o rendimento quântico máximo da etapa fotoquímica (STRASSER et al. 2010; CHEN et al. 2016). Foi possível observar correlação negativa entre F_M , F_v , F_5 e todos os elementos-traço avaliados (Cd, Co, Fe e Pb) (Tabela 4). F_v/F_M teve correlação negativa com Pb. Isso indica que esse elemento provocou efeito negativo nas plantas de *E. astringens*.

4. Conclusão

Os elementos-traço Cd, Co, Fe e Pb têm efeito negativo na eficiência fotoquímica de plantas de *Eugenia astringens*, localizadas em áreas de Restinga.

A presença de bandas K, L e G positiva indicaram que etapas da fotossíntese inicial foram inibidas pela presença dos elementos-traço nas folhas.

Os diferentes parâmetros da fluorescência transiente da clorofila *a* são afetados por elementos-traço distintos. Foi possível verificar que o aumento de elementos-traço nas folhas no período chuvoso diminuiu a atividade fotoquímica das plantas, inibindo a transferência de elétrons demonstrada pelos parâmetros do teste JIP F_v/F_M , $Area$, ABS/RC , TR_0/RC , DI_0/RC e RE_0/RC .

5. Referências

- Braga EC de O, Martins V de C, Gama PE, Santiago MCP de A, Pacheco S, Nascimento, Luzimar da S. de M. do Borguini RG, Souza M da C, Godoy RL de O (2017) Avaliação dos compostos voláteis dos frutos de *Eugenia astringens* Cambess. In: 9º Simpósio Brasileiro de Óleos Essenciais (SBOE).
- Braga ECO, Borguini RG, Martins VC, Pacheco S, Porte A, Godoy RLO (2016) CAROTENOIDES DOS FRUTOS DE *Eugenia astringens* Cambess. Congr Bras Ciência e Tecnol Aliment 1–6.
- Cai L, Cherian MG (2003) Zinc-metallothionein protects from DNA damage induced by radiation better than glutathione and copper- or cadmium-metallothioneins. *Toxicol Lett* 136:193–198. doi: 10.1016/S0378-4274(02)00359-4
- Carminate B, Carminate C, Fontana AA, Farias MHA, Da Silva MB (2017) Estudo Fitoquímico E Antimicrobiano Das Folhas De *Eugenia Astringens* Cambess. (Myrtaceae). *Rev Univap* 22:479. doi: 10.18066/revistaunivap.v22i40.1067
- CARNEIRO, G. A.; GONÇALVES, J. A. C.; e CARNEIRO, G. C. A. A Lama de Rejeitos de Mineração e os seus Efeitos sobre a Recarga dos Aquíferos Aluvionares do Rio Gualaxo do Norte após o Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(03), 1213-1230. 2020.
- Chen F, Wang S, Mou S, Azimuddin I, Zhang D, Pan X, Al-Misned FA, Mortuza MG (2015) Physiological responses and accumulation of heavy metals and arsenic of *Medicago sativa* L. growing on acidic copper mine tailings in arid lands. *J Geochemical Explor* 157:27–35. doi: 10.1016/j.gexplo.2015.05.011
- Chen S, Yang J, Zhang M, Strasser RJ, Qiang S (2016) Classification and characteristics of heat tolerance in *Ageratina adenophora* populations using fast chlorophyll a fluorescence rise O-J-I-P. *Environ Exp Bot* 122:126–140. doi: 10.1016/j.envexpbot.2015.09.011

- Demetriou G, Neonaki C, Navakoudis E, Kotzabasis K (2007) Salt stress impact on the molecular structure and function of the photosynthetic apparatus-The protective role of polyamines. *Biochim Biophys Acta - Bioenerg* 1767:272–280. doi: 10.1016/j.bbabi.2007.02.020
- Eick MJ, Peak JD, Brady P V, Pesek JD (1999) KINETICS OF LEAD ADSORPTION/DESORPTION ON GOETHITE: RESIDENCE TIME EFFECT.
- Franić M, Galić V, Mazur M, Šimić D (2018) Effects of excess cadmium in soil on JIP-test parameters, hydrogen peroxide content and antioxidant activity in two maize inbreds and their hybrid. *Photosynthetica* 56:660–669. doi: 10.1007/s11099-017-0710-7
- Freire M das GM, Mussi-Dias V (2019) Ornamental use of plants from the Restinga. *Ornam Hortic* 25:55–64. doi: 10.14295/oh.v25i1.1452
- Giaretta A, Peixoto AL (2015) Myrtaceae na Restinga no norte do espírito Santo, Brasil. *Bol. Mus. Biol. Mello leitão (N. sér.)* 37:53-134. <https://www.researchgate.net/publication/271386699>. Acesso em 04 de out de 2020.
- Kalaji HM, Goltsev V, Bosa K, Allakhverdiev SI, Strasser RJ, Govindjee (2012) Experimental in vivo measurements of light emission in plants: A perspective dedicated to David Walker. *Photosynth Res* 114:69–96. doi: 10.1007/s11120-012-9780-3
- Kalaji HM, Schansker G, Ladle RJ, Goltsev V, Bosa K, Allakhverdiev SI, Brestic M, Bussotti F, Calatayud A, Dąbrowski P, Elsheery NI, Feni L, Guidi L, Hogewoning SW, Jajoo A, Misra AN, Nebauer SG, Pancaldi S, Penella C, Poli D, Pollastrini M, Romanowska-Duda ZB, Rutkowska B, Serôdio J, Suresh K, Szulc W, Tambussi E, Yanniccari M, Zivcak M (2014) Frequently asked questions about in vivo chlorophyll fluorescence: Practical issues. *Photosynth Res* 122:121–158. doi: 10.1007/s11120-014-0024-6
- Kalaji HM, Račková L, Paganová V, Swoczyna T, Rusinowski S, Sitko K (2018) Can chlorophyll-a fluorescence parameters be used as bio-indicators to

distinguish between drought and salinity stress in *Tilia cordata* Mill? Environ Exp Bot 152:149–157. doi: 10.1016/j.envexpbot.2017.11.001

Küpper H (2017) 15. Lead Toxicity in Plants. In: Lead: Its Effects on Environment and Health.

Li Q, Chen LS, Jiang HX, Tang N, Yang LT, Lin ZH, Li Y, Yang GH (2010) Effects of manganese-excess on CO₂ assimilation, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, carbohydrates and photosynthetic electron transport of leaves, and antioxidant systems of leaves and roots in *Citrus grandis* seedlings. BMC Plant Biol 10:1–16. doi: 10.1186/1471-2229-10-42

Li X, Zhang L (2015) Endophytic infection alleviates Pb²⁺ stress effects on photosystem II functioning of *Oryza sativa* leaves. J Hazard Mater 295:79–85. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.04.015

Li Y-T, Xu W-W, Ren B-Z, Zhao B, Zhang J, Liu P, Zhang Z-S (2020) High temperature reduces photosynthesis in maize leaves by damaging chloroplast ultrastructure and photosystem II. J Agron Crop Sci. doi: doi:10.1111/jac.12401

LI, L. et al. Synergistic effects of chromium and copper on photosynthetic inhibition, subcellular distribution, and related gene expression in *Brassica napus* cultivars. Environmental Science and Pollution Research, v. 26, n. 12, p. 11827-11845, 2019.

Maia VC, Silva LO (2016) Insect galls of Restinga de Marambaia (Barra de Guaratiba, Rio de Janeiro, RJ). Braz. J. Biol. vol. 76, no. 3, pp. 787-795. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.05314>

Mathur S, Jajoo A, Mehta P, Bharti S (2011) Analysis of elevated temperature-induced inhibition of photosystem II using chlorophyll *a* fluorescence induction kinetics in wheat leaves (*Triticum aestivum*). Plant Biol 13:1–6. doi: 10.1111/j.1438-8677.2009.00319.x

Nazar R, Iqbal N, Masood A, Khan MIR, Syeed S, Khan NA (2012) Cadmium Toxicity in Plants and Role of Mineral Nutrients in Its Alleviation. Am J Plant

Sci 03:1476–1489. doi: 10.4236/ajps.2012.310178

- Oliveira JC (2009) Viabilidade de espécies galhadoras (Diptera, Cecidomyiidae) e parasitóides (Hymenoptera) associadas à *Guapira opposita* (Vell.) (Nyctaginaceae) como bioindicadores da qualidade ambiental. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro
- Oliveira GA (2013) Diversidade de Myrtaceae das Restingas de Conceição da Barra e São Mateus, Espírito Santo, Brasil. Inst Pesqui Jard Botânico do Rio Janeiro Esc Nac Botânica Trop Programa Pós-graduação em Botânica 1–160.
- Paunov M, Koleva L, Vassilev A, Vangronsveld J, Goltsev V (2018) Effects of different metals on photosynthesis: Cadmium and zinc affect chlorophyll fluorescence in durum wheat. *Int J Mol Sci*. doi: 10.3390/ijms19030787
- Rout GR, Sahoo S (2015) Role of Iron in Plant Growth and Metabolism. *Rev Agric Sci* 3:1–24. doi: 10.7831/ras.3.1
- Schmidt W (1993) Iron stress-induced redox reactions in bean roots. *Physiol Plant* 89:448–452. doi: 10.1111/j.1399-3054.1993.tb05197.x
- Shahid M, Pourrut B, Dumat C, Nadeem M, Aslam M, Pinelli E (2014) Heavy-metal-induced reactive oxygen species: phytotoxicity and physicochemical changes in plants. *Rev Environ Contam Toxicol* 232:1–44. doi: 10.1007/978-3-319-06746-9_1
- Silva LF, Gallon CZ, Filgueiras PR, Silva DM (2019) Irrigation improves plant vitality in specific stages of mango tree development according to photosynthetic efficiency. *Photosynthetica* 57:820–829. doi: 10.32615/ps.2019.091
- Sobral M, Grippa CR, Souza MC, Aguiar OT, Bertoncetto R, Guimarães TB (2012) Fourteen new species and two taxonomic notes on Brazilian Myrtaceae. *Phytotaxa*, 50(1), 19. doi:10.11646/phytotaxa.50.1.3
- Staggemeier VG (2014) Estudos ecológicos e evolutivos em Myrtaceae com

ênfase nos padrões fenológicos, de distribuição e diversidade. Tese de doutorado, Universidade Federal de Goiás

Strasser B, Strasser R (1995) Measuring Fast Fluorescence Transients to Address Environmental Questions: The JIP-Test. *Photosyn Thesis From Light to Biosph* 977–980. doi: 10.1007/978-94-009-0173-5_1142

Strasser R, Srivastava A, Tsimilli-Michael M (2000) The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples.

Strasser RJ, Tsimilli-Michael M, Qiang S, Goltsev V (2010) Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820-nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant *Haberlea rhodopensis*. *Biochim Biophys Acta - Bioenerg* 1797:1313–1326. doi: 10.1016/j.bbabi.2010.03.008

Tokarz KM, Makowski W, Tokarz B, Hanula M, Sitek E, Muszyńska E, Jędrzejczyk R, Banasiuk R, Chajec Ł, Mazur S (2020) Can ceylon leadwort (*Plumbago zeylanica* L.) acclimate to lead toxicity?—studies of photosynthetic apparatus efficiency. *Int J Mol Sci*. doi: 10.3390/ijms21051866

Yusuf MA, Kumar D, Rajwanshi R, Strasser RJ, Tsimilli-Michael M, Govindjee, Sarin NB (2010) Overexpression of γ -tocopherol methyl transferase gene in transgenic *Brassica juncea* plants alleviates abiotic stress: Physiological and chlorophyll a fluorescence measurements. *Biochim Biophys Acta - Bioenerg* 1797:1428–1438. doi: 10.1016/j.bbabi.2010.02.002

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As plantas herbáceas, como *Canavalia rosea*, estão mais próximas do mar, e isso propicia seu maior contato com a água e também os rejeitos de mineração que estão agregados ao mar. Foi possível observar, através da fluorescência da clorofila *a*, que as plantas desta espécie são sensíveis à presença de elementos-traço na folha, o que levou à redução da sua eficiência fotoquímica. Tanto nos indivíduos em Linhares, mais próximas da foz do Rio Doce, quanto naqueles em São Mateus, pôde-se verificar a presença de elementos-traço. A presença de bandas K, L e G nas análises de fluorescência transiente da clorofila *a*, representou efeitos negativos do sistema fotoquímico da planta em resposta a presença dos elementos-traço na folha.

O mesmo foi observado nas plantas de *Eugenia astringens*, uma espécie arbustiva que habita áreas um pouco mais afastadas do mar, diferentemente das herbáceas. Contudo, nesta espécie, obteve-se respostas semelhantes à *C. rosea* em relação à concentração de elementos-traço na folha, sendo também influenciada negativamente pela presença desses elementos. A fluorescência transiente da clorofila *a* mostrou as etapas da cadeia de transporte de elétrons que foram prejudicadas pelos elementos-traço na folha.

Os elementos-traço Cd, Co, Fe e Pb foram danosos para as duas espécies estudadas. Observou-se que a dissipação de energia (DI_0/RC) foi maior no período chuvoso para ambas as espécies avaliadas. O mesmo foi observado na absorção (ABS/RC), captura (TR_0/RC), transporte (ET_0/RC) e redução dos aceptores finais de elétrons do FSII (RE_0/RC). O período chuvoso, nas áreas mais próximas da Foz do Rio Doce, para ambas as espécies (*E. astringens*: A5 e *C. rosea*: Linhares) mostrou maior valor de F_0/F_M , o que indica que as espécies estavam sob estresse, e à medida que se aumenta o valor de F_0/F_M , maior é a produção quântica basal do processo não-fotoquímico no FSII.

Os elementos-traço Cd, Co, Fe e Pb foram danosos para as duas espécies estudadas. Observou-se que a dissipação de energia (DI_0/RC) foi maior no período chuvoso para ambas as espécies avaliadas. O mesmo foi observado na absorção (ABS/RC), captura (TR_0/RC), transporte (ET_0/RC) e redução dos aceptores finais de elétrons do FSII (RE_0/RC).

Observou-se maior valor de F_0/F_M nas duas espécies avaliadas, no período chuvoso, em A5. À medida que se aumenta o valor de F_0/F_M , maior é a produção quântica basal do processo não-fotoquímico no FSII. Isso indica que as plantas estavam sob estresse.

Sugere-se estudos em casa de vegetação com elementos-traço específicos para verificar as possíveis respostas fotoquímicas, bem como a avaliação de enzimas do estresse oxidativo, substâncias do metabolismo secundário, etc., para verificar as respostas fisiológicas dessas plantas à ambientes de altas concentrações de elementos-traço, para identificar quais seriam os metabólitos secundários produzidos por tais espécies quando estão estressadas e para quantificar os teores de elementos-traço nas raízes, uma vez que alguns elementos-traço, ao serem absorvidos pela planta, acabam se concentrando nas raízes, o que prejudica a absorção de nutrientes pela planta.

Através desse estudo inicial da fisiologia de *E. astringens* e *C. rosea*, verificou-se que as plantas foram afetadas com a presença dos elementos-traço nas folhas, e que a cadeia de transporte de elétrons foi prejudicada em várias das etapas mencionadas.