



**Alan Mario Zuffo**

Organizador

**Avanços  
nas Ciências  
Florestais  
Volume III**



**Alan Mario Zuffo**  
Organizador

**Avanços nas Ciências Florestais**  
**Volume III**



Pantanal Editora

2022

Copyright© Pantanal Editora

**Editor Chefe:** Prof. Dr. Alan Mario Zuffo

**Editores Executivos:** Prof. Dr. Jorge González Aguilera e Prof. Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

**Diagramação:** A editora. **Diagramação e Arte:** A editora. **Imagens de capa e contracapa:** Canva.com. **Revisão:** O(s) autor(es), organizador(es) e a editora.

### Conselho Editorial

#### Grau acadêmico e Nome

Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos  
Prof. MSc. Adriana Flávia Neu  
Prof. Dra. Allys Ferrer Dubois  
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior  
Prof. MSc. Aris Verdecia Peña  
Prof. Arisleidis Chapman Verdecia  
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva  
Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo  
Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu  
Prof. Dr. Carlos Nick  
Prof. Dr. Claudio Silveira Maia  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos  
Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva  
Prof. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos  
Prof. MSc. David Chacon Alvarez  
Prof. Dr. Denis Silva Nogueira  
Prof. Dra. Denise Silva Nogueira  
Prof. Dra. Dennyura Oliveira Galvão  
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves  
Prof. Me. Ernane Rosa Martins  
Prof. Dr. Fábio Steiner  
Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza  
Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez  
Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles  
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira  
Prof. MSc. Javier Revilla Armesto  
Prof. MSc. João Camilo Sevilla  
Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales  
Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski  
Prof. MSc. Lucas R. Oliveira  
Prof. Dra. Keyla Christina Almeida Portela  
Prof. Dr. Leandro Argentel-Martínez  
Prof. MSc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann  
Prof. MSc. Marcos Pisarski Júnior  
Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos  
Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla  
Prof. MSc. Mary Jose Almeida Pereira  
Prof. MSc. Núbia Flávia Oliveira Mendes  
Prof. MSc. Nila Luciana Vilhena Madureira  
Prof. Dra. Patrícia Maurer  
Prof. Dra. Queila Pahim da Silva  
Prof. Dr. Rafael Chapman Auty  
Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke  
Prof. Dr. Raphael Reis da Silva  
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes  
Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo (*In Memoriam*)  
Prof. Dra. Sylvana Karla da Silva de Lemos Santos  
MSc. Tayronne de Almeida Rodrigues  
Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca  
Prof. MSc. Wesclen Vilar Nogueira  
Prof. Dra. Yilan Fung Boix  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

#### Instituição

OAB/PB  
Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã  
UO (Cuba)  
IF SUDESTE MG  
Facultad de Medicina (Cuba)  
ISCM (Cuba)  
UFESSPA  
UEA  
UNEMAT  
UFV  
AJES  
UFGD  
UEMS  
IFPA  
UNICENTRO  
IFMT  
UFMG  
URCA  
ISEPAM-FAETEC  
IFG  
UEMS  
UFF  
(Colômbia)  
UNAM (Peru)  
IFRR  
UCG (México)  
Mun. Rio de Janeiro  
UNMSM (Peru)  
UFMT  
Mun. de Chap. do Sul  
IFPR  
Tec-NM (México)  
Consultório em Santa Maria  
UFJF  
UEG  
FAQ  
UNAM (Peru)  
SEDUC/PA  
IFB  
IFPA  
UNIPAMPA  
IFB  
UO (Cuba)  
UFMS  
UFPI  
UFG  
UEMA  
IFB  
UFPI  
FURG  
UO (Cuba)  
UFT



## **Apresentação**

O avanço tecnológico é comum em todas as áreas de conhecimento, na área de Ciência Florestal não é diferente. As tecnologias florestais são fundamentais para o uso sustentável dos recursos naturais e na comercialização dos produtos florestais. A obra, vem a consolidar o anseio da Editora Pantanal na divulgação de resultados, que contribuem de modo direto no desenvolvimento humano e na sustentabilidade dos recursos naturais.

O primeiro volume do e-book “Avanços nas Ciências Florestais III” é a continuação de uma série de volumes de e-books com trabalhos que visam otimizar a produção e conservação dos recursos florestais. Nos capítulos são abordados os seguintes temas: importância do sistema radicular de árvores em plantios florestais; fisiologia do estresse hídrico em plantas; modelagem volumétrica de um plantio e candeia a partir de imagens RapidEye; escarificação química e mecânica de sementes de *Parkinsonia aculeata* L. e seu efeito na absorção de água e germinação. Portanto, esses conhecimentos irão agregar muito aos seus leitores que procuram promover melhorias quantitativas e qualitativas na Ciência Florestal. Sempre em busca da sustentabilidade do planeta.

Aos autores dos capítulos, pela dedicação e esforços sem limites, que viabilizaram esta obra que retrata os recentes avanços científicos e tecnológicos na área de Avanços nas Ciências Florestais III os agradecimentos do organizador e da Pantanal Editora. Por fim, esperamos que este ebook possa colaborar e instigar mais estudantes e pesquisadores na constante busca de novas tecnologias e avanços para a áreas de Ciência Florestal. Assim, garantir uma difusão de conhecimento fácil, rápido para a sociedade.

O organizador


## **Sumário**

<b>Apresentação</b>	<b>4</b>
<b>Capítulo 1</b>	<b>6</b>
Importância do sistema radicular de árvores em plantios florestais	6
<b>Capítulo 2</b>	<b>17</b>
Fisiologia do Estresse Hídrico em Plantas	17
<b>Capítulo 3</b>	<b>24</b>
Modelagem volumétrica de um plantio de candeia a partir de imagens RapidEye	24
<b>Capítulo 4</b>	<b>40</b>
Escarificación química y mecánica de semillas Parkinsonia aculeata L. SP.Pl. y su efecto en la absorción de agua y germinación	40
<b>Índice Remissivo</b>	<b>50</b>
<b>Sobre o organizador</b>	<b>51</b>

## Importância do sistema radicular de árvores em plantios florestais

Recebido em: 17/09/2022


Aceito em: 20/09/2022


 10.46420/9786581460655cap1

Maria José de Holanda Leite<sup>1\*</sup> 

Álvaro Martins de Carvalho Filho<sup>2</sup> 


Gabriela Gomes Ramos<sup>3</sup> 

Denise Maria Santos<sup>4</sup> 

Carmen Hellen da Silva Rocha<sup>5</sup> 

Andréa de Vasconcelos Freitas Pinto<sup>1</sup> 

Alcîenia Silva Albuquerque<sup>3</sup> 

Bianca Maria Silva do Nascimento<sup>6</sup> 

### INTRODUÇÃO

A comunidade vegetal modifica em menor ou maior grau o ambiente onde se encontra, dado que em um ecossistema existem interações entre subsistemas do meio ambiente físico, do meio biótico e entre os meios físicos e bióticos (Raven et al., 2014). Para se adaptar as condições impostas pelo ambiente, as plantas desenvolvem mecanismos adaptativos para se instalarem e sobreviverem conforme as condições e oferta de atributos ambientais do ecossistema.

O sistema radicular das plantas, além de promover a ancoragem da árvore, tem estreita interação com o solo, absorve água e nutrientes essenciais ao crescimento vegetal, auxilia na retenção do solo contra a ação da erosão, aumenta a capacidade de infiltração de água no solo, fornece exsudado para os microrganismos e participa ativamente dos processos pedogenéticos (Biddle, 1992).

As áreas degradadas são ecossistemas que sofreram forte intervenção de natureza exógena (perturbação), perdendo sua capacidade de resiliência, supressão da vegetação e retirada abrupta do substrato sendo necessário a utilização de técnicas de reabilitação como medidas biológicas. O sistema radicular é uma variável importante na avaliação da construção de ecossistemas reabilitados e do seu subsolo. Diante da carência de estudos e pesquisas sobre suas as possíveis inter-relações entre as espécies vegetais, seus sistemas radiculares, os seus respectivos papéis funcionais em ecossistemas reabilitados

---

<sup>1</sup> Universidade Federal de Alagoas (UFAL), BR 104, Km 85, CEP: 57100-000, S/N - Mata do Rolo - Rio Largo, Alagoas, Brasil.

<sup>2</sup> Centro Universitário Ateneu, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), 52171-900, Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n - Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil.

<sup>4</sup> Instituto Dom José de Educação e Cultura, Brasil.

<sup>5</sup> Instituto Federal do Maranhão-IFMA, Brasil.

<sup>6</sup> Universidade Federal de Campina Grande –UFCG, Brasil.

\* Autora correspondente: maryholanda@gmail.com

envolvendo espécies pioneiras rústicas nativas e exóticas, esse estudo torna-se relevante, além de que os estudos realizados são voltados à silvicultura (Simões, 1989).

O conhecimento do comportamento do sistema radicular nas diferentes medidas biológicas com diferentes composições de espécies vegetais é faz-se importante, com o intuito de enriquecer as estratégias de reabilitação de áreas degradadas. Onde a seleção de espécies com sistema radicular capaz de suportar condições adversas do meio, cumprindo seus papéis funcionais, ajuda na reconstrução dos ecossistemas, mesmo que de forma gradual, mas ganhando-se no final pelo acerto das medidas empregadas serem autossustentáveis (Cutler et al., 1990).

## **O SISTEMA RADICULAR DAS ÁRVORES**

As raízes das árvores absorvem água e nutrientes do solo, servem como estoque de carboidratos e formam um sistema estrutural que suporta o tronco e a copa. A natureza deste sistema é mal compreendida, provavelmente porque ocorre debaixo da terra (Appezato-Da-Glória; Carmello-Guerreiro, 2003).

Os mesmos autores relatam ser um equívoco comum é que o sistema radicular é um 'reflexo' do tronco e dos galhos. Na verdade, o sistema de raízes das árvores é raso, dominado por longas, relativamente pequenas e laterais raízes, espalhadas e rentes à superfície do solo, em vez de uma raiz principal profundamente penetrante. É incomum que as árvores tenham raízes mais profundas do que 2m, embora excepcionalmente algumas raízes, com poucos milímetros de diâmetro, possam se estender até 5m ou mais, solo adentro (Appezato-Da-Glória; Carmello-Guerreiro, 2003).

A maioria das raízes fica perto da superfície, 90% ou mais delas estão localizadas nos 60cm superiores. Embora a profundidade típica das raízes das árvores tenha sido exagerada, a disseminação das raízes muitas vezes foi subestimada - elas geralmente se estendem para fora muito além da expansão da copa (linha de gotejamento).

## **DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR**

Inicialmente, uma semente em germinação tem uma única raiz, a radícula, ou raiz principal, que cresce verticalmente para baixo, desde que as condições do solo sejam adequadas. O alongamento é mais rápido durante 2 ou 3 anos, mas diminui a partir do terceiro ano e para maiores profundidades de solo.

As raízes laterais (radiais) crescem horizontalmente e formam um estágio inicial de apoio e logo se tornam responsáveis pelo suporte estrutural. O desenvolvimento da raiz principal declina, resultando em uma pequena proporção de árvores com uma boa raiz mestra na maturidade. Na verdade, é difícil distinguir uma raiz principal em muitas árvores naturais, pois ocorre frequentemente lesão na ponta da raiz mestra, por exemplo, pela passagem da fauna do solo, podridão radicular, falha na penetração em camadas de solo compactas e duras ou nos viveiros, pelo corte/transplante (Appezato-Da-Glória; Carmello-Guerreiro, 2003).



Espécies consideradas pivotantes, como o carvalho (*Quercus* spp.), o pinheiro (*Pinus* spp.), o cedro (*Abies* spp.), tem uma tendência inerente mais forte de reter uma raiz principal distinta, do que o álamo (*Populus* spp.), salgueiro (*Salix* spp.) e abeto (*Picea* spp.), mas a raiz principal não persiste mesmo naquelas espécies. As raízes principais intactas são geralmente maiores logo abaixo do tronco e afinam até atingirem uma profundidade de 0,5 a 1 m, onde muitas vezes elas se dividem em várias raízes menores, mas ainda assim descendentes.

As raízes laterais perto da superfície do solo engrossam em anos sucessivos, tornam-se grandes raízes lenhosas e formam o apoio estrutural da árvore adulta - geralmente existem entre quatro e onze raízes que podem engrossar 30cm ou mais, próximas do caule. Elas afinam rapidamente até a distância de 2-3m, quando ficam com 2-5cm de diâmetro, um ponto em que perderam muito de sua rigidez e força física.

É aqui que elas tendem a se romper quando ocorre falha na placa radicular, como em tempestades. Para além dessa "zona de afinamento rápido", as raízes laterais estendem-se amplamente por muitos metros, sem uma redução adicional significativa na bitola - tipicamente mantendo um diâmetro de 1-2cm.

Elas são esparsamente ramificadas, perenes, de aparência lenhosa e semelhante a cordas. Em algumas espécies, como o freixo (*Fraxinus* spp.), cerejeira (*Prunus* spp.), espinheira branca ou biancospino (*Crataegus* spp.) e alguns pinheiros, estas raízes tendem a crescer para formar um sistema superficial de raízes, geralmente restrito aos 15cm superiores do solo. Embora a maioria das raízes parecidas com cordas tenham apenas 5-15m de comprimento, algumas podem ter mais de 25m.

No lado superior das raízes laterais, crescem para cima raízes ramificadas, que se dividem profusamente na superfície do solo, que geralmente é bem arejado, e formam leques ou esteiras de milhares de fibras finas (<2 mm de diâmetro) não-lenhosas, as raízes "absorventes" ou "alimentadoras". Na floresta, elas crescem horizontalmente entre as folhas caídas de 2 a 3 anos.

Estas raízes em leque penetram e mantêm a cobertura sobre uma área considerável; cada uma pode ocupar uma fina camada horizontal de 300 cm<sup>2</sup> ou mais. Associadas a estas raízes estão as micorrizas, muito mais finas e parecidas com fios. As micorrizas são fungos simbióticos que crescem sobre ou nas raízes, numa associação que é mutuamente benéfica tanto para a árvore como para o fungo. São extremamente eficientes na absorção de nutrientes, especialmente fósforo, e muitas árvores não conseguem sobreviver sem elas.

Raízes finas e suas micorrizas são conjuntamente responsáveis pela absorção de umidade e nutrientes, enquanto as raízes lenhosas perenes atuam principalmente como vasos condutores de/para o tronco. As raízes finas têm um tempo de vida variando de alguns dias a vários anos - em média sobrevivendo por 1-2 anos.

Raízes ramificadas a partir do lado inferior das laterais são conhecidas como 'raízes descendentes' e geralmente ocorrem a alguns metros do caule. Elas têm 1-2cm de diâmetro, crescem para baixo, e em

contraste com a raiz principal ou as laterais oblíquas, dividem suas extremidades em raízes finas e não lenhosas.

#### **a) Distribuição das raízes**

A variabilidade das condições do solo e a presença de obstáculos e barreiras ao crescimento das raízes resultam em uma variável e imprevisível distribuição, dentro da visão geral já apresentada. Isso ocorre porque o crescimento das raízes é oportunista, ocorrendo somente onde o ambiente do solo pode sustentá-lo (Apezzato-Da-Glória; Carmello-Guerreiro, 2003).

As raízes proliferam onde quer que encontrem condições favoráveis, razão pela qual a maior concentração de raízes é encontrada perto da superfície, onde o solo é mais solto e água, oxigênio e nutrientes estão mais prontamente disponíveis. Quanto maior a profundidade do solo, maior é a densidade e menor a aeração, conseqüentemente, o número e o tamanho das raízes diminuem drasticamente com a profundidade. Portanto, abaixo de 1m é raro encontrar muitas raízes, maiores que alguns mm de diâmetro.

#### **b) Profundidade da raiz**

As raízes mais profundas são geralmente encontradas diretamente abaixo ou próximas do tronco, como a principal e as raízes oblíquas laterais ou as raízes descendentes. A profundidade máxima das raízes varia muito, de apenas 10 a 20 cm em solos encharcados para, excepcionalmente, dezenas de metros em solos bem arejados ou rochas fissuradas. No entanto, não existe uma espécie de árvore intrinsecamente "profundamente enraizada" ou "pouco enraizada".

Todas as árvores podem desenvolver um sistema radicular profundo (2-3m de profundidade) se as condições do solo permitirem. As diferenças aparentes na capacidade de enraizamento dependem da capacidade geneticamente determinada das raízes para tolerar condições difíceis do solo, como a má aeração e compactação (Apezzato-Da-Glória; Carmello-Guerreiro, 2003).

É essa propensão que faz com que os sistemas radiculares de algumas árvores sejam mais profundos do que outros sob as mesmas condições.

Enquanto as características genéticas de uma árvore desempenham algum papel no padrão de enraizamento, as condições do solo são de importância primordial. Assim, a penetração descendente das raízes das árvores pode ser interrompida pela excessiva pedregosidade, estratos de óxido de ferro (iron pans), camadas compactas do solo (especialmente argilas compactas), leito rochoso, aeração deficiente e lençóis freáticos altos ou encravados. Mesmo as raízes principais são incapazes de continuar crescendo quando atingem tais condições - elas seguem horizontalmente ou morrem.

Onde as raízes profundas morrem, várias raízes substitutas podem se desenvolver logo atrás do tecido morto e estas, por sua vez, também se tornam horizontais ou morrem. Obstruções no solo em profundidades rasas são comuns no Reino Unido e, portanto, não é de surpreender que um levantamento

das placas de raízes de árvores derrubadas pelo vento no sul da Inglaterra após as tempestades de 1987 e 1990 revelou que 44% das placas de raízes eram mais rasas do que 1m, 95% foram mais rasas que 2m e a placa de raiz mais profunda foi de apenas 3m.

Este padrão está de acordo com a grande quantidade de dados disponíveis a partir de escavações de sistemas de raízes que indicam que a profundidade média das raízes está tipicamente na faixa de 1 a 2m.

### **c) Propagação da raiz**

A propagação da raiz não está confinada à área delimitada por uma projeção descendente das pontas dos galhos, como muitas vezes foi suposto. A escavação revelou que as raízes podem crescer a uma distância considerável além da área da copa; tipicamente estendendo-se para fora por uma distância equivalente a pelo menos a altura da árvore, e alguns casos (particularmente em solos inférteis ou compactos) até 3 vezes a altura das árvores.

Raízes distantes do tronco são geralmente muito próximas à superfície do solo. Obstáculos no solo, como pedras, calçadas ou as fundações prediais fornecem uma barreira física à extensão da raiz (ver Marshall et al., em preparação). As raízes que se deparam com tais obstáculos tipicamente desviam deles e, uma vez livres da obstrução, retomam sua direção original de crescimento.

## **FATORES QUE AFETAM A DISTRIBUIÇÃO DAS RAÍZES**

### **a) Densidade do solo**

O crescimento da raiz diminui acentuadamente com o aumento da densidade do solo; o crescimento ótimo é alcançado em aproximadamente  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$  de densidade ou menos. Em solos argilosos pesados, o crescimento efetivamente cessa a uma densidade  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$  e em solos arenosos mais claros a cerca de  $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ .

A compactação pode ser uma ocorrência natural em alguns locais, por exemplo, causada por glaciação ou pode ser induzida, como na passagem repetida de veículos sobre a superfície do solo.

Nos solos compactados, muitas vezes é difícil estabelecer árvores porque as raízes não penetram de forma eficaz. As árvores que crescem nesses solos desenvolvem um sistema radicular muito raso, com um grande número de raízes laterais na parte relativamente menos densa do solo.

Raízes que atingem um subsolo compacto tendem a se deformar ou se ramificar profundamente e continuar lateralmente, acima do plano de compactação. Se estas raízes encontrarem um caminho através da camada compacta, como uma fissura ou um canal radicular deteriorado, elas podem retomar o crescimento para baixo.

Se o solo abaixo da obstrução for favorável, então as raízes podem proliferar novamente, produzindo um sistema radicular de dois níveis. Árvores estabelecidas, que experimentam repentina compactação do solo (por exemplo, pelo movimento de máquinas em canteiros de obras) frequentemente

sofrem a morte da raiz, e a copa morre devido à incapacidade da árvore para se adaptar rapidamente a esta mudança das condições do solo.

### **b) Aeração do solo**

Para que as raízes sobrevivam, o oxigênio deve estar disponível no solo, no entorno delas. O fornecimento de oxigênio às raízes é determinado pela estrutura e textura do solo; em solos com textura grossa ou solta, as folgas de ar entre as partículas de terra são relativamente grandes e assim o oxigênio atmosférico se difunde rapidamente no solo, e o produto residual da respiração, o dióxido de carbono, pode se dissipar.

Este processo é inibido em solos de textura fina (argilosa), encharcado e compactado porque os poros são pequenos e também podem ser preenchidos com água - a difusão gasosa é 10.000 vezes mais rápida no ar do que na água.

A aeração deficiente do solo, especialmente a produzida pelo encharcamento prolongado, inibe o crescimento de novas raízes e pode resultar na morte e deterioração de uma grande porção do sistema radicular existente. As árvores que estão em tais condições tendem a ser caracterizadas por sistemas radiculares muito rasos, semelhantes a placas, onde as raízes estão confinadas ao solo superior, mais aeróbico. As raízes das árvores dormentes toleram períodos de aeração deficiente melhor do que as de árvores que crescem ativamente, porque sua taxa de respiração é reduzida e elas precisam de menos oxigênio.

### **c) Fertilidade**

O solo fértil estimula o crescimento dos brotos relativos às raízes e aumenta a ramificação delas. Raízes de árvores estabelecidas proliferam em áreas de solo úmido que são ricas em nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo. Em geral, os solos com baixa fertilidade produzem sistemas radiculares longos, finos, mal ramificados e superficiais, enquanto locais com maior fertilidade produzem raízes bem ramificadas e profundas (desde que o solo esteja suficientemente solto e o oxigênio disponível).

### **d) As raízes das árvores e o lençol freático**

É um equívoco comum que as árvores são fortemente dependentes do lençol freático para ter umidade durante os secos meses de verão. Na maior parte do Reino Unido, o lençol freático está situado no fundo do solo, muito além do alcance das raízes das árvores, e nada contribui para atender a demanda de água das árvores.

Árvores e outras vegetações em geral são totalmente dependentes de chuvas recentes e da água armazenada no solo demonstra que a demanda de água de árvores na maior parte do Reino Unido e para a maioria dos tipos de solo, mesmo durante o verão seco, estão disponíveis em uma profundidade de

solo de cerca de 1,5 m. Nos raros casos em que as raízes estão ao alcance do lençol freático, elas muitas vezes proliferam logo acima, na "franja capilar" mas elas são incapazes de crescer nos poros saturados do lençol freático devido à má aeração.

## **CRESCIMENTO DAS RAÍZES E INFLUÊNCIA NA ABSORÇÃO**

A capacidade das plantas para obter água e nutrientes minerais do solo está relacionada com sua capacidade para desenvolver um extensivo sistema radicular. O desenvolvimento do sistema radicular de mono e de dicotiledôneas depende, em grande parte, da atividade do meristema apical das raízes.

A absorção de íons é mais pronunciada em raízes jovens. Além disto, a taxa de absorção de íons das raízes diminui na região mais distante do ápice radicular. No entanto, esta tendência varia bastante, dependendo de fatores, como tipo de íon (nutriente), estado nutricional e espécie vegetal.

No solo, os nutrientes podem se mover para as superfícies radiculares dissolvidos no fluxo em massa de água ou por difusão. No fluxo em massa, os nutrientes são carreados pela água que está se movendo do solo para a raiz. O fluxo em massa ocorre por diferença de pressão, a qual é determinada, primariamente, pela taxa de transpiração (Rylter, 1997).

Assim, a quantidade de nutriente suprida por fluxo em massa depende da transpiração e da concentração do nutriente na solução do solo. Quando ambas são altas, o fluxo em massa passa a ter importante papel na aquisição de nutrientes. Em geral, nutrientes como Cálcio e o Nitrato são transportados para a superfície das raízes por fluxo em massa.

Na difusão, nutrientes minerais movem-se de uma região de maior para outra de menor concentração. A absorção de nutrientes pela raiz diminui a concentração dos íons nesta região e favorece a difusão em direção à superfície radicular.

Quando a difusão é lenta, cria-se uma zona de esgotamento do nutriente próximo à superfície da raiz. Normalmente, a difusão é importante para nutrientes encontrados em baixas concentrações na solução do solo, como é o caso do fósforo.

## **SISTEMA RADICULAR DE ESPÉCIES FLORESTAIS**

O solo é o espaço físico onde ocorre o crescimento radicular. Nesse espaço, entre raiz e solo, duas forças se opõem: a pressão radicular, gerada por mecanismos biofísicos da planta, e a resistência à penetração do solo causada pelas forças que existem entre sólidos e solução do solo. Quando a pressão radicular vence, a raiz cresce. Por outro lado, quando a planta não consegue produzir suficiente pressão radicular, a raiz não se desenvolve.

Assim, pode-se concluir que é necessário priorizar a produção de mudas com boa qualidade morfológica, visto que raízes bem estruturadas estão mais aptas a vencer a resistência do solo, desenvolvendo-se em busca de água e nutrientes, desta maneira, favorecendo o crescimento da planta.

O desenvolvimento do sistema radicular de uma árvore é um processo complexo que envolve muitos fatores internos e do ambiente, e suas interações. O fator que coordena a distribuição das raízes no solo é o genótipo da espécie; porém, ele pode ser influenciado por outros fatores inerentes ao ambiente, principalmente do solo, tais como: fertilidade, densidade, disponibilidade de oxigênio, textura e temperatura.

As circunstâncias em que a planta se desenvolve, como por exemplo, competição e espaçamento entre as árvores, também contribuem para o desenvolvimento das raízes. Por isso é de grande importância do conhecimento do funcionamento do sistema radicular, pois este é fundamental no manejo das florestas plantadas.

De maneira geral, dois padrões de distribuição são encontrados: o da estrutura típica de árvore invertida, de um sistema de raízes primárias, e o da estrutura tipo guarda-chuva, de um sistema de raízes secundárias. O conhecimento da área onde ocorre a maior atividade do sistema radicular é importante para o planejamento do fornecimento de nutrientes via solo, uma vez que a absorção de água e de nutrientes ocorre simultaneamente.

A inibição do crescimento da parte aérea de mudas sob restrição radicular é, provavelmente, um processo regulado por sinais hormonais enviados pelas raízes, nos quais os fatores nutricionais ou relações hídricas das plantas podem ou não desempenhar papel secundário.

Uma compreensão da dinâmica de raízes, que determina sua distribuição no solo ao longo do tempo, envolve o desenvolvimento das relações quantitativas entre características do solo e alocação de carbono fixo nos compartimentos do solo, mortalidade e rotação das raízes e morfologia do sistema de raízes desenvolvido. No entanto, na ausência de tais informações, uma observação empírica representa uma abordagem válida para compreender aspectos da dinâmica das raízes.

As raízes de árvores podem ser separadas, de acordo com seu tamanho e morfologia, em três categorias: raízes grossas, que apresentam baixa taxa de regeneração; raízes de diâmetro médio, que também apresentam baixa taxa de regeneração; e raízes finas, com alta taxa de regeneração. Cada uma tem sua importância no crescimento da planta.

## **IMPORTÂNCIA DO SISTEMA RADICULAR NO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DA PLANTA**

O conhecimento da arquitetura radicular de espécies florestais pode permitir a recomendação de espécies mais adaptadas às características climáticas e de solo de uma determinada área ou região, conduzindo a uma melhor utilização do recurso solo.

O sucesso no estabelecimento de mudas é dependente da capacidade da muda gerar novas raízes. A produção de novas raízes pode atenuar o efeito do choque do transplante ou plantio (termo usado para descrever a redução de crescimento das mudas, causada pela aclimação no novo ambiente) logo após o plantio, o qual resulta de proliferação de raízes pobres e insuficiente contato solo-raiz.

Este problema pode ser pronunciado no caso de mudas de raízes nuas, onde o contato solo-raiz é perturbado através da perda de raízes finas. O crescimento de novas raízes ajuda a aliviar este problema. Em mudas de coníferas, o crescimento de novas raízes é dependente da fotossíntese e de alto potencial de água imediatamente após o plantio.

Sabe-se que, a distribuição das raízes no solo resulta de uma série de processos complexos e dinâmicos, que incluem as interações entre o ambiente, o solo e as plantas em pleno crescimento. A restrição do sistema radicular limita o crescimento e o desenvolvimento de várias espécies, em virtude da redução de área foliar, altura e produção de biomassa.

A senescência de árvores de idade avançada está associada às severas restrições e limitações fisiológicas ao sistema radicular. Essas restrições não ocorrem somente com mudas, mas com árvores que se desenvolvem em condições naturais.

A forma, a profundidade e a distribuição das raízes dependem do ambiente e do potencial genético de cada espécie. Impedimentos físicos ou químicos do solo podem dificultar o pleno desenvolvimento das raízes.

As funções das raízes são ancoragem, absorção e movimento longitudinal de água e nutrientes minerais. Absorção e movimentação da água são realizadas pelas raízes finas, e a ancoragem da árvore pelas raízes grossas.

#### **a) Raízes finas**

As raízes finas, geralmente definidas como sendo menores que 2 mm de diâmetro, desempenham um papel significativo no crescimento das árvores. Raízes finas têm curto período de vida (menos que um ano) e são as principais responsáveis pela absorção de água e nutrientes pelas plantas, onde comprimento e número destas raízes são indicadores da capacidade de absorção. Portanto, é desejável que as plantas apresentem um amplo sistema radicular. A maior produção de biomassa de raízes se dá na fase de maior crescimento das árvores, isto é, na fase vegetativa, ocorrendo, durante o período de florescimento e de frutificação, um decréscimo na produção de biomassa de raízes.

As raízes finas são mais abundantes no horizonte orgânico, onde se concentram de 40 a 70% do total de biomassa dessas raízes, das quais 50-80% são biomassa morta, resultado da rápida decomposição e regeneração de raízes finas.

A interação de fatores, dentre eles, a espécie, clone, idade, estação em que é produzida, diâmetro das raízes, além de fatores ambientais do solo, influenciaram na longevidade das raízes finas de

Frequentemente, as raízes de diferentes espécies ou da mesma espécie florestal, sobrepõem-se ocupando os mesmos horizontes orgânicos ou minerais no perfil do solo. Contudo, também é frequente a ocorrência de vários patamares da posição vertical e horizontal das raízes, o que pode permitir uma separação da exploração de recursos e, deste modo, reduzir a competição e aumentar produtividade.

A aquisição de nutrientes pelas plantas no solo ocorre através do crescimento das raízes e por suas ramificações, e a quantidade absorvida é determinada pela área superficial total de raízes e pela taxa de absorção por unidade de superfície de raiz. Raízes mais longas e mais finas, para a mesma massa (mesmo consumo metabólico), resultam em maior área superficial e, conseqüentemente, mais aptas em absorver nutrientes, especialmente os pouco móveis no solo, como o fósforo.

A proliferação de raízes finas na camada da superfície orgânica do solo no ecossistema florestal, é vista como uma estratégia para adquirir nutrientes em solos inférteis, nos quais há limitação de nutrientes. Isso é muito importante em floresta tropical, onde a maioria dos solos é altamente intemperizada, e a camada de raízes, desenvolve-se dentro da camada orgânica para captura, ao longo do ano, de nutrientes produzidos pela decomposição da matéria orgânica (Raven et al., 2001).

A restrição do sistema radicular de mudas de diversas espécies reduziu o peso da matéria seca das raízes, o número de extremidade de raízes, o comprimento de raízes, a área foliar e a assimilação de água.

Em florestas tropicais, o estudo de biomassa de raízes finas é restrito por causa das dificuldades na distinção de raízes vivas. Metodologias visuais não são adequadas neste tipo de floresta, onde a alta diversidade está expressa através da morfologia de muitas raízes. Por outro lado, a definição de raízes mortas é ambígua.

## **b) Raízes grossas**

As raízes grossas têm papel fundamental para a planta. Dentre suas funções, pode-se destacar a sustentação ou ancoragem.

A maioria dos estudos referentes a ancoragem tem sido concentrada em espécies de interesse econômico, particularmente coníferas. A ancoragem é muito importante porque mantém a planta fixa no solo, geralmente na vertical, enquanto as raízes finas se encarregam de absorver água e nutrientes, indispensáveis para o desenvolvimento da planta. Algumas destas substâncias assimiladas pelas raízes finas da árvore, são deslocadas e armazenadas pelas raízes grossas da planta, caracterizando uma função nova para este tipo de raízes (West et al., 2004).

Diferentes fatores afetam a direção de crescimento das raízes, como a direção da qual a raiz emerge e também da sua curvatura em função disso, deve ser priorizada a produção de mudas sem restrição às raízes e técnicas de plantio adequadas, com mínimo de dano ao enraizamento. Estes procedimentos auxiliam a formação de um bom sistema radicular e dão condições para seu desenvolvimento, tanto na fase de viveiro, quanto na fase de crescimento da planta no campo (Raven et al., 2001).

Um sistema radicular bem formado assimila melhor água e nutrientes, o que, de certa maneira, influencia diretamente o crescimento da planta. Além do crescimento da planta, outros fatores são dependentes do desenvolvimento das raízes e da sua arquitetura; dentre eles, o tombamento da árvore.



Fatores limitantes de crescimento das raízes em profundidade incluem rocha na superfície, horizonte B do solo, superfície compactada, solos com horizontes rasos e compactados, toxicidade. O desenvolvimento vertical da raiz é importante na redução da susceptibilidade de queda pelo vento (Raven et al., 2001).

O desenvolvimento das raízes primárias é influenciado por muitos fatores externos. Fatores ambientais que podem afetar a estabilidade e ancoragem da árvore não incluem somente água e relações de nutrientes, mas também aspectos físicos do solo, os quais podem causar impedância, inibindo o crescimento da raiz.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema radicular é muito importante para a estabilidade e crescimento da planta; portanto, além de mudas de boa qualidade, deve-se priorizar o preparo do solo e o plantio das mudas, já que o aspecto físico do solo e a maneira como a muda é colocada na cova, tem grande influência sobre o crescimento das plantas.


## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appezzato-Da-Glória, B., & Carmello-Guerreiro, S. M. (2003). Anatomia vegetal. Viçosa: Ed. UFV.
- Biddle, P. G. (1992). Tree roots and foundations. Arboriculture Research Note 108/92/EXT. Arboricultural Advisory and Information Service, Farnham. BS 5837. (1991). Guide for trees in relation to construction. British Standards Institution, London.
- Cutler, D. F., Gasson, P. E., & Farmer, M. C. (1990). The wind blown tree survey: analysis of results. Arboricultural Journal 14, 265-286.
- Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S.E. 2014. Biologia Vegetal, 8ª ed.
- Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2001). Biologia vegetal. 6.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.
- Rylter, R. M. (1997). Fine root production and carbon and nitrogen allocation in basket willows. Thesis (Doctoral) - Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Simões, J. W. (1989). Plantio e tratos culturais: métodos, possibilidades e economicidade. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciências Florestais, 20 p.
- West, J. B.; Espeleta, J. F.; & Donovan, L. A. (2004). Fine root production and turnover across a complex edaphic gradient of a *Pinus palustris-Aristida stricta* savanna ecosystem. Forest Ecology Management. 189: 397-406.

# Fisiologia do Estresse Hídrico em Plantas

Recebido em: 17/09/2022

Aceito em: 20/09/2022

 10.46420/9786581460655cap2

Maria José de Holanda Leite<sup>1\*</sup> 

## INTRODUÇÃO

As plantas crescem e se reproduzem em ambientes adversos, que contêm uma multiplicidade de fatores bióticos, abióticos, químicos e físicos, que variam conforme o tempo e a localização geográfica. Em geral, os parâmetros ambientais abióticos que afetam o crescimento vegetal são luz (intensidade, qualidade e duração), água (disponibilidade no solo), dióxido de carbono, oxigênio, conteúdo e disponibilidade de nutrientes no solo, temperatura e toxinas, como metais pesados, salinidade, etc. As flutuações desses fatores ambientais fora de seus limites normais, geralmente têm consequências bioquímicas e fisiológicas negativas para as plantas (Taiz; Zeiger, 2004).

Por serem sésseis, as plantas são incapazes de evitar os stresses, por não conseguirem se deslocar para um ambiente mais favorável. Como alternativa, desenvolveram a capacidade de compensar as condições estressantes, mediante alteração de processos fisiológicos e de desenvolvimento para manter o crescimento e a reprodução (Taiz; Zeiger, 2006).

O déficit hídrico da planta se desenvolve quando a sua procura excede a oferta de água. Seu fornecimento é determinado pela quantidade de água retida no solo até à profundidade do sistema radicular dos vegetais. A demanda por água na planta é definida pela sua taxa de transpiração ou evapotranspiração, que inclui tanto a transpiração das plantas quanto a evaporação do solo.

A tolerância das plantas à seca, não é uma característica simples, mas uma característica onde mecanismos trabalham isoladamente ou em conjunto para evitar ou tolerar períodos de déficit hídrico. De modo que, entender a biologia e fisiologia do estresse hídrico nos vegetais é de fundamental importância, pois assim é possível conhecer os mecanismos que levam as plantas a se adaptarem ao déficit hídrico, para que se possa criar técnicas adequadas para explorá-las e trabalharmos melhor com os problemas de ordem agrônômica, fisiológica e ou ecológica (Taiz; Zeiger, 2002).

---

<sup>1</sup> Universidade Federal de Alagoas (UFAL), BR 104, Km 85, CEP: 57100-000, S/N - Mata do Rolo - Rio Largo, Alagoas, Brasil.

\* Autora correspondente: maryholanda@gmail.com

## **IMPORTÂNCIA DA ÁGUA NAS PLANTAS**

Como na maioria dos outros organismos, a água representa a maior proporção do volume celular nas plantas e é o recurso mais limitante. Cerca de 97% da água captada pelas plantas são perdidos para a atmosfera (principalmente por transpiração). Mais ou menos 2% são usados para aumento de volume ou expansão celular, e 1%, para processos metabólicos, ex.: a fotossíntese).

O déficit de água (disponibilidade hídrica insuficiente), ocorre na maioria dos habitats naturais ou agrícolas e é causado principalmente por períodos intermitentes até contínuos sem precipitação.

Seca é o termo meteorológico para um período de precipitação insuficiente que resulta em déficit hídrico para a planta. Todavia, essa definição é algo ilusória, pois uma lavoura pode absorver água do solo em situações sem chuva, dependendo da capacidade de retenção de água pelo solo e da profundidade do lençol freático (Taiz; Zeiger, 2004).

A água é um recurso finito que deve ser conservado, além de ser um bem muito valioso, e extremamente indispensável para as plantas. Sua disponibilidade hídrica: Limita o crescimento (turgescência celular); controla a distribuição da vegetação; determina a diversidade biológica em determinado local; permite movimentos estomáticos; transporte de gases, minerais e outras substâncias; além de atuar em diversos processos fisiológicos essenciais à vida (fotossíntese). Ou seja, a disponibilidade hídrica adequada é um dos fatores fundamentais para o sucesso da produtividade dos vegetais, pois a falta de água pode resultar em deficiência hídrica e por consequência em distúrbios fisiológicos negativos nos vegetais (Taiz; Zeiger, 2006).

Os principais fatores que afetam a disponibilidade hídrica de uma região são, a precipitação e a evapotranspiração. A precipitação atua como suprimento de água para os vegetais e a evapotranspiração atua como perda de água pelos vegetais. Em geral, locais com precipitação menor que a evapotranspiração, são locais que apresentam déficit hídrico, no entanto, como as chuvas variam ao longo do ano, essa relação de déficit hídrico também varia. Por isso é importante entender os regimes de precipitação e evapotranspiração de cada região (Taiz; Zeiger, 2006).

## **O ESTRESSE DA SECA**

Como principal definição para os vegetais, estresse pode ser considerado como desvio significativo das condições ótimas de vida. O estresse provoca mudanças e respostas em todo nível funcional do organismo. Inicialmente, estas mudanças e respostas podem ser reversíveis, mas podem também ser permanentes. Mesmo se o agente estressante for temporário, a vitalidade da planta torna-se mais fraca com o prolongar do stresse e quando sua capacidade de ajustamento é atingida, passa então a ser doença crônica ou dano irreversível (Larcher, 1995).

Entre os agentes causadores de stresse abióticos muitos são climáticos, exercendo os seus efeitos na atmosfera e no solo: Entre os fatores atmosféricos temos a radiação e a temperatura que pode ser elevada ou insuficiente; precipitação deficiente e seca; ventos fortes, etc. Já no solo podem ocorrer

concentrações elevadas de sais e ou deficiências minerais; acidez ou alcalinidade excessivas; solos instáveis, deficiência em oxigênio nas zonas em que os solos são muito compactos que estão encharcados.

Já os stresses bióticos são comuns em locais onde a densidade populacional é elevada, ou onde as plantas são muito utilizadas por animais ou microorganismos. Além dos fatores naturais, os seres humanos também são responsáveis por muitos stresses físicos e químicos aos quais as plantas não são capazes de desenvolver qualquer mecanismo de defesa. E embora seja necessário, para facilitar o estudo, tratar cada stress separadamente, na natureza eles não ocorrem isoladamente e influenciam-se mutuamente.

Por exemplo, quando uma determinada cultura não está expressando sua potencialidade máxima, é provável que estas estiveram ou estão sofrendo algum tipo de estresse. Sabe-se que em condições naturais e ou agricultáveis, as plantas são expostas a stresses ambientais, e que o estresse tem papel importante na determinação de como o solo e o clima limitam a distribuição das espécies, seu desenvolvimento e sobrevivência. O estresse hídrico muitas vezes está associado à salinidade presente na biosfera das raízes e ao estresse por calor nas folhas. Quando o estresse hídrico é rápido a primeira defesa da planta é o fechamento dos estômatos.

Diante disso, qual é a importância de compreender o estresse nos vegetais? É importante para entender os processos fisiológicos resultante dos danos causados pelo estresse; os mecanismos de adaptação e aclimação de plantas aos stresses ambientais, os quais são importantes para a agricultura e para o meio ambiente. Pois sabe-se que, quase todos os fatores de estresse em plantas podem ser superados mediante a aplicação de técnicas adequadas de manejo.

E como se reconhece o estresse? Os organismos respondem de forma diferente a um estressor. Numa mesma espécie, a natureza e a intensidade da resposta podem variar em função da idade, do grau de adaptação e da atividade sazonal ou diária. Pode-se dizer que a planta está com estresse zero, quando nível de exposição dos tecidos ao fator ambiental, produz ausência completa de sintomas de injúria.

## **O ESTRESSE VEGETAL**

Plantas terrestres estão expostas a vários tipos de estressores naturais, como déficit hídrico, déficit de oxigênio induzida pelo excesso de água, alta temperatura e radiação ou stresses antropogênicos, como poluição, chuva ácida e orvalho (Lichtenthaler; Lichtenthaler, 2009). As plantas respondem a esses stresses dia-a-dia ou a longo prazo por meio de respostas particulares e mecanismos de adaptação que ajudam de forma eficiente as plantas a sobreviverem.

As plantas apresentam quatro estágios de respostas ao estresse, são eles: a fase de resposta (reação de alarme, na qual suas funções declinam com reação ao estresse), o estágio de resistência e o estágio de exaustão seguida geralmente pela fase de regeneração, na qual as funções fisiológicas são restauradas, uma vez que o estressor é removido. A duração (dias, horas) da fase de regeneração leva a planta a retornar as funções fisiológicas normais dependendo da força, duração e tipo de estresse.

Estresses abióticos como seca, alagamento, salinidade/alcalinidade de solos, altas temperaturas principalmente durante o florescimento e maturação, toxicidade química e estresse oxidativo são sérias ameaças para os vegetais e o ambiente. Sob o contexto de mudanças climáticas, a seca tem sido e está se tornando um grave problema restringindo o crescimento das plantas, a produtividade de ecossistemas terrestres, em várias regiões do mundo particularmente regiões áridas e semiáridas. No contexto de produção, há sempre intervalo de ocorrência de eventos de seca e/ou irrigação, em condições particulares de mudança climática há condições de prever eventos mais frequentes de seca e alagamento. O encharcamento e alagamento do solo são estresses abióticos que influenciam a distribuição e produtividade das espécies em inúmeras comunidades de plantas.

O estresse é causado tanto por fatores abióticos (seca/alagamento, altas/baixas temperaturas, deficiência nutricional, salinidade do solo, alta irradiação, água, radiação, temperatura, gases e minerais), como por estresses bióticos (planta, micro-organismos, animais e origem antropogênica). Quando o estresse é causado por água, pode ser através da falta de água (déficit hídrico), ou por excesso de água (inundação).

No caso de deficiência hídrica pode-se definir como a quantidade de água disponível é menor do que a quantidade necessária para a expressão do seu potencial fisiológico, à medida em que o solo seca, torna-se mais difícil às plantas absorverem água, porque aumenta a retenção e diminui a disponibilidade de água no solo às plantas.

## **RESPOSTAS AOS ESTRESSES AMBIENTAIS E MECANISMOS DE SOBREVIVÊNCIA À SECA**

Com o decorrer dos tempos, as plantas foram submetidas a diversas condições desfavoráveis para seu desenvolvimento, dentre estas a seca pode ser considerada uma das principais condições prejudiciais ao seu crescimento. Para se adaptar e superar períodos de estiagem existem mecanismos, denominados resistência e tolerância à seca. As plantas individuais respondem diretamente a mudanças no ambiente, alterando sua fisiologia ou morfologia para melhorar a sobrevivência e a reprodução. O conceito de estresse está ligado à tolerância, em que a tolerância ao estresse - é a aptidão da planta para enfrentar o ambiente desfavorável (Larcher, 2000).

Antes de definir os mecanismos de sobrevivência à seca, existem dois conceitos que precisam ser definidos: aclimação e adaptação à seca. Uma planta aclimatada tem sua tolerância aumentada como consequência de exposição anterior ao estresse, sendo um processo considerado não hereditário, as quais as mudanças fenotípicas produzidas são em detrimento às variações dos fatores ambientais. Como por exemplo aclimação ao calor, ocorre rapidamente em resposta ao estresse provocado por altas temperaturas, as mudanças para limites de temperatura mais elevadas podem se consumir dentro de horas (Larcher, 2000; Taiz; Zeiger, 2002; 2004). Adaptação, são características adquirida pelas plantas

através dos genes, envolvendo um processo de seleção durante muitas gerações (levando a evolução da espécie).

A adaptação e a aclimatização ao estresse ambiental resultam de eventos integrados que ocorrem em todos os níveis de organização, desde o anatômico e morfológico até o celular, bioquímico e molecular. A murcha de folhas em resposta ao déficit hídrico, por exemplo, reduz a perda de água pela folha e a exposição à luz incidente, diminuindo o estresse pelo calor sobre as folhas. Existem várias estratégias de aclimatização, as quais podem ser divididas em dois grupos: um ligado à adaptação anatomorfológicas e outro de natureza fisiológica (Larcher, 2000).

O mecanismo de resistência a seca, está ligado ao escape ou evite a dessecação, que será retardada por mecanismos que possibilitam que a planta ainda seja capaz de ter um conteúdo hídrico favorável independentemente do solo e do ar estarem secos, onde a planta possui a habilidade de completar seu ciclo antes mesmo de ocorrer a falta de água severa, podendo desenvolver rapidamente seu período fenológico (durante o curto período de chuva) ou ter uma plasticidade em seu desenvolvimento (encurtamento ou prolongação do ciclo, quando ocorre falta de água), sendo capaz de prevenir e evitar esse período de seca.

Assim, os mecanismos de resistências à seca, podem ser de três tipos: "evitar", "tolerar" e "escapar". No "evitar", as plantas fecham os estômatos e aprofundam o sistema radicular para explorar um volume maior de solo, diminuindo o tamanho das células e aumentando o espessamento das paredes celulares e cerosidade da cutícula; O "tolerar" está associado à habilidade da planta em manter o equilíbrio de suas funções fisiológicas em condições de déficit hídrico e o "escapar" ocorre quando a planta antecipa o ciclo de desenvolvimento. A "estratégia de sobrevivência" das plantas em habitats estressantes não é aumentar a produtividade, mas sim equilibrar o rendimento com a sobrevivência (Taiz; Zeiger, 2002).

Organismos considerados suscetíveis a um determinado estresse são aqueles que sofrem alterações excessivas no seu metabolismo, as quais são traduzidas na forma de injúrias mais ou menos importantes. Por outro lado, se o organismo não apresenta sintomas de injúria por estresse, deve ser considerado como resistente.

Plantas suscetíveis são aquelas que não têm a capacidade de detectar a presença do fator de estresse ou de reagir alterando seu sistema hormonal. A falta de sintomas que caracterizam a resistência pode ser devida a presença de mecanismos que evitam o contato com o estresse (evitância) ou de mecanismos que permitem ao organismo reagir diante de sua presença (tolerância). No primeiro caso, o organismo possui barreiras físicas ou químicas que evitam o contato dos tecidos da planta com o fator de estresse, evitando seus efeitos, como por exemplo, cutícula espessa, ceras, entre outros relacionados a ambientes com longos períodos de seca. Porém, existem outros mecanismos de proteção nos quais o fator de estresse entra em contato com os tecidos e a planta deve reagir para superar o estado de tensão. Essa reação é feita mediante o uso de mecanismos que acarretam gasto de energia metabólica, e, portanto,

o organismo deve atingir um equilíbrio com o fator de estresse, é a situação característica de mecanismos de tolerância (Taiz; Zeiger, 2006).

Um exemplo seria a formação de aerênquima nas raízes de milho, em reposta à falta de oxigênio em solos alagados. Além da evitância e da tolerância, que são os tipos mais encontrados, há um terceiro, o escape - este mecanismo baseia-se na falta de coincidência entre o momento de máxima suscetibilidade do tecido com a ocorrência do estresse.

## **ESTRESSE HÍDRICO NO DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS**

As regiões semiáridas são definidas com base no seu Índice de Aridez (IA), que é a relação entre a precipitação e a evaporação, tais regiões apresentam características peculiares devido ao seu clima, com paisagens naturais distintas e heterogêneas. O semiárido brasileiro possui duas condições climáticas bastante definidas: chuvosa e seca. O período chuvoso tem uma curta duração, apenas três meses, e a água proveniente da chuva escorre superficialmente reduzindo ainda mais seu aproveitamento. Já o período de estiagem tem maior duração, que associado a elevadas temperaturas resulta em longos períodos de seca. A água é um recurso essencial para o desenvolvimento do vegetal, uma vez que participa de todos os seus processos metabólicos e sua ausência afeta diversos processos fisiológicos dos vegetais, como declínio na atividade fotossintética, juntamente com a diminuição do volume celular e declínio de sua turgescência (Taiz; Zeiger, 2006).

Os efeitos da seca nas plantas são bastante variáveis, pois dependem da intensidade e velocidade de imposição do estresse, bem como sua fase de desenvolvimento. Tais fatores também são determinantes para que o dano provocado se torne irreversível ao desenvolvimento do vegetal, pois desta forma não é possível o reestabelecimento das funções vitais, até que as condições ambientais se tornem satisfatórias novamente.

A planta atravessa três estágios durante a desidratação, quando esta encontra-se sob deficiência hídrica: 1º estágio a planta mantém sua transpiração como se estivesse bem suprida de água até que a quantidade de água seja reduzida a 50%; 2º estágio, há o fechamento estomático, com isso a transpiração começa a ser menor que o potencial hídrico da planta; e no 3º estágio os estômatos estão completamente fechados. E as plantas têm que desenvolver mecanismos de tolerância como respostas favoráveis, a fim de garantir sua sobrevivência à deficiência hídrica (Taiz; Zeiger, 2004).

Os diversos mecanismos utilizados pelos vegetais sob condições de déficit hídrico são: escape à seca, tolerância à seca com baixo ou alto potencial hídrico. No primeiro mecanismo, o vegetal irá completar todo seu ciclo vital e garantir a continuidade de sua espécie através de um descendente antes do período seco; no segundo mecanismo a planta irá produzir substâncias na tentativa de baixar seu potencial hídrico e garantir que a planta continue a absorver a água presente no solo; e por fim, no último mecanismo, esta tolerância pode se dá pela habilidade da planta em evitar a desidratação, através do

fechamento estomático e como resultado, tem-se prejuízos na fotossíntese, transpiração e condutância estomática.

Plantas expostas à deficiência hídrica moderada geralmente reduzem o crescimento da parte aérea antes que o das raízes. Esse estresse moderado reduz o crescimento foliar antes de reduzir a taxa fotossintética, resultando em excesso de carboidratos para as raízes. Por outro lado, a perda acentuada de água reduz a multiplicação e o alongamento das células, resultando em plantas menores e, em consequência, redução da área foliar. A limitação na área foliar pode ser considerada uma primeira reação das plantas ao déficit hídrico (Taiz; Zeiger, 2004). A área foliar é um importante fator da produção e determina o uso da água pela planta e seu potencial de produtividade é reduzido quando exposta ao déficit hídrico.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Tendo em vista as mudanças climáticas e os seus efeitos na disponibilidade hídrica, que pode limitar a produção vegetal, torna-se essencial discutir e evidenciar os mecanismos fisiológicos da planta em situações de déficit hídrico, com o intuito de propor métodos de manejo que possam minimizar os efeitos deste tipo de estresse e aumentar o desfrute do potencial genético das culturas agrícolas.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**


- Larcher, W. (1995). *Physiological Plant Ecology*. Springer. Berlin. 506 pp..
- Larcher, W. (2000). O ambiente e as plantas. In: *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos - SP: Rima. 531p.
- Lichtenthaler, U., & Lichtenthaler, E. (2009). A capability-based framework for open innovation: complementing absorptive capacity. *Journal of Management Studies*, v.8, n.46.
- Taiz, L.; & Zeiger, E. (2002). *Plant physiology*. 3.ed. Sunderland: Sinauer Associates, p.423-460.
- Taiz, L.; & Zeiger, E. (2004). *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed, p.449-484.
- Taiz, L.; & Zeiger, E. (2006). *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed, 719p.




# Modelagem volumétrica de um plantio de candeia a partir de imagens RapidEye

Recebido em: 16/10/2022

Aceito em: 17/10/2022


 10.46420/9786581460655cap3

João Paulo Simões Branquinho<sup>1</sup> 

Mônica Canaan Carvalho<sup>2</sup> 

Thiza Falqueto Altoé<sup>3</sup> 

Luciano Cavalcante de Jesus França<sup>\*4</sup> 

Fausto Weimar Acerbi Júnior<sup>5</sup> 

## INTRODUÇÃO

A candeia – *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish – é uma espécie florestal típica de áreas de elevada altitude (acima de 900 m), com ocorrência entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado (Loeuille, 2015). Sua madeira possui um óleo essencial que lhe confere múltiplos usos como a produção de moirões e lenha devido à sua alta durabilidade e inflamabilidade. Seu óleo essencial que tem como principal princípio ativo o alfa-bisabolol (Santos et al., 2019), é muito utilizado pelas indústrias de cosméticos e de medicamentos devido suas propriedades antiflogísticas, antibacterianas, dermatológicas e espasmódicas (Scolforo et al., 2016), aumentando assim a procura por essa espécie.

No entanto, as espécies arbóreas de *Eremanthus erythropappus* são exploradas há décadas para diversos fins comerciais, como a produção de madeira para extração química e carvão (Pádua et al., 2016). A extração da madeira e do óleo da Candeia ainda se concentra na exploração de populações nativas, denominadas candeais (Clark et al., 2011; Donadelli, 2012), sem que haja uma preocupação com o plantio de novas áreas. Esses novos plantios vêm sendo recomendado por diversos autores nos últimos anos (Silva et al., 2014; Scolforo et al., 2016a, 2016b), que também destacam a carência de dados e, portanto, a necessidade do desenvolvimento de modelos de crescimento e produção para a espécie *Eremanthus erythropappus*.

O uso de modelos matemáticos na estimativa do volume de uma floresta serve como base e critério para o manejo sustentável. Modelos volumétricos tradicionais empregam como variáveis independentes exclusivamente as variáveis obtidas em campo, como diâmetro e altura. Contudo, essas medições em campo demandam muitos recursos principalmente em grandes áreas ou áreas distantes e pouco acessíveis, o que leva a um aumento considerável dos custos (Alves et al., 2013). Como forma de minimizar esses custos sem perda de precisão nas estimativas da produção florestal, as técnicas de

---

<sup>1,2,3,5</sup> Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras – UFLA.

<sup>4</sup> Instituto de Ciências Agrárias – ICIAG, Universidade Federal de Uberlândia – UFU.

\* Autor(a) correspondente: luciano.franca@ufu.br

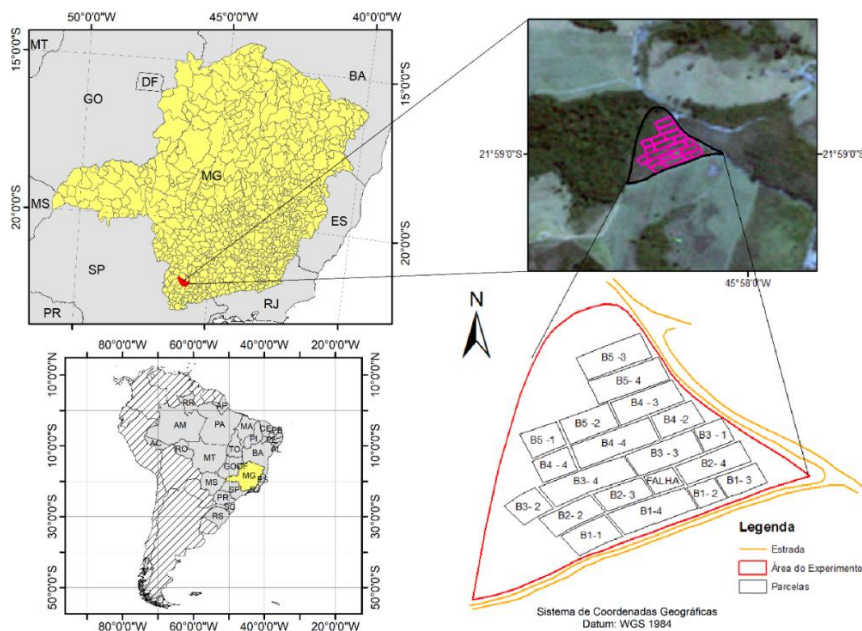
processamento e extração de dados de imagens de sensoriamento remoto (SR), como os índices de vegetação, vêm sendo cada vez mais aplicadas na estimativa volumétrica de uma determinada área (Oliveira et al., 2014; Barros et al., 2015; Reis et al., 2018a; Reis et al., 2018b; Reis et al., 2018c).

Desta forma, para a espécie *Eremanthus erythropappus* ainda não existem estudos voltados a esse tema, gerando significativas lacunas no entendimento de quais variáveis ou índices espectrais podem auxiliar na estimativa e espacialização do volume. Assim, esse estudo teve como objetivo desenvolver um modelo matemático, integrando dados espectrais aos dados de campo para estimar o volume de um plantio de *Eremanthus erythropappus*, bem como espacializar essa informação para toda a área de estudo.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Caracterização da área do estudo

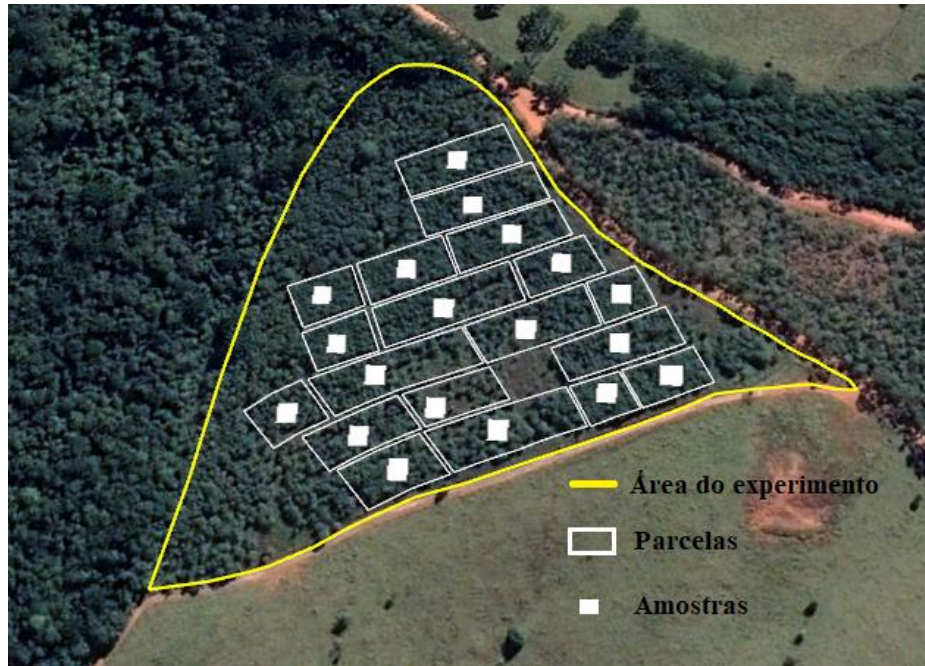
A área de estudo é um plantio experimental de Candeia com 2,49 ha, plantado em 2004 no município de São João da Mata, sul do estado de Minas Gerais, nas coordenadas 21° 58' 59" S e 45° 58' 11" O (Figura 1). A região possui clima Tropical de Altitude, do tipo Cwa de Köppen, com elevação aproximada de 1.350 m, temperaturas moderadas e verões quentes e chuvosos, apresentando temperatura média anual de 23°C e precipitação média anual de 1.605 mm.



**Figura 1.** Localização do experimento em São João da Mata (MG), com a distribuição espacial das parcelas. Fonte: os autores.

O experimento consiste em quatro tratamentos com diferentes espaçamentos: Tratamento 1 = Espaçamento (2,0 x 1,0 m); Tratamento 2 = Espaçamento (2,0 x 1,5 m); Tratamento 3 = Espaçamento (2,0 x 2,0 m) e; Tratamento 4 = Espaçamento (2,0 x 2,5 m), onde cada tratamento repete-se cinco vezes (cinco blocos) (Figura 2). Destaca-se que, ao longo do experimento foram tomados os cuidados

necessários para o bom desenvolvimento das árvores com a eliminação da mato-competição.



**Figura 2.** Imagem da área de experimento com distribuição das parcelas e amostras. Fonte: os autores

Na região central do experimento, existe uma falha de plantio ocasionando a exclusão da parcela B2-1 na amostragem, devido à pouca quantidade de árvore nesta parcela, logo serão utilizadas 19 das 20 parcelas. As parcelas possuem um tamanho médio de 864m<sup>2</sup>, as amostras contendo 4 pixels foram coletadas em regiões centrais das parcelas ou áreas livres de clareiras ou falhas, para maior qualidade da amostragem.

### *Estimativa do volume de madeira na área de experimento*

Foi realizado um censo na área do experimento em 2014 onde a circunferência a 1,30 m do solo (CAP) de cada indivíduo dentro da parcela foi mensurada. Em seguida, os valores de CAP foram transformados em diâmetro equivalente (DAPEq), utilizando-se a Equação 1. O DAPEq indica o diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) que produziria a mesma área seccional que o somatório das áreas seccionais dos vários fustes existentes na árvore bifurcada.

$$DAPEq = \sqrt{\frac{(CAP1^2 + CAP2^2 + \dots + CAPn^2)}{\pi}} \quad (\text{Eq.1})$$

Em que: DAPEq representa o diâmetro que produz a mesma área seccional que o somatório dos vários fustes; CAP<sub>n</sub> representa a circunferência medida a 1,30m do solo do i-ésimo fuste;  $\pi$  é uma constante dada pela relação entre o perímetro de uma circunferência e seu diâmetro.

A altura total dos indivíduos foi obtida com uso de vara telescópica graduada em centímetros (cm). Para o caso das árvores bifurcadas, foi atribuída como valor único de altura para aquele indivíduo sua altura máxima entre todos os fustes que tiveram seus diâmetros mensurados naquela árvore.

No cálculo do volume total de cada árvore foi utilizado a Equação 2 proposta por Scolforo (2008), para estimativa do volume de árvores de candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish) com casca para a região de Aiuruoca (MG), esta equação possui bons valores de R<sup>2</sup> ajustado e Syx, respectivamente de 98,18% e 21,93%. A equação utilizada é apresentada a seguir:

$$\ln(VT) = -10,069537 + 1,010656 * \ln(DAP^2 * HT) \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que: DAP é o diâmetro medido a 1,30m do solo; HT é a altura total da árvore; Ln é logaritmo neperiano.

Após realizado o cálculo do volume individual foi calculado o volume total de cada parcela e, posteriormente, extrapolado para (m<sup>3</sup>/ha). As falhas encontradas na área como árvores doentes, quedas, foram notificadas e retiradas no cálculo de volume das parcelas.

### ***Cálculo dos índices de vegetação***

Foram calculados 6 (seis) Índices de Vegetação (IV) com base nas reflectâncias das bandas individuais das imagens RapidEye. A imagem foi adquirida no banco de dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA) através da Universidade Federal de Lavras (UFLA), disponibilizadas com as devidas correções geométricas e radiométricas, já as correções atmosféricas foram realizadas no módulo FLAASH (ENVI 5.1).

A imagem foi adquirida em 3 de agosto de 2014 (data próxima à realização do censo), com resolução espacial de 5m e resolução espectral de 5 bandas, sendo Banda 1 – Azul (440-510nm); Banda 2 – Verde (520-590nm); Banda 3 – Vermelho (630-685nm); Banda 4 – RedEdge (690-730nm) e Banda 5 – Infravermelho Próximo (760-850nm).

A Tabela 1 apresenta os índices utilizados como variáveis independentes na modelagem. A escolha de cada índice baseou-se na literatura, selecionando aqueles que apresentaram bons resultados nas estimativas de volumes, facilitando assim a comparação com outros estudos (Lu, 2004; Reis et al., 2018).

**Tabela 1.** Índices de Vegetação (IV) utilizados na caracterização espectral do plantio de candeia. Fonte: os autores.

IV	Fórmula	Referência
NDVI	$NDVI = \frac{\rho Nir - \rho Red}{\rho Nir + \rho Red}$	Rouse et al. (1973)
ND54	$ND54 = \frac{\rho Nir - \rho 4}{\rho Nir + \rho 4}$	Huete (2002)
ND43	$ND43 = \frac{\rho 4 - \rho Red}{\rho 4 + \rho Red}$	Huete (2002)
RVI	$RVI = \frac{\rho Nir}{\rho Red}$	Jordan (1969)
SAVI	$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho Nir - \rho Red)}{(L + \rho Nir + \rho Red)}$	Huete et al. (1988)
EVI	$EVI = 2,5 \left( \frac{\rho Nir - \rho Red}{\rho Nir + 6 * \rho Red - 7,5 * \rho Blue + 1} \right)$	Huete et al. (1998)

**Em que:** ND = *Normalized Difference*; NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*; SAVI = *Soil-Adjusted Vegetation Index* (L= 0,5); EVI = *Enhanced Vegetation Index*; RVI = *Relative Vegetation Index*.

### **Análise exploratória dos dados**

Baseado nos valores dos 4 pixels que compõem a amostra de cada parcela do experimento foram calculados seis índices de vegetação (NDVI; ND54; ND43; RVI; SAVI; EVI). A partir destes valores foi possível extrair medidas de posição e dispersão destes índices (Média; Valores máximo e mínimo; Amplitude; Desvio Padrão) bem como das bandas B3, B4 e B5, em relação a parcela estudada. As medidas de dispersão e posição das variáveis de SR foram extraídas no *software* ArcGis10.3 (ESRI) e integradas aos dados de volume (m<sup>3</sup>) por parcela.

As médias das bandas e dos de índices de vegetação encontradas em todas as parcelas foram posteriormente utilizadas para o cálculo da correlação linear com o volume matriz de correlação, com o intuito de facilitar o entendimento das correlações, realizaram-se a plotagem de gráficos de dispersão e frequência entre as variáveis dendrométricas e as variáveis espectrais.

### **Processo de modelagem**

Para a modelagem do volume (m<sup>3</sup>/ha) empregou-se a regressão linear múltipla com o método de eliminação de variáveis Stepwise em conjunto com o Critério de Seleção de Akaike (AIC), onde foram selecionadas somente os índices de vegetação e bandas da imagem Rapideye que mais contribuíram para explicar o comportamento da variável dependente volume. O método de eliminação Stepwise foi do tipo Forward, executado no programa estatístico RStudio (R Core Team, 2017). Esse procedimento (Forward) parte da suposição de que não há variável no modelo, apenas o intercepto. A ideia do método é adicionar

uma variável de cada vez, onde a primeira variável selecionada é aquela com maior correlação com a resposta.

Foi calculada a estatística F nas variáveis independentes para testar sua significância no modelo. As variáveis que entram no modelo possuem a estatística F maior do que o ponto crítico, chamado de F inicial. O processo é repetido, ou seja, a variável com maior correlação parcial com volume ( $m^3/ha$ ) é adicionada no modelo se sua estatística F parcial for maior que F inicial, até que não seja incluída mais nenhuma variável explicativa no modelo.

Outro método possível de geração de modelos e através da técnica Backward, porém este método se mostrou, neste experimento, ineficaz já que o número de amostras reduzido gerou resíduos muito altos, impossibilitando a incorporação das variáveis e montagem do modelo inicial. Foi realizado o teste de VIF (Montgomery et al., 2006) para avaliar a existência de multicolinearidade e eliminação das variáveis inflacionadas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### *Análise da correlação entre índices de vegetação e volume*

Em geral as bandas isoladas não apresentaram boa correlação com volume (Quadro 1), já que elas estão vulneráveis a interferências e distorções e acabam não acompanhando bem o perfil do plantio ou floresta, assim os índices de vegetação servem como moderadores e atenuam as variações nas refletâncias ocorridas.

Os índices de vegetação normalizados apresentaram alta correlação com volume a qual é justificada em função de sua composição utilizar-se às bandas espectrais na região do espectro eletromagnético do vermelho ao infravermelho próximo, sendo respectivamente uma região de forte absorção e de máxima reflectância (Watzlawick, 2003). Os volumes nas parcelas variaram bastante, tendo um coeficiente de variação (CV) de 33,13% valor justificado devido as características do plantio com materiais genéticos diferentes, padrão de crescimento da espécie e disponibilidade de nutrientes no solo.

**Quadro 1.** Coeficiente de correlação linear de Pearson ( $r$ ) entre o volume de madeira ( $m^3/ha$ ) de um plantio de candeia e os valores de reflectância das bandas e índices de vegetação. Fonte: os autores.

NDVI	Corr. (r)	ND54	Corr. (r)	Banda 5	Corr. (r)
Médio	0,6843	Médio	0,6294	Médio	0,1555
Mínimo	0,5688	Mínimo	0,4722	Mínimo	-0,2271
Máximo	0,6791	Máximo	0,5529	Máximo	0,1696
Amplitude	-0,0981	Amplitude	-0,0435	Amplitude	0,4148
Desvio padrão	-0,2100	Desvio padrão	-0,0119	Desvio padrão	0,2674

<b>ND43</b>	<b>Corr. (r)</b>	<b>RVI</b>	<b>Corr. (r)</b>	<b>Banda 4</b>	<b>Corr. (r)</b>
Médio	0,7306	Médio	0,7212	Médio	-0,5680
Mínimo	0,6275	Mínimo	0,6003	Mínimo	-0,5770
Máximo	0,5204	Máximo	0,7100	Máximo	-0,4749
Amplitude	-0,1584	Amplitude	-0,1800	Amplitude	-0,1327
Desvio padrão	-0,2372	Desvio padrão	0,1139	Desvio padrão	-0,2189
<b>SAVI</b>	<b>Corr. (r)</b>	<b>EVI</b>	<b>Corr. (r)</b>	<b>Banda 3</b>	<b>Corr. (r)</b>
Médio	0,6843	Médio	0,6461	Médio	-0,6633
Mínimo	0,5688	Mínimo	0,4525	Mínimo	-0,5073
Máximo	0,6791	Máximo	0,6208	Máximo	-0,4271
Amplitude	-0,0981	Amplitude	0,0983	Amplitude	-0,2393
Desvio padrão	-0,2100	Desvio padrão	-0,0228	Desvio padrão	-0,3180

Em geral os valores médios dos índices de vegetação e das bandas foram os que se correlacionaram melhor com o volume, já que representam a variabilidade espacial dos pixels presentes na amostra, sendo o ND43 médio ( $r = 0,73$ ) e RVI médio ( $r = 0,72$ ) com maiores correlações, já o desvio padrão se mostrou com baixos valores onde Banda 3 ( $r = -0,31$ ) e ND43 ( $r = -0,23$ ).

A banda 5 foi a única a obter valores positivos de correlação, já que sua faixa de comprimento de onda apresenta altas taxas de reflectância para a vegetação e acabam por captar melhor as variações ao longo da área de plantio. Em estudo realizado por Alba (2016), ao analisar as bandas espectrais em um plantio adulto de eucalipto, observou-se que a banda do infravermelho foi a que melhor se correlacionou com a variável florestal volume, apresentando  $r$  no valor de 0,6802.

Tendo como base esses resultados, foi realizado um gráfico (Figura 3) apenas com os valores médios de cada índice que apresentaram forte correlação com o volume ou fizeram parte do modelo final. O NDVI apresentou alta correlação com volume, no trabalho de Berra et al. (2012) foi encontrado o valor de correlação de 0,79 entre NDVI e volume de eucalipto. O SAVI apresentou boa correlação  $r = 0,68$ , resultado semelhante ao trabalho de Alba (2016) onde a variável florestal em plantio de eucalipto adulto apresentou um coeficiente ( $r$ ) no índice SAVI de 0,7063.

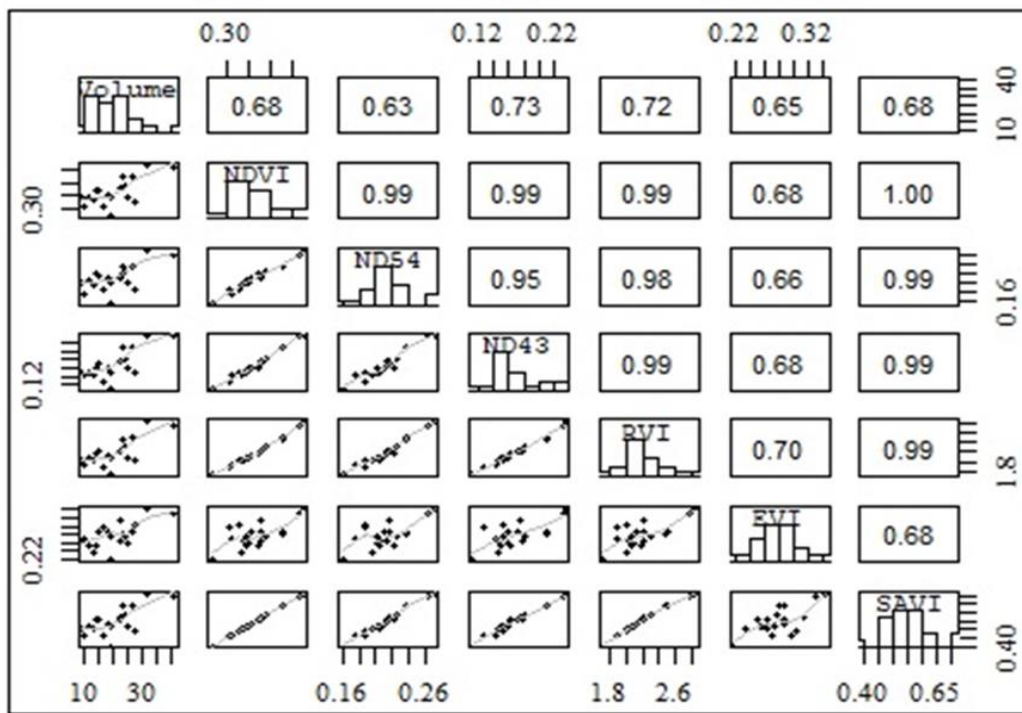
Fernandes et al. (2011), utilizando imagens AVNIR-2 do sensor ALOS para estimar parâmetros biofísicos em plantações de eucaliptos, encontraram correlações positivas entre o volume de madeira com NDVI ( $r=0,15$ ) e com RVI ( $r=0,16$ ). Os valores embora menores que os encontrados neste trabalho reforçam uma correlação positiva entre as variáveis.

O ND54 apresentou boa correlação  $r = 0,63$ , porém menor valor em relação aos outros índices normalizados, resultado justificado pelo fato da utilização da banda RedEdge no lugar da banda (3)

vermelha, onde a RedEdge por ser uma banda de transição entre a alta absorção e alta reflectância, tornou o índice pouco sensível a captação das variações do perfil do dossel.

O ND43 apresentou a maior correlação 0,73 se comparado a outros índices normalizados, o perfil do plantio com alto volume de folhas e presença de flores possibilitou uma alta variação na reflectância dentro da faixa da banda RedEdge. Segundo Gitelson (2005) a banda RedEdge é mais sensível as variações no teor de clorofila captando melhor a reflectância e transmitância, possibilitando que árvores de maior volume que apresentam copa mais densas sejam diferenciadas das com menor volume.

O EVI apresentou boa correlação  $r = 0,65$  com volume, valor já esperado por ser um índice que minimiza os efeitos de resposta do solo e atmosfera, como também apresenta alta resposta a variações fenológicas. O EVI é muito utilizado no estudo das variações de perfil e densidade de vegetação (Huete et al. 2002). Segundo Justice et al. (1998) o EVI também é utilizado na avaliação do vigor da vegetação, pois está diretamente relacionado com variações ocorridas na cobertura verde.



**Figura 3.** Matriz com o histograma de frequência (na diagonal), gráficos de dispersão e valor de correlação entre as variáveis volume(m³/ha) e índices de vegetação. Fonte: os autores.

### Ajuste de modelo pelo método *Stepwise Forward*

O método *Stepwise* foi eficiente para alcançar os objetivos propostos no trabalho. Em seu trabalho Rosot (1989) ressaltou que quando todas as variáveis, inclusive aquelas de baixa correlação linear simples com a variável dependente, foram usadas no procedimento *Stepwise* foram obtidas as melhores equações no que se refere aos indicadores de ajuste e precisão.



**Tabela 3.** Valores de saída e AIC para método *Stepwise Forward* até montagem do modelo final. Fonte: os autores.

Modelo	Start/Step	Variável	AIC
Volume $\sim \beta_0$	79,41	ND43	66,92
Volume $\sim \beta_0 + \text{ND43}$	66,92	SAVI	65,97
Volume $\sim \beta_0 + \text{ND43} + \text{SAVI}$	65,97	ND54	63,72
Volume $\sim \beta_0 + \text{ND43} + \text{SAVI} + \text{ND54}$	63,73	Modelo Final	x

Na Tabela 3 ilustra-se o processo regressão linear múltipla via *stepwise* onde o modelo inicia-se apenas com  $B_0$  e um valor inicial de AIC. Após o programa ter realizado regressões com todas as variáveis independentes o ND43 apresentou menor AIC dentre as variáveis candidatas escolhidas pelo *stepwise* para compor o  $B_1$ , após uma nova regressão com todas as variáveis restantes o SAVI apresentou menor AIC para compor  $B_2$  até que após a inclusão do ND54 não houve mais variáveis significativas.

Foram realizados testes de multicolinearidade através da técnica VIF após a montagem do modelo final, o valor de referência adotado foi  $\text{VIF} < 10$ , um valor muito utilizado em trabalhos e comprovadamente seguro para eliminar os efeitos de multicolinearidade. Os valores obtidos após os testes encontram-se na Tabela 4.

Os valores do modelo inicial estão bem acima do valor referência, isso é bem comum quando se usa apenas índices de vegetação como variáveis, já que todos os índices são compostos pelas mesmas bandas e acabam tendo alta correlação entre si.

**Tabela 4.** Modelo inicial selecionado através do método *Stepwise Forward* e final após teste VIF. Fonte: os autores.

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$R^2_{aj.}$	Syx%
Parâmetro	64,35	2229,64	-1539,14	1952,3	0,6168	25,54
Variável	--	ND43 méd	SAVI méd	ND54 méd	--	--
VIF	--	719,5762	2519,2619	594,6932	--	--
Parâmetro	7,907	331,976	-203,335*	--	0,5292	28,3
Variável	--	ND43 méd	ND54 méd	--	--	--
VIF	--	10,7905	10,7905	--	--	--
Parâmetro	-8,174	171,509	--	--	0,5064	29,03
Variável	--	ND43 méd	--	--	--	--

Em que:  $V = \text{m}^3/\text{ha}$ ; SAVI=Soil-Adjusted Vegetation Index ( $L = 0,5$ ); ND54.Normalized Difference B4-B5; ND43 Normalized Difference B4-B3. (valores médios dos índices). \* ND54 não foi estatisticamente significativo.

O modelo inicial apresentou alta multicolinearidade, a retirada das variáveis que estavam inflacionando o modelo ajudou a diminuir este efeito. Após cada teste com VIF foi sendo realizada a remoção das variáveis com maiores valores de multicolinearidade resultando em apenas uma variável. A equação 3 apresenta o modelo final:

$$V \left( \frac{m^3}{ha} \right) = -8,174 + 171,509 * ND43médio \quad (Eq.3)$$

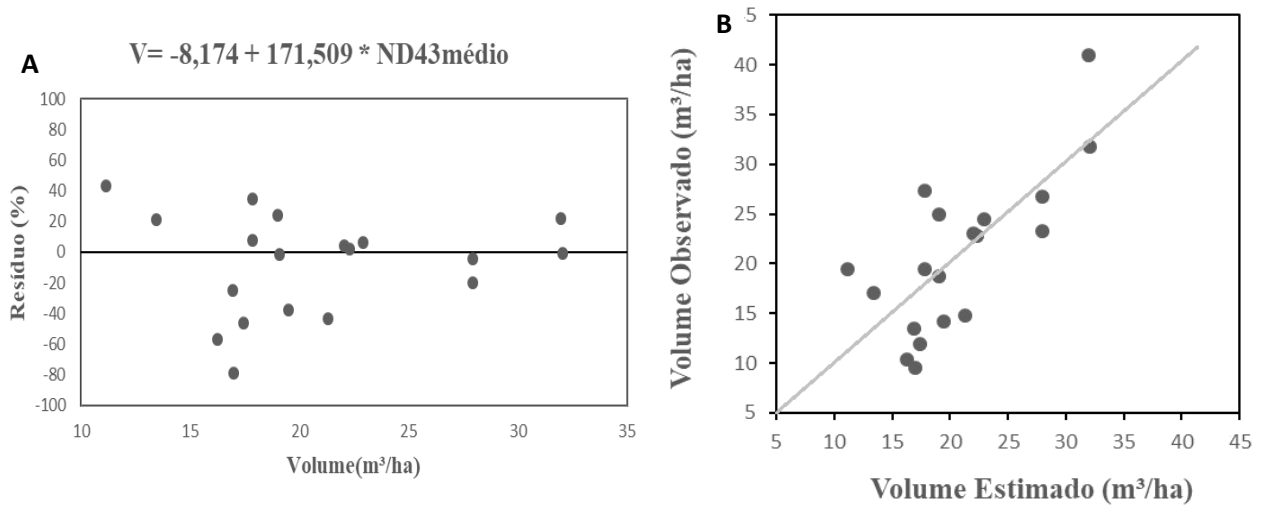
O modelo final representado pela equação (3) apresentou valores  $R^2_{aj}$  (%) de 50,64 e  $Syx\%$  29,03 mostrando baixa capacidade das variáveis IV em estimar o volume. Isso pode ser explicado devido a pequena área de estudo e ao plantio com perfil heterogêneo, apresentando ampla variação do volume entre as parcelas. A grande variabilidade de material genético (sem melhoramento, via semente) e a variação no espaçamento do plantio aproximou os valores encontrados de  $R^2_{aj}$  e  $Syx$  a trabalhos com uso de índices de vegetação para modelagem volumétrica de florestas tropicais. No trabalho de Machado et al. (2017) com fragmentos de florestas tropicais, foram encontrados valores de  $R^2_{aj}$  entre 0,16 e 0,45 e  $Syx$  (%) entre 8 e 15%. No trabalho de Silva (2012) na estimativa de estoque de madeira em Cerrado *sensu strictu* com uso de índices de vegetação, encontrou em seu ajuste de modelo  $R^2$  de 0,20 e um erro de 144,59%, sendo justificado pela alta heterogeneidade da área amostrada e árvores com alturas e diâmetros muito diferentes. Condições semelhantes encontradas na área de plantio utilizada neste trabalho.

Macedo et al. (2017) trabalhando com imagens de alta resolução espacial na estimativa de volume de eucalipto encontrou em seus modelos ajustados utilizando como variáveis NDVI; SAVI; SR e EVI valores de  $R^2_{aj}$  entre 0,53 a 0,70 mostrando que a homogeneidade nos plantios ajuda nas estimativas dos modelos ajustados.

Os valores de resíduos foram muitos altos, tanto para positivo quanto para negativo, variando entre -80% a 40%. Isso mostra que a variação nos índices de vegetação não captou bem a variação de volume devido a heterogeneidade na área de plantio, materiais genéticos distintos e utilização de diferentes espaçamentos de plantios (Figura 4 A-B).

No trabalho de Leal et al. (2013) na estimativa de volume de eucalipto utilizando imagens Rapideye encontrou padrões de resíduo entre -20% a 20% dispersos de forma semelhante, mostrando que a heterogeneidade nas parcelas com espaçamentos distintos e muita variação de volume elevam o erro.

O padrão de dispersão dos resíduos caracteriza uma heterocedasticidade, demonstrando que a variância não foi constante ao longo da variação do volume, fato que comprova que uma maior amostragem ou a inclusão de outras variáveis obtidas em campo é necessária para melhorar a capacidade de predição do modelo ajustado (Figura 4).



**Figura 4.** (A) Gráfico de dispersão de resíduo para volume estimado; (B) Dispersão dos valores estimados pela equação. Fonte: os autores.

A análise de variância apresentada na Tabela 5 mostrou que as variações nos volumes das parcelas não são explicadas pela variação nos espaçamentos de plantio, sendo possível o material genético utilizado, o sucesso das mudas, e condições do solo, fatores decisivos para um maior ou menor volume de madeira alcançado. O tratamento 01 (2,0 x 1,0m) possui o maior adensamento de árvores e maior média de volume  $m^3$  e  $m^3/ha$ , provavelmente o ganho de volume individual das árvores em espaçamentos maiores não seja suficiente para produzir em uma área maior volume de madeira.

**Tabela 5.** Análise de variância para volume de madeira  $m^3/ha$  nos quatro espaçamentos. Fonte: os autores.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	valor-P	F crítico
Tratamento	94,7345	3	31,5782	0,48468	0,69763	3,23887
Resíduo	1042,44	16	65,1526	--	--	--
Total	1137,18	19	--	--	--	--

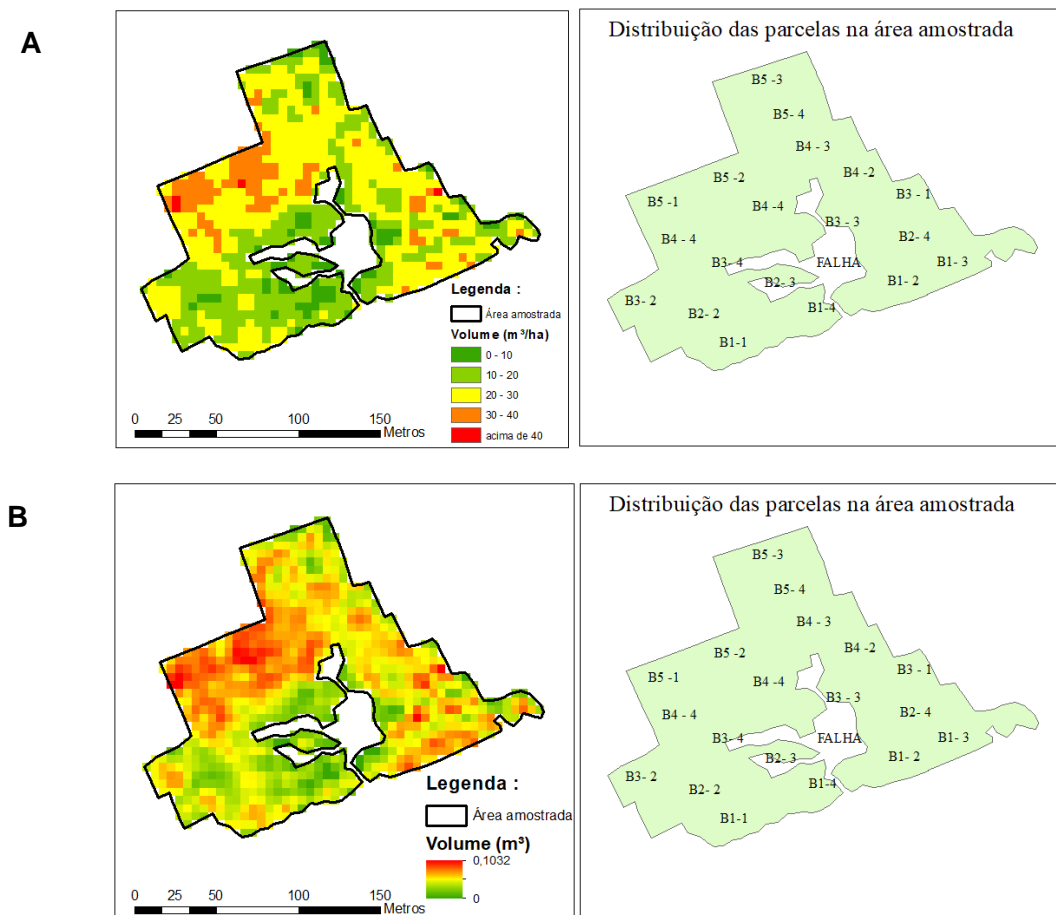
A análise de variância apresentada na Tabela 6 mostrou que as variações no índice ND43 das parcelas não são explicadas apenas pela variação nos espaçamentos de plantio, sendo possível que o perfil de dossel e forma da copa, conforme se varia volume e espaçamentos, sejam responsáveis pela variação desse índice.

**Tabela 6.** Análise de variância para índice ND43 em quatro espaçamentos. Fonte: os autores.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	Fc	Valor P	F crítico
<b>Tratamento</b>	0,00452	3	0,00151	1,49046	0,25499	3,23887
<b>Resíduo</b>	0,01619	16	0,00101	--	--	--
<b>Total</b>	0,02072	19	--	--	--	--

Os mapas da Figura 5 representam a espacialização do volume em cada pixel  $m^3/ha$  e  $m^3$ , respectivamente, segundo o modelo ajustado, apenas nas regiões livre de falhas no interior das parcelas e nas bordas. Os maiores valores de volumes estimados pela equação ajustada (3), mostrados nos mapas, localizam-se nas parcelas B5-2 e B5-1, e estão condizentes com os valores estimados pelo inventário através da equação (3) de Scolforo (2008).

No Figura 5.A foi possível observar falhas, onde o volume aparece próximo de 0 e baixo volume na área central do experimento e pontos de clareiras, resultados condizentes com as informações encontradas no inventário. O padrão de distribuição dos volumes está bem fiel ao volume obtido pelas informações do inventário, onde todas as parcelas ficaram dentro da mesma classe volumétrica.



**Figura 5.** (A) Mapa da espacialização do volume  $m^3$  na área amostrada estimado pela modelo equação em  $m^3/há$ ; (B) Mapa da espacialização do volume  $m^3$  na área amostrada estimado pela modelo equação em  $m^3$ .

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados da pesquisa notou-se que entre os parâmetros avaliados em cada variável, os valores de índice médio se correlacionaram melhor com volume e acabaram por representarem melhor a variabilidade espacial deste dentro da parcela. A banda RedEdge apresentou maior sensibilidade em captar a variação volumétrica frente o infravermelho próximo. O modelo final acabou por apresentar apenas uma variável, já que devido aos índices serem derivados das mesmas bandas e suas correlações serem altas o efeito da multicolinearidade foi alto resultando em um modelo mais simples. O modelo apresentou boas estimativas em  $R^2$ aj 0,51 e alto  $Syx$  29,03%, comparado a outros trabalhos que utilizaram somente índices de vegetação como variáveis independentes para estimativa de volume. O mapa gerado pelo modelo conseguiu ser bem preciso na especialização do volume, sendo uma ótima base de informações que poderão auxiliar no estudo de tendências de produção, estimativa de volume, comportamento do plantio e sua distribuição.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alba, E. (2016). Caracterização espectral dos dosséis e estimativa de variável biofísica em plantios de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* a partir de imagens Landsat 8/OLI. 2016. p. 71- 73. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Alves, M. V. G. et al. (2013). Aplicação de *k-nearest neighbor* em imagens multiespectrais para a estimativa de parâmetros florestais. Revista Floresta. Curitiba, PR, v. 43, n. 3, p. 351-362. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v43i3.18083>
- Asrar, G. et al. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. Agronomy Journal. v.76, n. 2, 301. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020029x>
- Barros, B. S. X. et al. (2015). Uso de imagens de satélite para cálculo de volume em floresta de eucalipto no município de Botucatu/SP. Revista Energia na Agricultura, v. 30, n.1, p. 60-67. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n1p60-67>
- Berra, E. F. et al. (2012). Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. Ciência Florestal, v. 22, n. 4, p. 853-864. <https://doi.org/10.5902/198050987566>
- Clark A. et al. (2011). Promoting Sustainability in the Value Chain of Natural Bisabolol, a Brazilian Rainforest Product. New York: Columbia University. <https://www.sipa.columbia.edu/file/3128/download?token=v2i2ABRt>
- Donadelli, F. M. M. (2012). Motivações e resultados da certificação florestal: um estudo de caso cadeia de valor da candeia. Ambiente & Sociedade, v. 15, n. 3, p. 97-121. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2012000300007>

- Felix, I. M. et al. (2009). Rapideye: a nova geração de satélite de observação da Terra. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV. 2009, São José dos Campos, SP. Anais. São José dos Campos: INPE. 7620 p.
- Gao, X. et al. (2000). Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination. *Remote Sensing of Environment*, n.74. 610 p. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00150-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00150-4)
- Gilbert, M. A. (2002). A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. Valencia, v.82. 303 p. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00048-2)
- Gitelson, A. A. et al. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*. University of Nebraska, Lincoln, vol. 32. p.1-4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Huete, A. et al. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, n. 83, p. 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huete, A. R. (1988). Adjusting vegetation indices for soil influences. *International Agrophysics*, v.4, n.4, p. 367-376.
- Justice, C. O. et al. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36, n. 4, p.1228-1247. <https://doi.org/10.1109/36.701075>
- Leal, F. A. (2013). Técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística aplicadas em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake para estimativa de volume. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- Loeuille, B. (2015). *Eremanthus*. Lista de Espécies da Flora do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB5315>>. Acesso em 18 de julho de 2019.
- Lu, D. et al. (2004). Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 198, p. 149-167, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.048>
- Macedo, F. L. (2017). Estimativa do volume de madeira para *Eucalyptus* sp. com imagens de satélite de alta resolução espacial. *Scientia Florestalis*, Piracicaba, v. 45, n. 144, p. 237-247. <https://doi.org/dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n144.01>
- Machado, I. E. S. et al. (2017). Modelos para estimativa de variáveis florestais com a utilização de imagens multiespectrais. *Brazilian Journal of Forestry Research*. v.37, n.90, p.172. <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.90.1380>
- Montgomery, D. C. et al. (2006). Introduction to linear regression analysis. John, Wiley and Sons: New York, 612p.

- Oliveira, L.T. et al. (2014). Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.49, n.9, p. 692-699. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014000900005>
- Pádua, J. A. P. R. et al. (2016). Spatial genetic structure in natural populatins of the overexploited tree *Eremanthus erythropappus* (DC) macleish (Asteraceae). *Biochemical Systematics and Ecology*, v. 66, p. 307-311. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2016.04.015>
- Ponzoni, F. J., & Shimabukuro, Y. E. (2009). Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. Embrapa Semiárido. São José dos Campos, Parêntese, 127 p.
- R Development Core Team. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2017.
- Reis, A. A. et al. (2018). Volume estimation in a Eucalyptus plantation using multi-source remote sensing and digital terrain data: a case study in Minas Gerais State, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, Basingstoke. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1530808>
- Reis, A. A. et al. (2018a). Spatial prediction of basal area and volume in *Eucalyptus* stands using Landsat TM data: an assessment of prediction methods. *New Zealand Journal of Forestry Science*, v.48, n.1, p.2-17. <https://doi.org/10.1186/s40490-017-0108-0>
- Reis, A. A. et al. (2018c). Relationship between spectral data and dendrometric variables in *Eucalyptus* sp. Stands. *Floresta e Ambiente*, v. 25, n.2, p. 2-8. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.017015>
- Rosot, M. A. D. (1989). Estudo comparativo de métodos para a avaliação volumétrica por unidade de área em um povoamento de Pinus taeda L. Curitiba. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- Rouse, J. W. et al. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third ERTS Symposium Proceedings, v.1. 1973, Washignton, DC: NASA. p. 309-317. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- Santos, K. A. et al. (2019). Pressurized liquid and ultrasound-assisted extraction of a-bisabolol from candeia (*Eremanthus erythropappus*) wood. *Industrial Crops & Products*, v. 130, p. 428-435. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.013>
- Scolforo, H. F. et al. (2016a). Autoregressive spatial analysis and individual tree modeling as strategies for the management of *Eremanthus erythropappus*. *Journal of Forestry Research*, v. 27, n. 3, p. 595-603. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0185-y>
- Scolforo, J. R. S. et al. (2008). Inventário florestal de Minas Gerais: Equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes fisionomias da flora nativa. Lavras: Editora UFPA.
- Scolforo, J. R. S. et al. (2016b). Management strategies of *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish under different initial spacing. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, n. 3, p. 298-304, 2016b. <https://doi.org/10.1590/1413-70542016403042715>

Silva, C. S. J. et al. (2012). Economic feasibility and rotation age for stands of Candeia (*Eremanthus erythropappus*). CERNE, Lavras, v. 18, n.4, p. 695-706. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000400020>


Silva, C. S. J. et al. (2014). Viabilidade econômica e rotação florestal de plantios de Candeia (*Eremanthus erythropappus*) em condição de risco. CERNE, v. 20, n. 1, p. 113-122. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602014000100015>



# Escarificación química y mecánica de semillas *Parkinsonia aculeata* L. SP.Pl. y su efecto en la absorción de agua y germinación


Recibida em: 29/10/2022

Aprobado em: 03/11/2022


 10.46420/9786581460655cap4

Leandris Argentel-Martínez<sup>1\*</sup> 

Ofelda Peñuelas-Rubio<sup>1</sup> 

Jorge González Aguilera<sup>2</sup> 

Heber Hernán Soto Gonzales<sup>3</sup> 

Jony Ramiro Torres Velázquez<sup>1</sup> 

## INTRODUCCIÓN

La germinación de las semillas tiene como proceso previo la absorción de agua o imbibición, como condición necesaria pero no suficiente (Stalin et al., 2020). Existen factores intrínsecos de la semilla que determinan el éxito de una buena germinación. Por ejemplo, el grado de madurez del embrión y la cantidad de energía almacenada, son variables fisiológicas y bioquímicas cruciales que contribuyen a una buena germinación (Lian et al., 2020). Los factores abióticos como la salinidad, la sequía, la temperatura del suelo pueden tener un efecto reductor de la germinación dado el efecto osmótico que se puede crear, impidiendo la imbibición, y posteriores reacciones de hidrólisis de almidón, proteínas y la síntesis de giberelinas (Ren et al., 2018).

Factores propios de la semilla como el grosor de la cubierta seminal o testa puede impedir la entrada de agua y la posterior imbibición (Rajkumar et al., 2021; Richard et al., 2018), por lo que en algunas especies es necesario emplear alternativas físicas, mecánicas o químicas para contribuir a la disminución de la dureza física de la semilla y de esta forma facilitar la entrada del agua al interior de las semillas (Azad et al., 2022). Con estas alternativas se puede saber con exactitud si esta fue la condición verdaderamente necesaria para la germinación o si la no ocurrencia de este factor fue función de mala condición bioquímica en el interior de la semilla.

Las especies de la familia *Fabaceae* presentan semillas con un embrión recto o curvado y carecen de endospermo o presentan un endospermo escaso. Su testa es normalmente gruesa, dura e impermeable, por lo que para su germinación requieren una degradación parcial o total por acción de microorganismos, por variaciones de temperatura, por rozamiento con el suelo, etc., debido a que presentan una dormencia

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México /Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui, Bácum Sonora, México, CP: 85270(a) 1.

<sup>2</sup> Editora Pantanal, Nova Xavantina, MT, Brasil.

<sup>3</sup> Professional School of Environmental Engineering, Research Group: "Bioprospection of microorganisms and biotechnological applications - UNAM", National University of Moquegua (UNAM) Ilo 18601, Peru.

\* Autor correspondiente: oleinismora@gmail.com

física que les permite conservar su capacidad de germinación durante más de 40 años, llegando a veces a sobrepasar los 100 (Rossini et al., 2005). Dentro de esta familia destacan las especies del género *Parkinsonia* por su adaptabilidad a condiciones climáticas y lugares perturbados (González-Villalobos et al., 2020).

En el semidesierto de Sonora, México existen dos especies de dicho género cuyas dominancias no ascienden al 19% en ecosistemas salinos (Gonzales et al., 2021). La especie *Parkinsonia aculeata* L. Sp. Pl. se presenta en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas alrededor del mundo, donde se utiliza en diferentes propósitos. Sin embargo, en ciertos ambientes la especie tiene un comportamiento invasor (Coelho et al., 2013). Aunque estas especies producen gran cantidad de semillas en la condición de salinidad existente, no todas logran germinar y dar lugar a nuevas plantas debido a la alta salinidad del extracto de saturación del suelo. Las semillas de esta especie presentan una cubierta seminal dura y poco permeable (Waheed et al., 2021), por lo que no se conoce con exactitud si la causa de los bajos porcentajes de germinación de estas especies es función de la poca permeabilidad de la cubierta seminal o mala condición bioquímica en el interior de la semilla debido a la alta salinidad existente. En este tipo de semillas se realiza la escarificación para disminuir el grosor de la cubierta y por consiguiente favorecer la entrada de agua (Zare; Lotfi, 2022). Teniendo en cuenta esta situación se desarrolló una investigación con el objetivo de emplear la técnica de escarificación química y mecánica en semillas de *Parkinsonia aculeata* L. Sp.Pl. para evaluar el efecto de técnicas de escarificación mecánica y química en la capacidad de absorción de agua y germinación de las semillas en condiciones de salinidad, a base de cloruro de sodio a conductividades eléctricas desde  $0.8 \text{ dS m}^{-1}$  hasta  $8.8 \text{ dS m}^{-1}$ , en concordancia con los niveles de salinidad del extracto de saturación del suelo de un ecosistema salino del semidesierto de Sonora ubicado en la localidad de Bahía de Lobos, Sonora, México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se desarrolló en condiciones controladas en el laboratorio de Biotecnología del Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Yaqui. Para el estudio se tomaron semillas aleatorias de árboles procedentes del ecosistema semidesértico salino ubicado en la localidad de Bahía de Lobos, perteneciente al municipio de San Ignacio Río Muerto, Sonora (Figura 1).

Se emplearon dos técnicas de escarificación: la química y la mecánica. La escarificación química consistió en sumergir las semillas en ácido acético al 5% v/v, durante un tiempo de 15 minutos. Posteriormente las semillas se secaron con papel desecante para proceder al estudio de absorción de agua (Luera et al., 2021). La escarificación mecánica consistió en lijar, de forma manual, las semillas durante un tiempo de 3 minutos, con una lija de 100 (p100) (Kuswanto; Li'aini, 2022). Posterior a la escarificación, las semillas se pesaron de forma individual, en balanza analítica digital y se ubicaron en placas de Petri, a razón de cuatro semillas por placa. Estas placas fueron cuadrículadas para el posterior procesamiento de las semillas y se usó como base gasa estéril para evitar el movimiento de las semillas cuando se añadieran las soluciones salinas. En cada placa se depositó un volumen de 25 ml de solución.

***Tratamientos y diseño experimental***

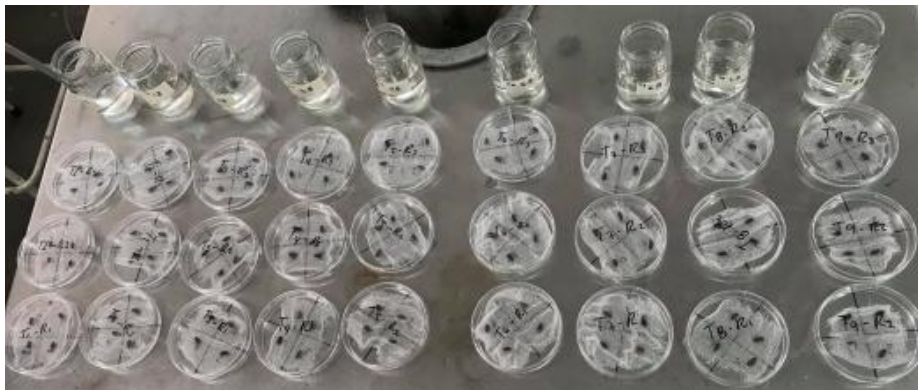
Los tratamientos consistieron en seis soluciones nutritivas ajustadas a conductividades eléctricas (Tabla 1). Como tratamiento control se empleó agua destilada a una CE de  $0.03 \text{ dS m}^{-1}$ . Cada tratamiento conto con un total de 16 semillas (cuatro repeticiones). No se tomaron los tipos de escarificación como fuente de variación para el estudio, sino que se analizaron por separado.

TABLA 1. Soluciones salinas de los tratamientos establecidos

Tratamientos	Conductividades eléctricas ( $\text{dS m}^{-1}$ )
T1	0.03
T2	0.8
T3	1.8
T4	2.8
T5	3.8
T6	4.8
T7	5.8
T8	6.8
T9	7.8
T10	8.8

***Diseño experimental***

Las placas fueron dispuestas en el laboratorio en condiciones de oscuridad siguiendo diseño experimental completamente aleatorizado con arreglo unifactorial, con cuatro repeticiones cada tratamiento (Figura 1).



**Figura 1.** Distribución espacial de los tratamientos siguiendo un arreglo experimental completamente aleatorizado.

***VARIABLES EVALUADAS***

Absorción de agua por la semilla. A partir de los pesos iniciales de las semillas se determinó la absorción de agua a las 192 horas (8 días). Cada semilla se pesó por separado, secándola cuidadosamente con papel desecante y rápidamente se determinó su peso, en cada intervalo de tiempo estipulado. Para la obtención del contenido de agua absorbida, por método gravimétrico, expresado en base fresca, se empleó la siguiente fórmula, propuesta por Argentel et al. (2006):

AA= PFS-PIS

Donde AA: absorción de agua por la semilla; PFS: peso final de la semilla y PIS: peso inicial de la semilla.

Porcentaje de germinación (%G). El porcentaje de germinación se determinó por linealidad entre el total de semillas empleadas en cada tratamiento y la cantidad de semillas germinadas, expresado en porcentaje.

Tiempo de ocurrencia de la germinación (TOG). En cada tratamiento se contó la cantidad de días transcurridos desde la siembra de semillas en las placas, hasta el día de mayor cantidad de semillas germinadas.

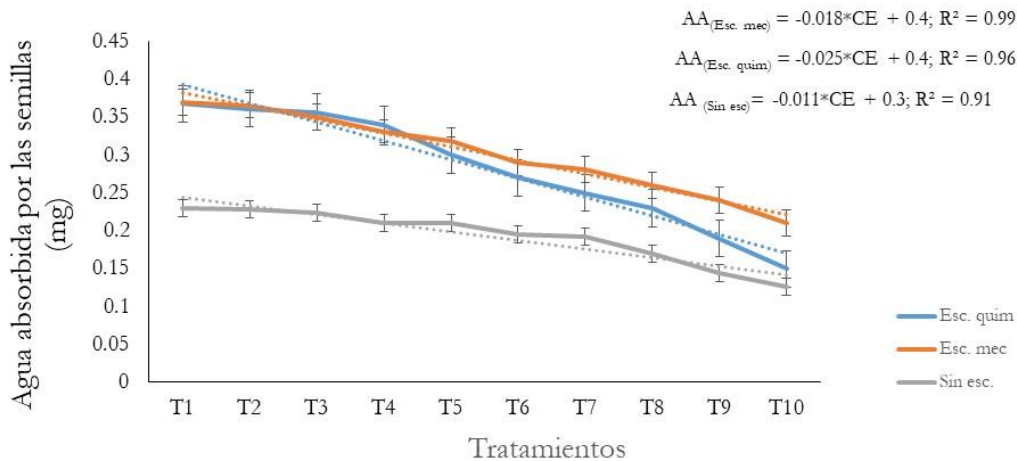
### Análisis estadísticos

Después de comprobar que los datos cumplieron con los supuestos teóricos de normalidad y homogeneidad se realizaron análisis de varianza de clasificación simple para las tres variables evaluadas, sin interacción entre las conductividades eléctricas y los tipos de escarificación. Estos análisis fueron basados en un modelo lineal de efectos fijos. Para la comparación múltiple de medias se empleó la prueba de comparación múltiples de Tukey para un nivel de significación del 1%. En el análisis de la variable agua absorbida por las semillas se determinaron las ecuaciones de regresión y se presentó el coeficiente de determinación de cada ecuación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Absorción de agua por las semillas

Por efecto de la escarificación química se produjo un incremento de la capacidad de absorción de agua del 34% y 35%, para las escarificaciones química y mecánica respectivamente, con respecto a la no escarificación (control). Estos valores de absorción de agua mantuvieron estos porcentajes desde el tratamiento control (CE=0.003 dS m<sup>-1</sup>) hasta el T6 (CE=4.8 dS m<sup>-1</sup>) (Figura 2).

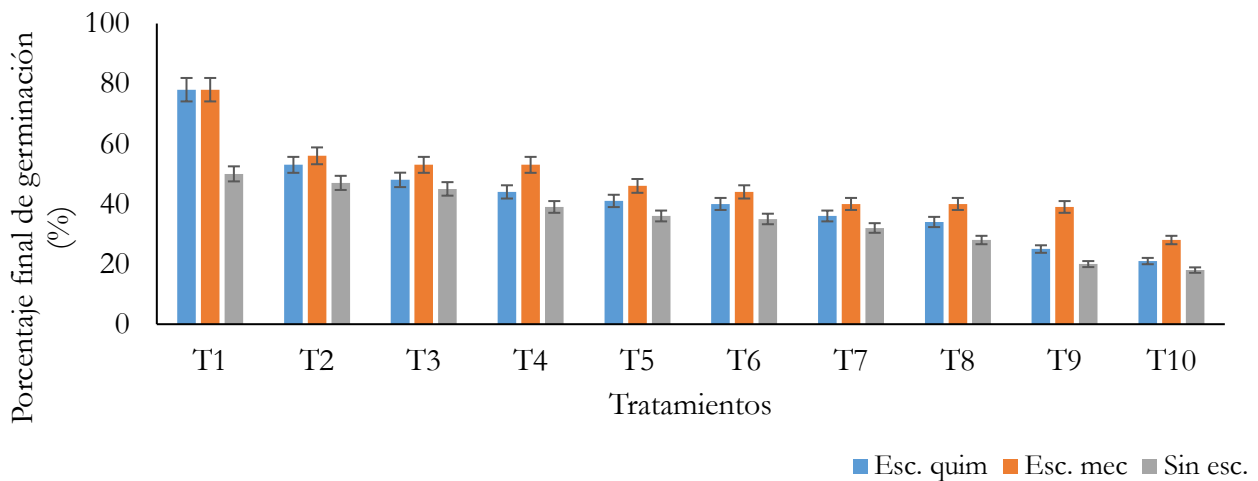


**Figura 2.** Absorción de agua por las semillas de *P. aculeata* L. Sp. Pl. a conductividades eléctricas desde 0.8 hasta 8.8 dS m<sup>-1</sup> tratadas con escarificación química y mecánica.

En ambas técnicas de escarificación se observó una disminución significativa ( $p=0.0023$  y  $0.0014$  para escarificación química y mecánica, respectivamente) conforme se incrementó la conductividad eléctrica de la solución salina. La diferencia final entre el tratamiento control y el de mayor CE ( $8.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) fue de  $0.22 \text{ mg}$  y  $0.16 \text{ mg}$  de agua (Figura 2). Este resultado demuestra el efecto osmótico de las soluciones salinas, lo cual puede afectar el proceso de germinación. El estudio permite observar que las semillas de *P. aculeata* L. Sp. Pl. en condiciones naturales, sin salinidad en el suelo absorben  $0.24 \text{ mg}$  de agua durante el proceso de imbibición de las semillas, mientras que al ser tratadas mediante escarificación se incrementa la absorción de agua hasta  $0.36 \text{ g}$ .

### **Porcentaje de germinación de *P. aculeata* L. Sp. Pl. a conductividades eléctricas desde $0.8$ hasta $8.8 \text{ dS m}^{-1}$**

El porcentaje final de germinación también disminuyó en la medida que se incrementó la conductividad eléctrica en los tratamientos. En el tratamiento control no existieron diferencias entre las técnicas de escarificación química y mecánica ( $p=0.0562$ ), pero éstas sí, con respecto a cuando no se escarificó ( $p=0.00012$ ) (Figura 3). El presente resultado indica que con la escarificación se puede elevar el porcentaje de germinación de semillas de esta especie, por lo cual la cosecha de estas y el procesamiento mediante la escarificación, principalmente mecánica permite elevar el porcentaje de germinación.



**Figura 3.** Porcentaje final de germinación de semillas de *P. aculeata* L. Sp.Pl. a conductividades eléctricas desde  $0.8$  hasta  $8.8 \text{ dS m}^{-1}$  tratadas con escarificación química y mecánica.

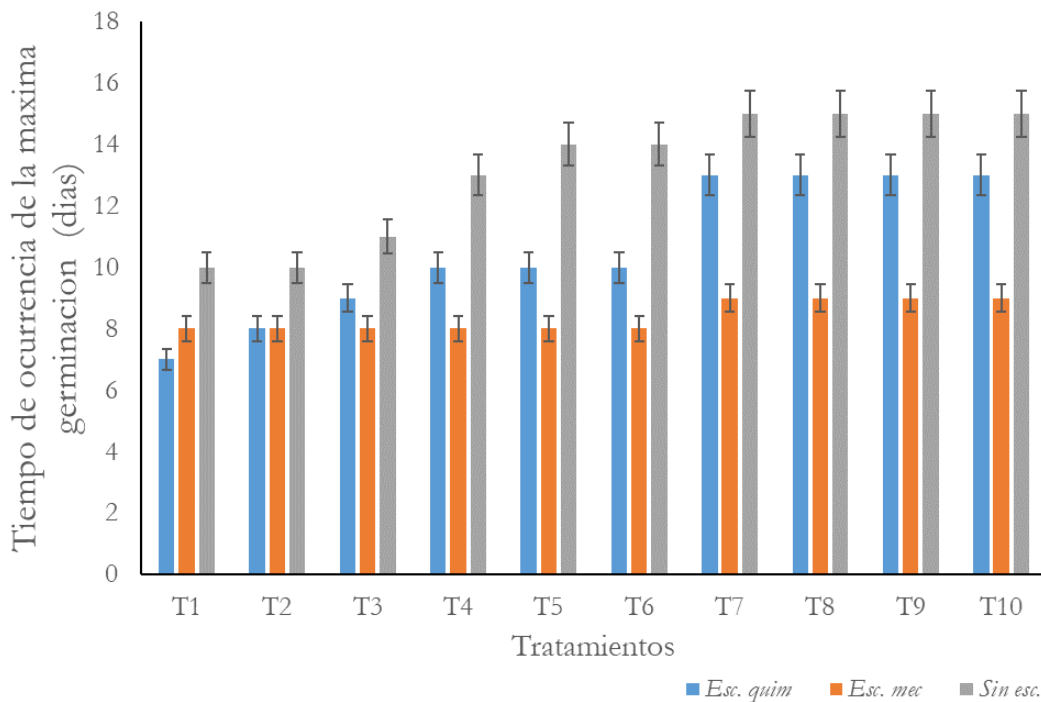
La técnica de escarificación elevó, en condiciones no salinas la germinación en *P. aculeata* L. Sp. Pl. en  $27\%$ . Sin embargo, este valor se redujo por efecto de la salinidad. Aun así, las diferencias fueron

significativas entre las técnicas de escarificación y de estas con respecto a cuando no se escariaron las semillas ( $p=0.0368$ ).

El presente resultado demuestra que, sin escarificar, solo germina el 50% de las semillas y que este porcentaje decrece conforme aumenta la salinidad. Cuando se realiza la escarificación mecánica los porcentajes de germinación se mantienen superiores al 45% aún a CE de  $7.8 \text{ dS m}^{-1}$ , mientras que a conductividades de  $8.8$  el porcentaje disminuye hasta 28%.

### *Tiempo de ocurrencia de la germinación*

Con el uso de las técnicas de escarificación se logró disminuir el tiempo de ocurrencia de la germinación de las semillas, existiendo diferencias altamente significativas entre las técnicas empleadas y el control sin escarificación ( $p=0.0025$ ). Esta disminución del tiempo de ocurrencia de la germinación se observó para todas las soluciones salinas, aunque se notó el efecto reductor del proceso debido a la salinidad (Figura 4).



**Figura 4.** Tiempo de ocurrencia de la germinación de semillas de *P. aculeata* L. Sp. Pl. con escarificación química, mecánica y sin escarificación a conductividades eléctricas desde  $0.8$  hasta  $8.8 \text{ dS m}^{-1}$ .

El estudio permitió para concluir que la semilla de esta especie germina normalmente, sin escarificación, a los 10 días sin salinidad o a bajas concentraciones y que conductividades eléctricas entre  $5.8$  y  $8.8 \text{ dS m}^{-1}$  retrasan la germinación por un tiempo de hasta 15 días. Sin embargo, cuando se realiza la escarificación química y mecánica se reduce este tiempo hasta 13 y nueve días, respectivamente a similares conductividades eléctricas ( $5.8$  y  $8.8 \text{ dS m}^{-1}$ ).

## DISCUSIÓN

Para que la semilla germine, deben ocurrir en su interior mecanismos metabólicos y morfogénicos. El proceso de germinación está constituido por tres importantes y dependientes fases: i) absorción de agua por la semilla o imbibición; ii) activación del metabolismo (alta respiración, síntesis de proteínas y movilización de sustancias de reserva) y, iii) elongación del embrión y ruptura de la cubierta seminal para que ocurra la salida de la radícula (Nonogaki, 2006).

El proceso de germinación está influenciado tanto por factores endógenos como exógenos (Kranter; Colville, 2011). Dentro de los factores endógenos están la viabilidad del embrión, la cantidad y calidad del tejido de reserva y los diferentes tipos de dormancia y, aunque no está dentro de la semilla propiamente sino por fuera, recubriendo sus componentes, influye, además, son el grosor de la testa o cubierta seminal (Shu et al., 2015). Entre los factores exógenos que regulan este proceso, disponibilidad de agua, la temperatura y tipos de luz son los más significativos (Lotfi et al., 2019).

La germinación consta de tres fases: Fase I Absorción rápida de agua (Imbibición); Fase II Activación del metabolismo, movilización de nutrientes; y Fase III. Elongación del embrión, ruptura de la testa y germinación.

Imbibición: es el proceso de absorción de agua por la semilla. Se da por las diferencias de potencial hídrico entre la semilla y la solución de imbibición. Esta es la condición necesaria para que ocurra el proceso de germinación, pero no la condición suficiente (Bray, 2017).

Activación del metabolismo y movilización de nutrientes: en esta fase, las reservas de nutrientes principalmente almidón y proteínas y lípidos (en las especies oleaginosas) se degradan a monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos libres, para formar nuevas estructuras orgánicas y hormonas como las giberelinas. Todos estos precursores de macromoléculas se emplean para suplir el crecimiento y la elongación del embrión. En esta etapa la actividad respiratoria es alta (Taiz; Zeiger 2006).

Elongación del embrión, ruptura de la testa y germinación. Esta fase es el resultado de la alta actividad metabólica donde la división y elongación celular se activan. Una vez que salen los cotiledones o el cotiledón se activan los cloroplastos y la planta comienza a desarrollar la nutrición carbonada inicial y la mineral tras la salida de la radícula (Nonogaki, 2006).

Antes de aseverar que las semillas no germinan o que el proceso se enlentece, por efecto de condiciones como la salinidad se debe tener total seguridad de que la semilla tiene suficiente energía de germinación y poder germinativo (viabilidad del embrión). Ya que factores como la dormancia propia de algunas semillas puede conducir a errores experimentales. Por ejemplo, la dormancia, este fenómeno se puede encontrar en gran cantidad de semillas, y está dado tanto por factores exógenos como endógenos, de ahí los nombres de: Dormancia exógena y Dormancia endógena. La primera hace referencia a las condiciones ambientales básicas que determinan el proceso de germinación como disponibilidad de agua, luz y temperatura. Mientras que la segunda, es el tipo de dormancia que es inherente a las características internas de la semilla, entre estos se encuentran: dormancia por embriones rudimentarios, dormancia por

inhibición metabólica y dormancia por inhibición osmótica. i) Dormancia por embriones rudimentarios (Steinbrecher; Leubner-Metzger, 2017).

La salinidad, por su parte genera un efecto osmótico que retarda la germinación de las semillas de múltiples especies (Hooks et al., 2018). La diferencia de potencial hídrico entre el suelo o el medio donde se desarrollan las semillas y la semilla es el factor que más retarda la absorción de agua (Xu et al., 2016). Este efecto osmótico puede causar, a conductividades eléctricas muy altas la toxicidad iónica y la sucesiva muerte del embrión (Arif et al., 2020).

Existen varios reportes sobre el uso de plantas nativas halófitas para la recuperación de suelos salinos, ya que éstas tienen la habilidad de hiperacumular sales en hojas y tallos. Aún cuando *P. aculeata* (310,59 mg planta<sup>-1</sup>) se mostro como una especie fitorremediadora deficiente, no deja de presentan gran interés por la tolerancia que presenta frente al estrés por salinidad apoyándose en mecanismos fisiológicos comunes (Devi et al., 2016).

Un estudio realizado por Coelho et al. (2013) demuestra que el aumento de la salinidad de un suelo no salino a moderadamente salino estimula la emergencia, crecimiento inicial y producción de clorofila en plantas de *P. aculeata* L. Sp.Pl., a diferencia de otras especies. Lo anterior explica la facilidad que tiene esta leguminosa para desarrollarse en ambientes adversos.

## CONCLUSIONES

El tratamiento de escarificación química y mecánica incrementó la absorción de agua por las semillas de *P. aculeata* L. Sp. Pl. en condiciones no salinas, y aunque, por efecto del incremento de la CE de los tratamientos, se redujo la cantidad de agua, siempre fue mayor la cantidad de agua absorbida cuando se aplicó la escarificación.

Los dos tipos de escarificación aplicados a las semillas incrementaron el porcentaje de germinación (78%) en las semillas de *P. aculeata* L. Sp. Pl., mientras que cuando no se escarificaron solo se obtuvo un 50% de germinación en condiciones no salinas. Conductividades eléctricas desde 0.8 hasta 3.8 dS m<sup>-1</sup> reducen el porcentaje de germinación al 50%, mientras que valores superiores a 3.8 hasta 8.8 propician un decremento del proceso hasta el 23% con o sin aplicar la escarificación.

La salinidad retarda la germinación de *P. aculeata* L. Sp. Pl., en 5 días en semillas sin escarificar. El proceso de escarificación disminuyó el tiempo de ocurrencia de la germinación, siendo la escarificación mecánica la de mejor resultado, propiciando la ocurrencia del proceso a los nueve días con independencia de la conductividad eléctrica de los tratamientos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Argentel, L. et al. (2006). Efecto de altas concentraciones salinas sobre la germinación y el crecimiento del trigo (*Triticum aestivum*) variedad Cuba-C-204. Cultivos Tropicales, 27(3): 45-48.



- Arif, Y. et al. (2020). Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156: 64-77.
- Azad, M. S. et al. (2022). Effect of pre-sowing treatment on seed germination of Lohakath (*Xylia kerrii* Craib & Hutch.). *Khulna University Studies*, 33-36.
- Bray, C. M. (2017). Biochemical processes during the osmopriming of seeds. In: *Seed development and germination* (pp. 767-789). Routledge.
- Coelho, B. F. et al. (2013). Emergence and initial growth of *Parkinsonia aculeata* L. plants (Fabaceae) under saline substrate. *Revista Árvore*, 37(4): 611-618. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000400004>
- Devi, S. et al. (2016). Phytoremediation potential of some halophytic species for soil salinity. *International Journal of Phytoremediation*, 18(7): 693-696. <http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2015.1131229>
- Gonzales, H. H. S. et al. (2021). Salinity effects on water potential and the normalized difference vegetation index in four species of a saline semi-arid ecosystem. *PeerJ*, 9: e12297.
- González-Villalobos, M. A. et al. (2020). Growth and lead uptake by *Parkinsonia aculeata* L. inoculated with *Rhizobagus intraradices*, *International Journal of Phytoremediation*, 1-7. [10.1080/15226514.2020.1812506](https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1812506)
- Hooks, T. N. et al. (2018). Sodium chloride effects on seed germination, growth, and water use of *Lepidium alyssoides*, *L. draba*, and *L. latifolium*: traits of resistance and implications for invasiveness on saline soils. *Rangeland Ecology & Management*, 71(4): 433-442.
- Kranner, I.; & Colville, L. (2011). Metals and seeds: biochemical and molecular implications and their significance for seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 72(1): 93-105.
- Kuswanto, F.; & Li'aini, A. S. (2022). Mechanical Scarification Influence on Gleditsia assamica Bor Water Uptake and Germination. *Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education*, 14(2).
- Lian, J. et al. (2020). Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 385: 121620.
- Lotfi, N. et al. (2019). Comprehensive biochemical insights into the seed germination of walnut under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 250: 329-343.
- Luera, P. et al. (2021). Effects of scarification, phytohormones, soil type, and warming on the germination and/or seedling performance of three *Tamaulipan thornscrub* forest species. *Plants*, 10(8): 1489.
- Nonogaki, H. (2006). Seed germination-the biochemical and molecular mechanisms. *Breeding Science*, 56(2): 93-105.
- Rajkumar, K. et al. (2021). Mechanical and water absorption behaviour of palm seed particles based hybrid bio-composites. *Journal of Physics: Conference Series* 2027: 012006.
- Ren, X. X. et al. (2018). Proteomic analysis of tree peony (*Paeonia ostii* 'Feng Dan') seed germination affected by low temperature. *Journal of Plant Physiology*, 224: 56-67.

- Richard, G. A. et al. (2018). Variability in hardseededness and seed coat thickness of three populations of *Desmanthus virgatus* (Fabaceae, Mimosoideae). *Grass and Forage Science*, 73(4): 938-946.
- Rossini, O. et al. (2005). Germinación de las semillas en algunas especies americanas de Fabaceae y Bignoniaceae cultivadas en sevilla (so española). *Lagascalía* 26: 119-129.
- Shu, K. et al. (2015). Dormancy and germination: How does the crop seed decide?. *Plant Biology*, 17(6): 1104-1112. <https://doi.org/10.1111/plb.12356>
- Stalin, B. et al. (2020). Evaluation of mechanical, thermal and water absorption behaviors of *Polyalthia longifolia* seed reinforced vinyl ester composites. *Carbohydrate Polymers*, 248: 116748.
- Steinbrecher, T.; & Leubner-Metzger, G. (2017). The biomechanics of seed germination. *Journal of Experimental Botany*, 68(4): 765-783.
- Taiz, L.; & Zeiger, E. (2006). *Fisiología Vegetal*. Volumen 2. Coleccio Ciencies experimentals, Num 10: Universitat Jaume. 1338 p.
- Waheed, A. et al. (2021). Implication of scanning electron microscopy in the seed morphology with special reference to three subfamilies of Fabaceae. *Microscopy research and technique*, 84(9): 2176-2185.
- Xu, S. et al. (2016). Salinity and temperature significantly influence seed germination, seedling establishment, and seedling growth of eelgrass *Zostera marina* L. *PeerJ*, 4: e2697.
- Zare, A.; & Lotfi, J. A. (2022). Evaluation of different mechanical, chemical and physical treatments on breaking dormancy of seed Prickly scorpions (*Scorpiurus muricatus* L). *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 11(2): 43-54.

## Índice Remissivo

### E

*Eremanthus erythoropappus*, 24

### M

manejo, 13, 19, 23, 24

modelagem, 4, 27, 28, 33

### P

produção de mudas, 12, 15

produtividade, 14, 18, 20, 21, 23

### S

sensoriamento remoto, 25, 37

silvicultura, 7

sistema radicular, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14,  
15, 16, 17, 21

## Sobre o organizador



  **Alan Mario Zuffo**

Engenheiro Agrônomo, graduado em Agronomia (2010) na Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Mestre (2013) em Agronomia - Fitotecnia (Produção Vegetal) na Universidade Federal do Piauí (UFPI). Doutor (2016) em Agronomia - Fitotecnia (Produção Vegetal) na Universidade Federal de Lavras (UFLA). Pós - Doutorado (2018) em Agronomia na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS). Atualmente, possui 165 artigos publicados/aceitos em revistas nacionais e internacionais, 127 resumos simples/expandidos, 66 organizações de e-books, 45 capítulos de e-books. É editor chefe da Pantanal editora e revisor de 18 revistas nacionais e internacionais. Professor adjunto na UEMA em Balsas. Contato: alan\_zuffo@hotmail.com.



**Pantanal Editora**

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000

Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil

Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp)

<https://www.editorapantanal.com.br>

[contato@editorapantanal.com.br](mailto:contato@editorapantanal.com.br)

