



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
MESTRADO EM AGRONOMIA**

VANESSA LEÃO PELEJA

**METABOLISMO BIOQUÍMICO E ESTADO NUTRICIONAL DE PLANTAS
JOVENS DE PARICÁ SOB CONCENTRAÇÕES DE ALUMÍNIO**

**BELÉM
2016**

VANESSA LEÃO PELEJA

**METABOLISMO BIOQUÍMICO E ESTADO NUTRICIONAL DE PLANTAS
JOVENS DE PARICÁ SOB CONCENTRAÇÕES DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da
Amazônia, como parte das exigências do Curso de Pós-
Graduação em Agronomia: área de concentração nutrição
mineral de plantas, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Mario Lopes da Silva Jr.

DISSERTAÇÃO
188-74
2388

**BELÉM
2016**

Peleja, Vanessa Leão

Metabolismo bioquímico e estado nutricional de plantas jovens de paricá sob concentrações de alumínio. / Vanessa Leão Peleja. – Belém, 2016.

57 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Mario Lopes da Silva Jr.

1. Paricá 2. *Schyzolobium amazonicum* 3. Paricá – Metabolismo bioquímico 4. Paricá – Estado nutricional 5. Paricá – Toxidez de Alumínio I. Silva Jr., Mario Lopes da (orient.) II. Título.

CDD – 583.74

VANESSA LEÃO PELEJA

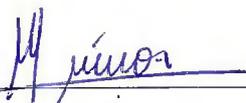
**METABOLISMO BIOQUÍMICO E ESTADO NUTRICIONAL DE PLANTAS
JOVENS DE PARICÁ SOB CONCENTRAÇÕES DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Agronomia: área de concentração Nutrição Mineral de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

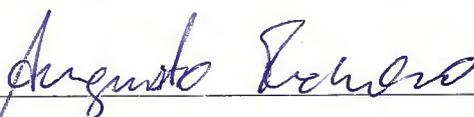
Orientador: Prof. Dr. Mario Lopes da Silva Jr.

Aprovado em 14 de outubro de 2016.

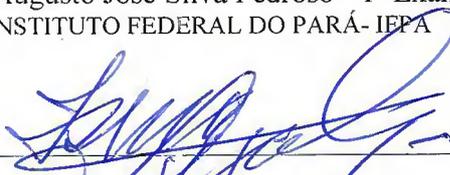
BANCA EXAMINADORA



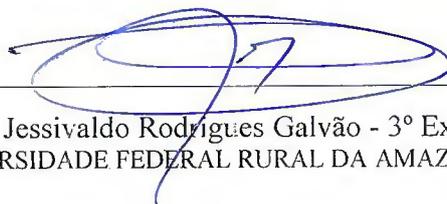
Prof. Dr. Mario Lopes da Silva Jr. - Orientador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA



Prof. Dr. Augusto José Silva Pedrosa - 1º Examinador
INSTITUTO FEDERAL DO PARÁ- IEPA



Prof. Dr. Ismael de Jesus Matos Viegas. - 2º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA



Dr. Jessivaldo Rodrigues Galvão - 3º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar sempre.

A meus amados pais Francisco A. S. Peleja e Djanira R. Leão Peleja pelo apoio incondicional durante toda minha formação e dedicação a mim a todo momento.

A minha família por toda a ajuda prestada, sem esse apoio a realização deste mestrado não seria possível, em especial a minha madrinha Maria das Graças Peleja, minha avó Terezinha Rodrigues da Silva e minha irmã Poliana Leão Peleja.

Ao meu querido Eduardo Lopes Cunha, por ter me apoiado e estado ao meu lado em todos os momentos.

A Universidade Federal Rural da Amazônia, pela oportunidade de cursar o mestrado em Agronomia e desenvolver todos os meus trabalhos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Professor Dr. Mário Lopes da Silva Júnior pela ajuda, amizade e orientação no mestrado.

A pesquisadora da Embrapa Dra. Fernanda Borges Ilkiu pela amizade e coorientação deste trabalho.

Aos meus amigos do Programa de Pós-graduação em Agronomia que contribuíram de alguma forma durante o mestrado, em especial Rikelly Souza de Oliveira por todo o apoio.

Ao Professor Dr. Candido Ferreira de Oliveira Neto pela ajuda na realização das análises.

Aos estagiários Vitor Resende do Nascimento e Ana Catarina Furtado, pela ajuda nas fases de elaboração deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia pelos ensinamentos adquiridos durante o curso e todos os professores que contribuíram para este trabalho.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), pela disponibilidade de laboratórios para a realização de análises.

Ao Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências (IG) da UFPA, pela disponibilidade do MEV e a Ana Paula auxílio técnico para o andamento do trabalho.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização dessa pesquisa.

Meus sinceros agradecimentos!

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

CRESCIMENTO, ESTADO NUTRICIONAL E METABOLISMO BIOQUÍMICO DE PLANTAS JOVENS DE *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke SOB CONCENTRAÇÕES DE ALUMÍNIO

- Figura 1- Delineamento experimental na casa de vegetação.17
- Figura 2- Sintomas de deficiência de cálcio: (A₁) controle; (A₂) 5 mg L⁻¹ de Al; (A₃) 10 mg L⁻¹ de Al; (A₄) 20 mg L⁻¹ de Al; (A₅) 40 mg L⁻¹ de Al.22
- Figura 3- Sintomas de deficiência de potássio: (A₁) controle; (A₂) 5 mg L⁻¹ de Al; (A₃) 10 mg L⁻¹ de Al; (A₄) 20 mg L⁻¹ de Al; (A₅) 40 mg L⁻¹ de Al.23
- Figura 4- Crescimento em altura (cm) e peso da matéria seca da parte aérea e da raiz (g) de mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al (mg L⁻¹).24
- Figura 5- Teor (g Kg⁻¹) e acúmulo (g/planta) de nitrogênio (N) na matéria seca de mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações e Al (mg L⁻¹).25
- Figura 6- Teor (g kg⁻¹) e acúmulo (g/ planta) de fosforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) na matéria seca de mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações e Al (mg L⁻¹).27
- Figura 7- Teor e acúmulo de micronutrientes em mg kg⁻¹ de matéria em mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al (mg L⁻¹).29
- Figura 8- Teor e acúmulo de alumínio (Al) em mg kg⁻¹ de matéria em mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al (mg L⁻¹).30
- Figura 9- Concentração de amônio (NH₄⁺), nitrato (NO₃⁻) em mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al (mg L⁻¹).32
- Figura 10- Sintomas de toxidez de Al em mudas de *Schizolobium amazonicum*. (A) 20 mg L⁻¹ de Al; (B₁₂) 40 mg L⁻¹ de Al.34
- Figura 11- Concentração de aminoácido totais solúveis (AA), proteína (PRO), carboidratos totais (CARB), amido (AMD) e sacarose (SACR) em mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al (mg L⁻¹).35
- Figura 12- Concentração de prolina (PROL) e glicina betaína (GL) na parte aérea e raízes das mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al (mg L⁻¹).36

CAPÍTULO 2

ALUMÍNIO EM RAÍZES DE *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke

- Figura 1- Microscópio eletrônico de varredura (MEV).46
- Figura 2- Amostras de *Schizolobium amazonicum* e suportes para as amostras (stubs).46
- Figura 3- Corte transversal de raízes de *Schizolobium amazonicum* e pontos marcados para a leitura em EDS (Energy Dispersive X-ray Detector). (A) 0 mg L⁻¹ de Al; (B) 20 mg L⁻¹ de Al; 40 mg L⁻¹ de Al.47
- Figura 4- Raízes de *Schizolobium amazonicum*. (A) 0 mg L⁻¹ de Al; (B) 20 mg L⁻¹ de Al; (C) 40 mg L⁻¹ de Al.48
- Figura 5- Espectro da análise em EDS e o nível de energia das camadas de alumínio na raiz de *Schizolobium amazonicum*. (A) 0 mg L⁻¹ de Al³⁺; (B) 20 mg L⁻¹ de Al³⁺; 40 mg L⁻¹ de Al³⁺. (1) Epiderme; (2) Córtex; (3) Cilindro Central.49

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	9
ABSTRACT	10
1- CONTEXTUALIZAÇÃO.....	11
2- CRESCIMENTO, ESTADO NUTRICIONAL E METABOLISMO BIOQUÍMICO DE PLANTAS JOVENS DE <i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Ducke SOB CONCENTRAÇÕES DE ALUMÍNIO	13
RESUMO	13
ABSTRACT	14
2.1 Introdução	15
2.2 Material e Métodos	17
2.2.1 Localização do experimento	17
2.2.2 Material vegetal.....	17
2.2.3 Delineamento experimental e tratamentos	18
2.2.4 Altura e Matéria seca.....	18
2.2.5 Teor e acúmulo de nutrientes e alumínio.....	18
2.2.6 Avaliação Bioquímica	19
2.2.6.1 Amônio livre	19
2.2.6.2 Nitrato	19
2.2.6.3 Aminoácidos solúveis totais	19
2.2.6.4 Proteínas solúveis	20
2.2.6.5 Carboidrato	20
2.2.6.6 Amido	20
2.2.6.7 Sacarose	20
2.2.6.8 Prolina.....	21
2.2.6.9 Glicina betaína	21
2.2.7 Análise dos dados.....	21
2.3 Resultados e Discussão	22
2.3.1 Sintomas visuais de fitotoxicidez	22
2.3.2 Altura e matéria seca	23
2.3.3 Teor e acúmulo de macronutrientes	28
2.3.4 Teor e acúmulo de micronutrientes	28
2.3.5. Teor e acúmulo de alumínio	30

2.3.6. Variáveis Bioquímicas.....	31
2.3.6.1 Nitrato	31
2.3.6.2. Amônio livre	31
2.3.6.3 Aminoácido.....	33
2.3.6.4 Proteínas solúveis totais.....	33
2.3.6.5 Carboidratos	34
2.3.6.6 Amido e Sacarose	34
2.3.6.7 Prolina e Glicina betaína.....	36
2.5 Conclusão	37
REFERENCIAS.....	38
3- ALUMÍNIO EM RAÍZES DE <i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Ducke	43
RESUMO	43
ABSTRACT	43
3.1 Introdução	44
3.2 Material e Métodos	45
3.2.1 Obtenção do material vegetal e condições de crescimento	45
3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos	45
3.2.3 Análises de espectrometria por energia dispersiva (EDS).....	45
3.3 Resultados e Discussão	48
3.5 Conclusão	51
REFERENCIAS.....	52

RESUMO GERAL

Schizolobium amazonicum Huber ex Ducke (paricá) é uma espécie arbórea madeireira com alta produtividade e possui uma grande importância econômica e ecológica, ocorre principalmente em solos tropicais ácidos, com altos teores de alumínio trocável. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de concentrações de Al na altura, peso da matéria seca, estado nutricional, metabolismo bioquímico de plantas de *Schizolobium amazonicum* e analisar a presença de alumínio em raízes de paricá por microanálises espectrométricas de raios-X por dispersão de energia (EDS) em Microscópio Eletrônico de Varredura. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com cinco tratamentos e cinco repetições, sendo cada planta uma unidade experimental, totalizando 25 plantas. Os tratamentos consistiram em cinco concentrações de alumínio: 0; 5; 10; 20 e 40 mg L⁻¹, aplicado na forma de cloreto de alumínio (AlCl₃) na solução nutritiva. Para as análises no EDS foram utilizados três tratamentos 0, 20 e 40 mgL⁻¹ Al. O peso da matéria seca aumentou significativamente nas raízes das plantas cultivadas em solução nutritiva com Al, enquanto que a parte aérea sofreu redução. As plantas mais afetadas pelo efeito tóxico do alumínio foram as com 20 e 40 mg L⁻¹ de Al. Os teores de macro (N, P, Ca, Mg e K) e micronutrientes (Fe, Cu e Mn) foram afetados significativamente pelo Al, exceto o Zn. A parte aérea foi a mais afetada pela toxidez, onde o teor da maioria dos nutrientes sofreu redução. O acúmulo dos macronutrientes foi maior na raiz com a adição do Al na solução nutritiva comparado com a parte aérea. Para os micronutrientes observou-se comportamento semelhante, exceto para o Fe que não apresentou diferença significativa na raiz e o Zn na parte aérea. A concentração de nitrato e amônio nas raízes aumentou na presença do metal fitotóxico, enquanto a concentração de aminoácidos, proteínas, carboidratos e amido diminuiu em dosagens acima de 5 mg L⁻¹. Dos aminoácidos que proporcionam resistência a estresses abióticos, prolina e glicina betaína, somente a glicina aumentou a concentração com a adição do Al, enquanto que a prolina foi afetada pelo efeito tóxico e teve uma queda na concentração na presença do Al. O Al tendeu a se acumular nas raízes com baixa translocação para a parte aérea. Foi observado maior presença do Al na epiderme das raízes (43% do total), diminuindo conforme a proximidade com o cilindro vascular.

Palavras Chave: *Schizolobium amazonicum*; Metabolismo bioquímico; Estado nutricional; Toxidez de Alumínio.

ABSTRACT

Schizolobium amazonicum Huber ex Ducke (paricá) is a timber specie with high productivity and high economical and ecological importance, occurs mainly in tropical acid soils with high exchangeable aluminum content. Aluminum toxicity it is one of the main factors limiting the development of plants in acid soils. The aim of this study was to evaluate the effect of different concentrations of Al^{3+} at height, weight of dry matter, nutritional status and biochemical metabolism paricá plants grown in nutrient solution. The experimental design was a randomized block, with five blocks, where each block contained a plant of each treatment totaling five replications, each plant an experimental unit. The treatments were four aluminum concentrations: 0; 5; 10; 20 and 40 $mg L^{-1}$, applied to the nutrient solution in the form of aluminum chloride ($AlCl_3$). For analysis in the EDS were used three treatments: 0; 20 and 40 $mg L^{-1}$ Al. The dry weight increased significantly in the roots of plants grown in nutrient solution with Al^{3+} , while the shoot was reduced. The plants most affected by the toxic effects of aluminum were those containing 20 e 40 $mg L^{-1}$ of Al^{3+} . The macro content (N, P, Ca, Mg and K) and micronutrients (Fe, Cu and Mn) were significantly affected by Al^{3+} , except Zn. The shoot was the most affected by toxicity, where the content of most nutrients was reduced. The accumulation of macronutrients was higher at the root with the addition of Al in the nutrient solution compared to the shoot. For micronutrients observed similar behavior, except for Fe which showed no significant difference in root and Zn in the shoot. The concentration of nitrate and ammonium in the roots increased in the presence of phytotoxic metal, while the concentration of amino acids, proteins, carbohydrates and starch decreased at doses above 5 $mg L^{-1}$. Among amino acids which provide resistance to abiotic stress, proline and glycine betaine, only a glycine increased with the addition of Al^{3+} , while proline was affected by toxicity and had a drop in concentration in the presence of Al^{3+} . The aluminum tended to accumulate in the epidermis of the roots (43% of total), decreasing as the proximity to the vascular cylinder.

KEYWORDS: *Schizolobium amazonicum*, *Biochemical metabolism*; *Nutritional status*; *Aluminum toxicity*.

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Na região amazônica, uma espécie nativa plantada para a produção de madeira em larga escala, que vem ganhando destaque econômico, é o *Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke (paricá). Nativo da Amazônia e de rápido crescimento, possui alta produtividade e uso diversificado (laminação, papel e celulose, compensado, caixotaria, etc.). Alguns fatores abióticos podem interferir no desenvolvimento normal das plantas, entre eles o pH e o teor de Al no solo (VIEIRA, 2007; AMATA, 2009).

O Al é o terceiro elemento mais abundante na litosfera, fazendo parte de 8% da composição da crosta terrestre, estando presente em diferentes formas no solo. Quando se hidrolisa, adquire a forma trivalente de Al^{3+} , predominante em condições ácidas ($pH < 5,5$), tornando-se potencialmente tóxico para as plantas (ROSSIELLO; NETTO, 2006). A toxicidade do Al é um dos principais fatores limitantes do desenvolvimento das plantas em solos ácidos. No Brasil, a ocorrência de solos com problemas de toxidez de Al é da ordem de 60%, considerando as terras com potencial para cultivo (ABREU Jr.; LAVORANTE, 2003).

A toxicidade causada por Al interfere em reações enzimáticas, no metabolismo de vários elementos e na permeabilidade da membrana plasmática. As plantas afetadas pelo cátion tóxico apresentam com frequência sintomas de déficit nutricional na parte aérea (P, K, Ca, Mg), mas o sintoma mais perceptível é a inibição do crescimento das raízes, o que interfere no processo de absorção e transporte de nutrientes. O sítio da toxicidade do Al está localizado no ápice da raiz. Desta forma, as pesquisas de tolerância ao Al são focadas nestas regiões (KOCHIAN, 2003).

A deficiência de nutrientes essenciais ou combinações que afetem a disponibilidade deles provocam distúrbios no metabolismo das plantas, o que prejudica o desenvolvimento normal das plantas. O Al pode causar inibição da divisão celular, lesões na membrana plasmática, alterar a síntese de DNA, diminuir a respiração radicular, além de alterar a rigidez da parede celular (FREITAS et al., 2006). Da Cruz et al (2011) mostram a interferência negativa do Al no metabolismo de plantas, especialmente a respeito dos níveis de compostos nitrogenados, tais como os ácidos aminados e proteínas.

Os parâmetros bioquímicos indicam as condições das plantas em diversas situações de estresse em que essas podem estar sujeitas, e permitem avaliar possíveis mecanismos de defesa, além de apontar os danos que o elemento causa no metabolismo do vegetal, podem ajudar no desenvolvimento de outros estudos (MIGUEL et al., 2010; AZMAT; KHAN, 2011). Estudos sobre o estado nutricional, metabólico e a localização do Al em plantas de paricá submetidas

ao Al são importantes para entender o comportamento da planta sob condições de estresse e elaborar melhores métodos de manejo da espécie.

Portanto o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de concentrações de Al sob a altura, peso da matéria seca, estado nutricional, metabolismo bioquímico de plantas de *Schizolobium amazonicum* cultivadas em solução nutritiva e analisar a presença de Al em raízes de paricá por microanálises espectrométricas de raios-X por dispersão de energia em Microscópio Eletrônico de Varredura.

REFERENCIAS

ABREU JR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Relationship between acidity and chemical Properties of brazilian soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.60, n.2, p.337-343, abr/Jun. 2003.

AMATA. Revisão sobre paricá: *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke. 2009. Disponível em: < www.amatabrasil.com.br/download-arquivo?id=1028>. Acesso em: 12 agosto 2015.

AZMAT, R.; KHAN, N. Nitrogen metabolism as a bio indicator of cu stress in *Vigna radiata*. **Pakistan Journal of Botany**, v. 43, n. 1, p. 515–520, 2011.

DA CRUZ, F. J. R. et al. Aluminum negative impact on nitrate reductase activity, nitrogen compounds and morphological parameters in sorghum plants. **Australian Journal of Crop Science**, v. 5, n. 6, p. 641–645, 2011.

FREITAS, F. A. DE et al. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, p. 72–79, 2006.

MIGUEL, P. S. B. et al. Efeitos tóxicos do alumínio no crescimento das plantas: mecanismos de tolerância, sintomas, efeitos fisiológicos, bioquímicos e controles genéticos. **CES Revista**, Juiz de Fora, v. 24, p. 13-29, 2010.

KOCHIAN, L. V. Cellular Mechanisms of Aluminum Toxicity and Resistance in Plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 46, n. 1, p. 237–260, 2003.

ROSSIELLO, R. P.; NETTO, J. J. Toxidez de Alumínio em Plantas: Novos enfoques para um velho problema. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição Mineral de Plantas**. Sociedade Brasileira de Ciências Solos, 2006. p. 377-418.

VIEIRA, A. H. Sistema de produção de bandara para o Estado de Rondônia. **Sistemas de Produção - Embrapa Rondônia**, Porto Velho, 1 ed., p 1-18, out. 2007.

2 CRESCIMENTO, ESTADO NUTRICIONAL E METABOLISMO BIOQUÍMICO DE PLANTAS JOVENS DE *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke SOB CONCENTRAÇÕES DE ALUMÍNIO

RESUMO

Schizolobium amazonicum Huber ex Ducke (paricá) é uma espécie arbórea madeireira com alta produtividade e possui uma grande importância econômica e ecológica, ocorre principalmente em solos tropicais ácidos, com altos teores de Al trocável. A toxicidade do Al é um dos principais fatores limitantes do desenvolvimento das plantas em solos ácidos. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de concentrações de Al sob a altura, peso da matéria seca, estado nutricional e metabolismo bioquímico de plantas de paricá cultivadas em solução nutritiva. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com cinco tratamentos, onde cada bloco continha uma planta de cada tratamento totalizando cinco repetições, sendo cada planta uma unidade experimental. Os tratamentos consistiram em cinco concentrações de Al: 0; 5; 10; 20 e 40 mg L⁻¹, na solução nutritiva, sendo a fonte do elemento cloreto de alumínio (AlCl₃). O peso da matéria seca das raízes aumentou significativamente conforme o aumento da concentração de Al na solução nutritiva, enquanto que a parte aérea sofreu redução. As plantas mais afetadas pelo efeito tóxico do Al foram as com 20 e 40 mg L⁻¹ de Al. O teor de macro (N, P, Ca, Mg e K) e micronutrientes (Fe, Cu e Mn) foram afetados significativamente pelo Al, exceto o Zn. A parte aérea foi a mais afetada pela toxidez, onde o teor da maioria dos nutrientes sofreu redução. O acúmulo dos macronutrientes foi maior na raiz com a adição do Al na solução nutritiva comparado com a parte aérea. Para os micronutrientes observou-se comportamento semelhante, exceto para o Fe que não apresentou diferença significativa na raiz e o Zn na parte aérea. A concentração de nitrato e amônio nas raízes aumentou na presença do metal fitotóxico, enquanto a concentração de aminoácidos, proteínas, carboidratos e amido diminuiu em dosagens acima de 5 mg L⁻¹. Dos aminoácidos que proporcionam resistência a estresses abióticos, somente a glicina betaína teve um aumento em sua concentração com a adição do Al, enquanto que a prolina foi afetada pelo efeito tóxico do metal e teve uma queda em sua concentração.

Palavras Chave: Paricá; Bioquímica; Nutrição Mineral; Toxidez de Alumínio.

ABSTRACT

Schizolobium amazonicum Huber ex Ducke (paricá) is a timber specie with high productivity and high economical and ecological importance, occurs mainly in tropical acid soils with high exchangeable aluminum content. Aluminum toxicity it is one of the main factors limiting the development of plants in acid soils. The aim of this study was to evaluate the effect of different concentrations of Al at height, weight of dry matter, nutritional status and biochemical metabolism paricá plants grown in nutrient solution. The experimental design was a randomized block, with five blocks, where each block contained a plant of each treatment totaling five replications, each plant an experimental unit. The treatments were four aluminum concentrations: 0; 5; 10; 20 and 40 mg L⁻¹, applied to the nutrient solution in the form of aluminum chloride (AlCl₃). The dry weight increased significantly in the roots of plants grown in nutrient solution with Al, while the shoot was reduced. The plants most affected by the toxic effects of aluminum were those containing 20 and 40 mg L⁻¹ of Al³⁺. The macro content (N, P, Ca, Mg and K) and micronutrients (Fe, Cu and Mn) were significantly affected by Al, except Zn. The shoot was the most affected by toxicity, where the content of most nutrients was reduced. The accumulation of macronutrients was higher at the root with the addition of Al in the nutrient solution compared to the shoot. For micronutrients observed similar behavior, except for Fe which showed no significant difference in root and Zn in the shoot. The concentration of nitrate and ammonium in the roots increased in the presence of phytotoxic metal, while the concentration of amino acids, proteins, carbohydrates and starch decreased at doses above 5 mg L⁻¹. Among amino acids which provide resistance to abiotic stress, proline and glycine betaine, only a glycine increased with the addition of Al, while proline was affected by toxicity and had a drop in concentration in the presence of Al.

KEYWORDS: Paricá; Biochemistry; Mineral Nutrition; Aluminum Toxicity.

2.1 Introdução

Schizolobium amazonicum Huber ex Ducke, (paricá) é uma espécie arbórea madeireira com alta produtividade e possui uma grande importância econômica e ecológica (AMATA, 2009). A área plantada com paricá no Brasil era de 89,1 ha em 2014 e tem conquistado cada vez mais destaque entre as espécies reflorestadas no Brasil, pois possui incrementos em altura e diâmetro que possibilitam sua utilização em poucos anos, além de, sua madeira apresentar facilidade para laminação, secagem, prensagem e excelente acabamento (ALMEIDA et al., 2013; DE MELO et al., 2013).

A forma fitotóxica do Al está diretamente ligada ao pH, que em valores inferiores a 5,5, libera a forma trocável (Al^{3+}) à solução do solo, tóxico para as plantas (ROSSIELLO; NETO, 2006). As plantas variam em grau de fitotoxicidade ao íon, com isso, a identificação do grau de toxidez das espécies tem tido grande foco em estudos (HARIDASAN, 2008). Para as espécies florestais do hemisfério Norte tem sido verificado que os sintomas de toxidez ocorrem geralmente em concentrações acima $10,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Al (ECHART; CAVALLI-MOLINA, 2001).

Alves et al. (2001) em estudos com cássia-verrugosa e ipê-mirim, constataram que as espécies florestais são sensíveis ao Al^{3+} em diferentes graus, pois as plantas de cássia apresentaram sintomas de toxicidade na concentração de 10 mg L^{-1} , enquanto as plantas de ipê-mirim apresentaram apenas na concentração de 20 mg L^{-1} de alumínio.

Em níveis tóxicos no solo, o Al implica na redução da disponibilidade e absorção de P do solo, e também na inibição competitiva da absorção de nutrientes catiônicos, como o Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} e micronutrientes (FREITAS et al., 2006). Estes efeitos podem ser corrigidos através de calagem, um processo de neutralização dos íons H^{+} e Al^{3+} . O calcário tem sido o material mais utilizado para a neutralizar o efeito tóxico do alumínio no solo, contribuindo para um maior rendimento de plantios devido sua ação na melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (RONQUIM, 2010; LOPES et al., 1990). Entretanto essa técnica apresenta altos custos e restrições técnicas, além de induzir, com frequência, à deficiência de micronutrientes em muitos solos (HARTWIG, et al., 2007).

Para plantas em geral, afetadas pelo cátion tóxico apresentam, com frequência, sintomas de déficit nutricional (P, Ca, Mg e K), uma vez que ele interfere no processo de absorção e transporte de nutrientes (FREITAS et al., 2006).

A deficiência de nutrientes provoca distúrbios no metabolismo da planta, como decréscimo do teor de proteínas, aminoácidos, além de outras anormalidades. Algumas plantas

podem acumular prolina e glicina betaína, em resposta aos estresses ambientais, incluindo ao Al^{3+} (ASHRAF; FOOLAD, 2007). Esses são aminoácidos responsáveis pelo ajuste osmótico, proteção de estruturas subcelulares, desintoxicação de radicais livres em plantas estressadas. O teor desses aminoácidos pode ser usado para identificar plantas com tolerância ou resistência a fatores de estresse por metais. Os parâmetros bioquímicos, indicam a condição fisiológica das plantas em diversas situações de estresse, apontando os danos que o elemento causa no metabolismo vegetal (ASHRAF; FOOLAD, 2007; AZMAT; KHAN, 2011; SRINIVAS; BALASUBRAMANIAN, 1995).

O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de concentrações de Al na altura, peso da matéria seca, estado nutricional e metabolismo bioquímico de plantas de *Schizolobium amazonicum* cultivadas em solução nutritiva.

de força total composta por: 930 mg L⁻¹ de NO₃⁻; 97 mg L⁻¹ H₂PO₄⁻; 234 mg L⁻¹ de K⁺; 300 mg L⁻¹ de Ca²⁺; 48 mg L⁻¹ de Mg²⁺; 192 mg L⁻¹ de SO₄²⁻; 0,177 mg L⁻¹ de B, 0,67 mg L⁻¹ Mn; 0,074 mg L⁻¹ de Zn; 0,027 mg L⁻¹ de Cu; 0,01 mg L⁻¹ de Mo e 7,74 mg L⁻¹ de Fe na forma de Fe-EDTA. A solução nutritiva foi renovada semanalmente, e as perdas por evapotranspiração foram repostas diariamente com água destilada. O pH da solução nutritiva na presença de Al foi mantido em 4,8 ± 0,2 e o controle em 5,5 ± 0,2, sendo ajustado a cada dois dias com HCl 0,1 mol L⁻¹ e NaOH 1M. Passados 30 dias, somente em solução nutritiva completa foram aplicados os tratamentos com Al nas plantas de paricá.

2.2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com cinco tratamentos, onde cada bloco continha uma planta de cada tratamento totalizando cinco repetições, sendo cada planta uma unidade experimental (Figura 1). Os tratamentos consistiram em cinco concentrações de alumínio: 0; 5; 10; 20 e 40 mg L⁻¹, aplicado na forma de cloreto de alumínio (AlCl₃).

2.2.4 Altura e Matéria seca

Após 45 dias da aplicação dos tratamentos, as plantas que receberam 40 mg L⁻¹ de Al apresentaram sintomas de toxidez avançados, amarelecimento e queda das folhas, e todas as plantas foram coletadas. A altura foi determinada a partir da distância entre o colo da planta até a extremidade superior da folha mais alta com a utilização de paquímetro digital. As plantas foram seccionadas no colo separando-se a parte aérea do sistema radicular, que passaram por lavagem e foram secos em estufa com circulação forçada de ar, a 60°C até peso constante para a obtenção de matéria seca.

2.2.5 Teor e acúmulo de nutrientes e alumínio

Para a determinação do teor de alumínio (Al), macros (N, P, Ca, Mg e K) e micronutrientes (Fe, Cu, Zn e Mn) as amostras de matéria seca da parte aérea e da raiz foram moídas e analisadas no laboratório de Laboratório de Química de Solos da Embrapa Amazônia Oriental – CPATU, Belém- PA, seguindo a metodologia descrita por Carmo et al. (2000). O acúmulo de nutrientes nas diferentes partes da planta de paricá foi estimado multiplicando-se

os teores do elemento (g kg^{-1} de matéria seca), pelos valores de matéria seca da parte aérea e da raiz, dividindo-se o produto por 1000.

2.2.6 Avaliação Bioquímica

As análises referentes a concentração de nitrato, amônio livre, aminoácidos solúveis totais, proteínas solúveis, carboidratos totais, amido, sacarose, prolina e glicina betaína foram realizadas no Laboratório de Fisiologia Vegetal do Instituto de Ciências Agrárias, da Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém.

2.2.6.1 Amônio livre

Para a determinação de amônio livre foi utilizado o método de Weatherburn (1967), com 50 mg de massa seca da parte aérea e raízes moídas, colocado em tubos de ensaio de 15 mL, adicionando-se 5 mL de água destilada, sendo levada ao “banho-maria” por 30 min a 100 °C, para obtenção do extrato total. As leituras foram obtidas no espectrofotômetro a 625 nm.

2.2.6.2 Nitrato

A concentração de nitrato foi determinada pelo método descrito por Weatherburn (1967), no qual amostras de 50 mg da parte aérea e raízes previamente liofilizadas foram adicionadas em tubos de ensaio contendo 5,0 mL de água destilada e estes incubados em “banho-maria” por 30 minutos a 100 °C. Em seguida, foi centrifugada a 3.000 rpm por 10 min para obtenção do extrato total. As leituras foram obtidas no espectrofotômetro a 410 nm.

2.2.6.3 Aminoácidos solúveis totais

Para a determinação de aminoácidos solúveis totais foi utilizado 50 mg de matéria seca das raízes e parte aérea moídas, com a adição de 5 mL de água destilada. Em seguida, os tubos foram colocados em banho-maria por 30 min a 100 °C para obtenção do extrato total. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 570 nm segundo o método de Peoples et al. (1989).

2.2.6.4 Proteínas solúveis

Para a determinação de proteínas solúveis totais, utilizou-se 100 mg de matéria seca das raízes e parte aérea moídas, 5,0 mL do tampão de extração (Tris-HCl 25 mM pH 7,6) e, em seguida, foram agitados durante 2 h no shaker (com os tubos devidamente lacrados) para obtenção do extrato. As leituras foram feitas no espectrofotômetro a 595 nm conforme método descrito por Bradford (1976).

2.2.6.5 Carboidrato

Para a determinação da concentração de carboidratos foram obtidos pelo método de Dubois et. al. (1956), utilizando 50 mg de matéria seca das raízes e parte aérea moídas, com a adição de 5 mL de água destilada. Em seguida, os tubos foram colocados em banho-maria por 30 min a 100 °C para obtenção do extrato total. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 490 nm.

2.2.6.6 Amido

Para a concentração de amido foi utilizado 19 mg de matéria seca da parte aérea e raiz, em seguida adicionados 1.900 µL de etanol a 80% e homogeneizados em agitador de microtubos para depois serem levadas ao banho-maria por 20 min a 95°C. Após o período de incubação as amostras foram centrifugadas em centrífuga de bancada a 7.500 rpm por 5 minutos e nos resíduo (material vegetal + etanol 80%) foram adicionados 1000 µL de ácido perclórico a 30% por 30 minutos a 25°C. Subsequentemente, as amostras foram centrifugadas em centrífuga de bancada a 7.500 rpm por 5 minutos e os sobrenadantes coletados para determinação de amido. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 490 nm pelo método de Ahluwalia e Ellis (1984).

2.2.6.7 Sacarose

Para a determinação da concentração de sacarose utilizou-se 50 mg de pó de matéria seca das raízes e parte aérea, que foram homogeneizados em 1,5 mL de solução de MCW (metanol:clorofórmio:água 12:5:3 v/v/v) durante 30 min sob agitação em tubos de eppendorf

de 2,0 mL, posteriormente centrifugado a 10000 rpm. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 490 nm, conforme a metodologia de Van Handel (1968).

2.2.6.8 Prolina

A concentração de prolina foi determinada com 50 mg de matéria seca das raízes e parte aérea em pó, colocadas em tubos de ensaio de 15 mL, adicionando-se 5 mL de água destilada, sendo levada ao “banho-maria” por 30 min a 100 °C, e posteriormente centrifugadas 2.000 rpm por 5 minutos a 20 °C. As leituras para prolina foram realizadas em espectrofotômetro a 520 nm de acordo com a Bates et al. (1973).

2.2.6.9 Glicina betaína

Para a glicina betaína foram utilizados 25 mg de matéria seca da parte aérea e das raízes em pó, colocadas em tubo eppendorf de 2 mL que foram completados com água destilada e agitadas no shacke por 4 horas. Depois centrifugados a 10.000 rpm por 10 min a 25°C e coletado o sobrenadante para obtenção do extrato aquoso e descartado o precipitado. Adicionou-se a solução de diluição e manteve-se durante 16h a 0°C na geladeira. A leitura foi realizada em espectrofotômetro a 365 nm conforme a metodologia de Grieve e Grattan (1983).

2.2.7 Análise dos dados

Os dados foram submetidos a análises de normalidade, de variância da regressão e o critério para a escolha do modelo e equação mais adequados foi a partir do coeficiente de determinação (R^2). Para as análises estatísticas foi utilizado o software o SISVAR (FERREIRA, 2011) e para a demonstração gráfica dos resultados, foi utilizado o programa Microsoft Office Excel 2010.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Sintomas visuais de fitotoxidez

As plantas submetidas à presença do Al exibiram sintomas de toxidez de Al no 30^o dia após o início dos tratamentos, apresentando nas folhas mais novas recurvamento para cima, clorose e posterior necrose nas margens das folhas mais novas, murcha da gema apical, assimilando-se a deficiência de cálcio (Figura 2). O Al prejudica a absorção de Ca devido ambos os íons competirem pelo mesmo sítio ativo de canais iônicos envolvidos no processo de absorção (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).



Figura 2- Sintomas de toxidez de alumínio: (A₁) controle; (A₂) 5 mg L⁻¹ de Al; (A₃) 10 mg L⁻¹ de Al; (A₄) 20 mg L⁻¹ de Al; (A₅) 40 mg L⁻¹ de Al.

Também foi observado clorose e posterior necrose nas margens das folhas mais velhas, semelhante a deficiência de potássio (Figura 3). Os sintomas de toxidez do Al na parte aérea, geralmente, caracterizam-se pela deficiência de nutrientes como P, Ca, Mg, K devido o metal afetar a permeabilidade da membrana plasmática prejudicando o transporte e o uso destes nutrientes, consequentemente, diminuindo a produção de matéria seca (KOCHIAN; PIÑEROS; HOEKENGA, 2005; RIBEIRO et al., 2013).



Figura 3- Sintomas de deficiência de potássio: (A₁) controle; (A₂) 5 mg L⁻¹ de Al; (A₃) 10 mg L⁻¹ de Al; (A₄) 20 mg L⁻¹ de Al; (A₅) 40 mg L⁻¹ de Al.

2.3.2 Altura e matéria seca

Os resultados de altura das plantas e matéria seca apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$), à adição de Al na solução nutritiva. O modelo de regressão linear foi o que melhor se ajustou à relação altura e concentração de Al mostrando uma relação diretamente proporcional a adição de Al na solução nutritiva (Figura 4A).

O incremento em altura nas plantas com Al pode estar relacionado com a concentração de carboidratos das plantas de paricá, uma vez que os resultados mostraram que a concentração do carboidrato sacarose aumentou nas plantas de paricá conforme o aumento da concentração do Al na solução nutritiva. Na maioria das plantas a sacarose é o principal açúcar exportado dos locais de síntese para as regiões de consumo onde é utilizado para o crescimento das plantas (KINGSTON-SMITH; WALKER; POLLOCK, 1999).

Apesar do aumento em altura, a produção de matéria seca da parte aérea não seguiu a mesma tendência. O modelo de regressão que melhor se ajustou à relação produção de matéria seca e concentração de Al foi o modelo polinomial quadrático, sendo observado uma tendência decrescente da produção de matéria seca na parte aérea com a adição do Al no meio de crescimento, enquanto que na raiz ocorre comportamento contrário, apresentando uma tendência crescente do peso da matéria seca da raiz (Figura 4B).

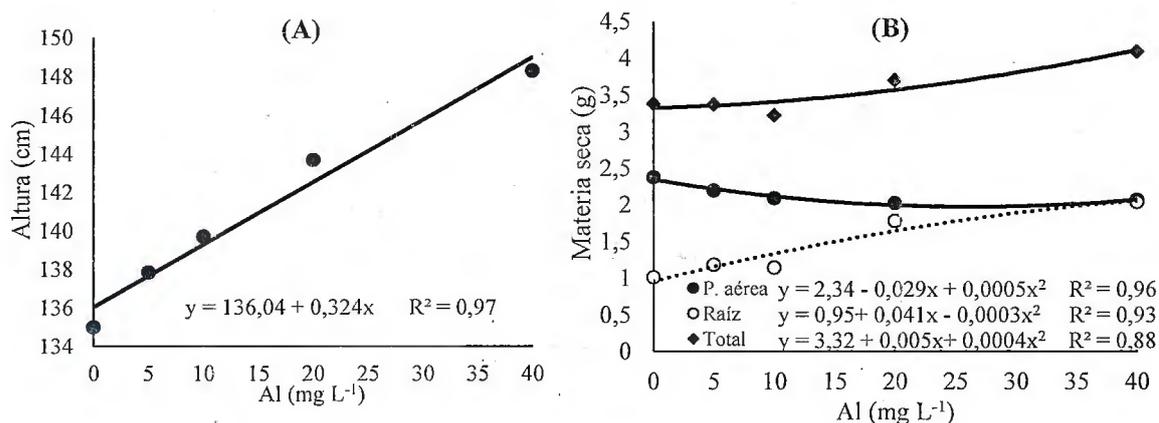


Figura 4- Crescimento em altura (cm) e peso da matéria seca da parte aérea, da raiz e total (g) de mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al (mg L⁻¹).

O aumento da produção de matéria seca na raiz pode estar relacionada a baixa disponibilidade de nutrientes para as plantas, devido o Al interferir na absorção de nutrientes (ABICHERQUER et al., 2003). As plantas de paricá sob estresses podem ter priorizado o desenvolvimento do sistema radicular para possibilitar maior absorção de água e de elementos minerais na presença de alumínio.

Geralmente o P tem sua disponibilidade afetada pelo Al e algumas plantas respondem a baixas concentrações de P com o aumento da densidade do sistema radicular, pois o incremento da massa radicular aumenta a habilidade da planta em acessar e absorver o P (GRANT et al., 2001), este fato também pode ter contribuído para o crescimento radicular das plantas de paricá.

2.3.3. Teor e acúmulo de macronutrientes

As concentrações de Al influenciaram significativamente ($p < 0,05$) os teores e o acúmulo de macronutrientes nas plantas de paricá, exceto para o teor de Mg na raiz. Na maioria dos casos, os teores de macronutrientes na parte aérea foram mais afetados do que aqueles na raiz e os macronutrientes mostram uma tendência a se acumular nas raízes e reduzir o acúmulo na parte aérea conforme a adição do Al na solução nutritiva. Em mudas de goiabeira (*Psidium guajava* L.), Salvador et al. (2000) observaram que altas concentrações de Al prejudicaram o transporte de P, Ca, Mg para a parte aérea.

O Al pode inibir a atividade da H⁺-ATPase da membrana plasmática, impedindo a formação e a manutenção do gradiente transmembranar H⁺, que serve como principal força motriz para o transporte de íons, o que explicaria o baixo teor de macronutrientes na parte aérea

em comparação com o teor encontrado na raiz (KOCHIAN; PIÑEROS; HOEKENGA, 2005; RIBEIRO et al., 2013).

O modelo de regressão que melhor se ajustou ao teor e acúmulo de N em função da concentração de Al foi o linear. Na parte aérea observa-se uma tendência linear decrescente no teor e no acúmulo de N conforme a adição do Al na solução nutritiva, enquanto que nas raízes de paricá ocorreu comportamento inverso, com um aumento linear no teor e no acúmulo do nutriente (Figura 5AB).

Alguns trabalhos têm demonstrado o efeito negativo do Al sobre a absorção de nitrogênio na forma de nitrato (NO_3^-) em diversas espécies de plantas (DURIEUX et al., 1993; DA CRUZ et al., 2011; DA CRUZ; ALMEIDA; DOS SANTOS, 2014). Entretanto, os resultados do acúmulo de N e a concentração de nitrato nas raízes de paricá permitem sugerir que não houve interferência do Al na absorção de N e que o processo de assimilação ocorre preferencialmente nas raízes. Uma hipótese para a absorção do nitrato é que o Al se ligaria a fosfolipídios da membrana plasmática, formando uma camada de carga positiva que facilitaria a passagem de ânions por essa membrana. Uma camada de carga positiva retardaria o movimento de cátions e aumentaria o movimento de ânions como o nitrato (NICHOL et al., 1993; JUSTINO et al., 2006)

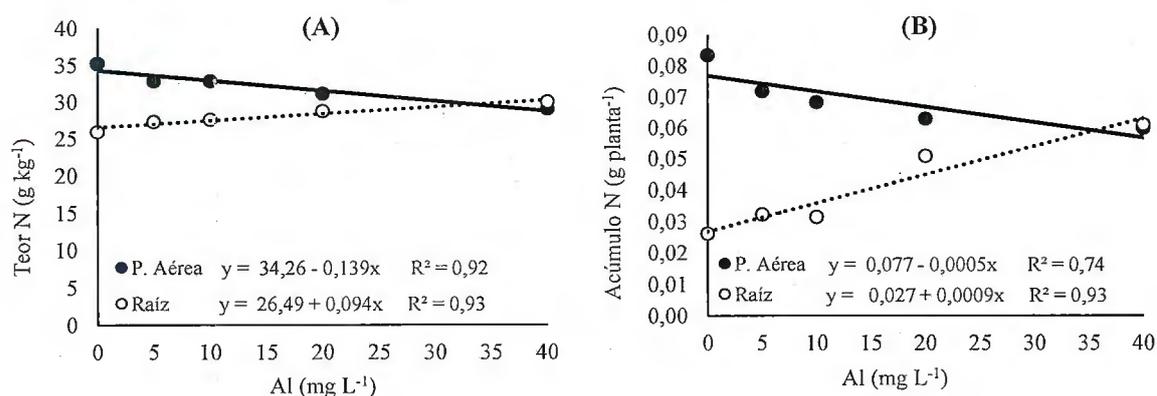


Figura 5- Teor (g kg^{-1}) e acúmulo (g planta^{-1}) de nitrogênio (N) na matéria seca de mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações e Al (mg L^{-1}).

Os resultados também mostram um aumento gradativo no teor e no acúmulo de P nas raízes de paricá, quando expostas ao Al. O teor de P nas raízes aumentou até a concentração de 20 mg L^{-1} . Na parte aérea observa-se uma diminuição no teor e no acúmulo de P, com exceção para o tratamento de 5 mg L^{-1} de Al, onde o teor do mineral apresentou-se maior na parte aérea, assim como, o controle (Figura 6AB).

O alto teor e acúmulo de P nas raízes de paricá pode ter ocorrido pela formação de complexos P-Al, que retém o P em formas menos disponíveis nas superfícies das raízes e/ou nos tecidos da raiz, o que reduz a translocação do P para a parte aérea e sua disponibilidade para a planta (CHEN et al., 2012). Este complexo P-Al é considerado por alguns autores um fator importante da tolerância de plantas ao Al devido à precipitação do metal e por prevenir os efeitos deletérios deste em outros órgãos (MATTIELLO et al. 2008; JIANG et al., 2009; STEINER et al., 2012), mas, no presente estudo, o metal prejudicou o transporte de nutrientes e o metabolismo da planta.

Steiner et al. (2012) estudando o efeito do Al em plantas jovens de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) relataram comportamento semelhante ao observado no paricá, com grande acúmulo de P e Al na raiz e baixa translocação para a parte aérea.

O teor de Ca apresentou um comportamento linear decrescente na parte aérea e na raiz conforme a adição de Al no meio de crescimento. Na raiz observa-se um crescimento linear do acúmulo de Ca a partir da concentração de 20 mg L⁻¹ de Al (Figura 6CD), entretanto o elemento tendeu a se acumular na parte aérea, apesar de apresentar um decréscimo com a adição do Al na solução nutritiva.

O Al tem efeitos inibidores na absorção de Ca devido à substituição do Ca pelo Al nos sítios de troca das paredes celulares (KOCHIAN; PIÑEROS; HOEKENGA, 2005). O Ca é essencial para a integridade estrutural e permeabilidade das membranas, e vem geralmente ligado à carga negativa dos fosfolipídios da membrana, conferindo a fluidez necessária para o transporte de íons. Assim, o deslocamento do Ca e as interações com o Al pode modificar a estrutura da membrana plasmática bem como o ambiente iônico perto da superfície da célula o que pode prejudicar a absorção e o transporte de íons (CRISTANCHO et al., 2014; RIBEIRO et al., 2013).

O teor de Mg na raiz foi superior ao da parte aérea nos tratamentos com Al, mas seus teores na raiz não apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$). O modelo polinomial quadrático foi o que melhor se ajustou a relação para do teor e do acúmulo de Mg em função da concentração de Al. O acúmulo de Mg na parte aérea e na raiz apresentou diferença significativa, onde as plantas submetidas a 20 e 40 mg L⁻¹ de Al acumularam o Mg na raiz (Figura 6EF). O Al prejudica o transporte do Mg devido se ligar aos sítios específicos de Mg e sobre as proteínas de transporte, substituindo o Mg, devido possuírem raios iônicos similares (TECCHIO et al., 2005; RENGEL; ROBINSON, 1989).

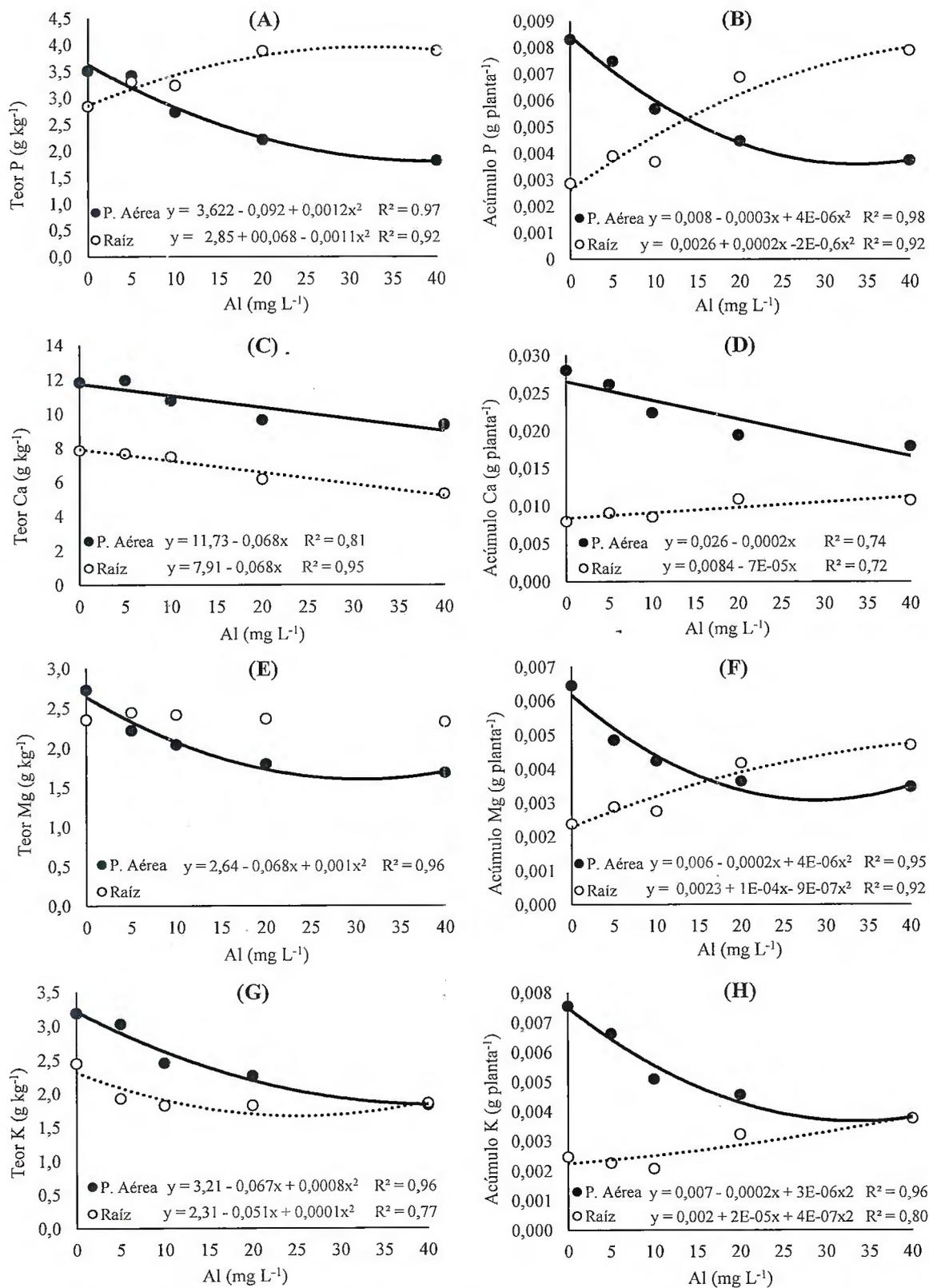


Figura 6- Teor (g kg⁻¹) e acúmulo (g planta⁻¹) de fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) na matéria seca de mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações e Al (mg L⁻¹).

Para o teor de K o modelo polinomial quadrático foi o que melhor se ajustou ao teor do nutriente em função da concentração do Al. Com a adição do Al na solução nutritiva observava-se um decréscimo no teor de K na parte aérea e na raiz das plantas de paricá. O K acumulou-se na parte aérea apresentando uma tendência linear decrescente, e comportamento inverso na raiz (Figura 6GH). O Al pode bloquear os canais de K e dificultar sua absorção, além de inibir seus transportadores (GIANNAKQULA et al., 2008; MOSSOR-PIETRASZEWSKA, 2001).

2.3.4 Teor e acúmulo de micronutrientes

As concentrações de Al no meio de crescimento das plantas de paricá influenciaram de forma significativa ($p < 0,05$) o teor e o acúmulo de micronutrientes em alguma ou em todas as partes da planta avaliadas. Somente o teor de Zn permaneceu constante e não apresentou diferença entre os tratamentos (Figura 7).

Dentre os micronutrientes avaliados, o teor de Fe apresentou diferença significativa ($p < 0,05$), com uma diminuição linear do teor do micronutriente com a adição do Al em todas as partes da planta. O elemento tendeu a se acumular nas raízes do paricá apesar de não apresentar diferença significativa (Figura 7AB). De acordo com os resultados obtidos por Alam e Adams (1979) e Lemos Filho (1982), menores teores de Fe em plantas submetidas a níveis tóxicos de Al, resultam da inibição do processo de redução do íon férrico (Fe^{3+}) a ferroso (Fe^{2+}) na superfície radicular, condição essencial para a absorção deste íon, fato que pode estar relacionado a diminuição do teor de Fe nas raízes de paricá.

Para o teor e o acúmulo de Cu na raiz o modelo polinomial quadrático foi o que melhor se ajustou a relação com o Al. O Cu tendeu a se acumular na raiz e o teor do elemento na raiz apresentou uma tendência decrescente a partir da concentração de 10 mg L^{-1} de Al, enquanto que a parte aérea não houve diferença significativa ($p < 0,05$) (Figura 7CD). Isto ocorreu porque em situações de estresse ou baixa disponibilidade de Cu as plantas tendem a acumular o elemento nas raízes, sendo somente transportado para a parte aérea, conforme a necessidade da planta (TABALDI et al., 2009).

O Al não influenciou de forma significativa o teor de Zn na planta e o elemento tendeu a se acumular na parte aérea. O acúmulo de Zn no paricá apresentou diferença significativa onde o modelo polinomial quadrático foi o que melhor se ajustou a relação Zn e Al, com uma diminuição do acúmulo de Zn na parte aérea até a concentração de 20 mg L^{-1} de Al e com aumento do acúmulo nas concentrações acima de 10 mg L^{-1} de Al (Figura 7F).

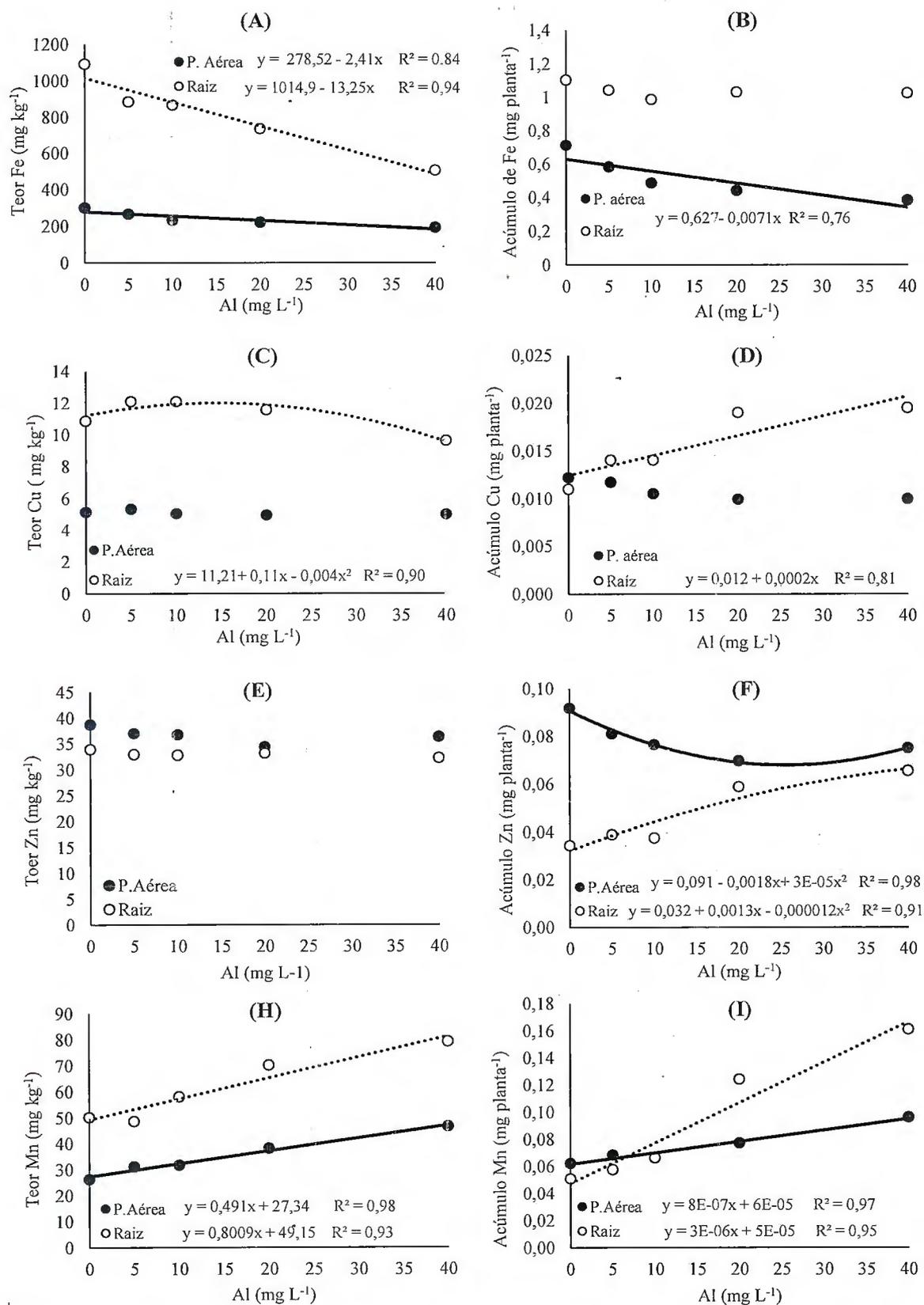


Figura 7- Teor (mg kg⁻¹) e acúmulo (mg planta⁻¹) de micronutrientes na matéria de mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al (mg L⁻¹).

O teor e o acúmulo de Mn nas plantas de paricá apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) e o modelo de regressão que melhor se ajustou a relação do teor e do acúmulo em função da concentração de Al foi o linear, com uma tendência crescente conforme a adição do Al no meio de crescimento das plantas. O Mn se acumulou nas raízes nos tratamentos a partir de 20 mg L^{-1} de Al (Figura 7 HI). Esse aumento do teor de Mn pode ser devido ao pH da solução nutritiva, pois em pH baixo (ácido), sua forma absorvida (bivalente) pode ser abundante, aumentando sua absorção pelas plantas (LOMBI et al., 2002; DECHEN; NACHTIGALL, 2006).

2.3.5. Teor e acúmulo de alumínio

O teor e o acúmulo de Al apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) e os resultados mostram uma tendência linear crescente do teor de Al principalmente na raiz, onde o metal tendeu a se acumular sendo pouco translocado para a parte aérea, que apresentou baixos níveis do elemento independente da concentração utilizada, havendo diferença apenas quando comparados com o controle (Figura 8).

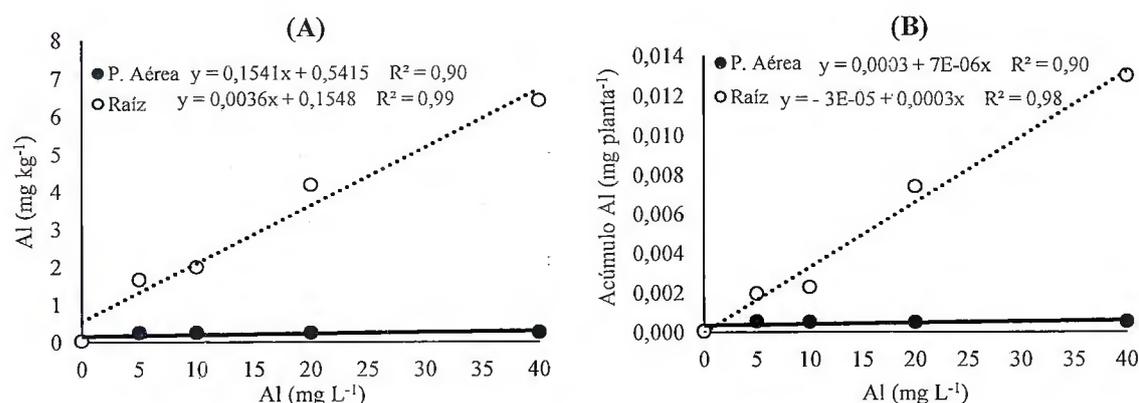


Figura 8- Teor (mg kg^{-1}) e acúmulo (mg planta^{-1}) de alumínio (Al) na matéria de mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al (mg L^{-1}).

É provável que parte do Al contido nos tecidos radiculares seja devido sua precipitação com parte do P absorvido (Al-P) (KOCHIAN; PIÑEROS; HOEKENGA, 2005), assim aumentando o teor do metal nas raízes e diminuindo sua translocação para a parte aérea. A parede celular também é um sítio de acúmulo do Al devido à forte ligação dos constituintes da pectina. O elemento pode deslocar o cálcio da parede celular das raízes e ficar fixado nas paredes (RENGEL, 1992), o que, também, justificaria o acúmulo do Al nas raízes de paricá.

2.3.6. Variáveis Bioquímicas

2.3.6.1 Nitrato

As concentrações de nitrato da parte aérea e da raiz, apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) e o modelo de regressão que melhor se ajustou aos dados da relação nitrato em função da concentração de Al foi o linear (Figura 9A). Na parte aérea observa-se uma tendência linear decrescente na concentração de nitrato conforme o aumento do Al na solução, tendo uma queda de 44% no tratamento de 40 mg L^{-1} de Al em comparação ao controle. Já na raiz, o aumento do nitrato foi diretamente proporcional ao do Al, com a maior concentração de nitrato na presença de 40 mg L^{-1} de Al.

A alta concentração de nitrato nas raízes pode indicar que o Al interfere na atividade da enzima redutase do nitrato (NR), responsável pela assimilação do nitrato. A ativação da NR ocorre através da desfosforilação de um resíduo serina chave da enzima. O Al pode afetar os controles pós-translacionais, incluindo fosforilação. O elemento tóxico inibe a transcrição do gene da NR e diminuir a estabilidade do RNAm da enzima. Além disso, Al prejudica os transportadores do NO_3^- no sistema (DURIEUX et al., 1993; KOCHIAN, 2003). A baixa disponibilidade de ferro também pode ter interferido na atividade da NR, pois esta enzima é um homodímero constituído por duas subunidades e cada uma contendo um cofator heme-Fe no centro de sua estrutura que atua como doadora de elétrons (CAMPBELL, 1999).

A absorção e a redução do nitrato podem ser importantes componentes do mecanismo de tolerância ao Al (PIMENTA; CAMBRAIA; ESTEVÃO, 1989). Trabalhos de comparativos entre plantas susceptíveis e tolerantes ao Al têm indicado que pelo menos alguma etapa da aquisição ou do metabolismo do N pode estar envolvido com a tolerância das plantas ao Al (JUSTINO et al., 2006; PIMENTA; ZHAO; SHEN, 2013).

2.3.6.2. Amônio livre

O Al influenciou significativamente ($p < 0,05$) as concentrações de amônio da nas plantas de paricá. Na raiz observa-se um aumento linear crescente da concentração de amônio conforme o acréscimo de Al, onde as plantas tratadas com o metal apresentaram concentrações de amônio superiores a da parte aérea. Na parte aérea ocorreu um decréscimo linear da concentração de amônio com a adição do metal (Figura 9B).

Segundo Balestrasse et al. (2006), o Al interfere na atividade das enzimas responsáveis pela assimilação do NH_4^+ , o que justificaria as altas concentrações do amônio nas raízes de paricá. O mesmo autor relata que o Al pode causar uma modificação oxidativa na sintetase da glutamina (GS) comprometendo a função da enzima. O metal também compromete a atividade da desidrogenase do glutamato (GDH), pois induz uma mudança conformacional na enzima, ocasionada por uma ligação com o Al (PÉCSVÁRADI et al., 2009). Além disso, o metal fitotóxico exerce efeitos indiretos sobre a assimilação de NH_4^+ , causados pela variação nos níveis dos diversos metabólitos que regulam as atividades enzimáticas, como a absorção e utilização de nutrientes que atuam como co-fator, como por exemplo o Mg^{2+} (PIMENTA et al., 1989).

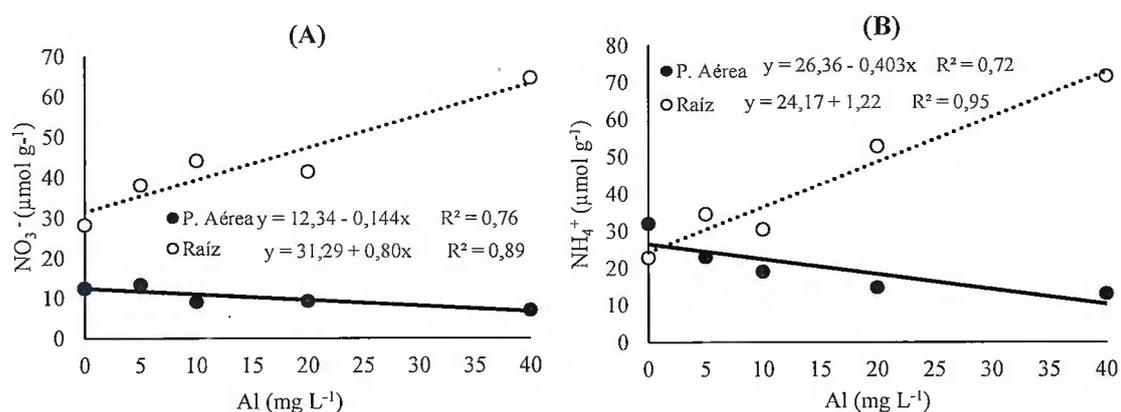


Figura 9- Concentração de amônio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) em mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al (mg L^{-1}).

As plantas sob 20 e 40 mg L^{-1} de Al apresentaram clorose intensa das folhas mais velhas e diminuição da matéria seca da parte aérea. Esses sintomas podem estar relacionados as altas concentrações de amônio nas raízes, que pode ter ocasionado toxidez nas plantas (Figura 10). O amônio é liberado por tecidos vegetais durante o processo natural de senescência e devido o estresse oxidativo causado pelo Al nas raízes das plantas culmina num aumento do nível de NH_4^+ provocando a senescência precoce (LOULAKAKIS; ROUBELAKIS-ANGELAKIS; KANELIS, 1994).



Figura 10- Sintomas de toxidez de Al em mudas de *Schizolobium amazonicum*. (A) 20 mg L⁻¹ de Al; (B₁₂) 40 mg L⁻¹ de Al.

2.3.6.3 Aminoácido

A concentração de aminoácidos solúveis totais apresentou diferença significativa ($p < 0,05$), tanto na parte aérea quanto na raiz, a concentração de aminoácido apresenta um comportamento linear decrescente a partir da concentração de 10 mg L⁻¹ de Al (Figura 11A). A diminuição da síntese de proteínas pode ter sido prejudicada devido a interferência do Al no metabolismo do nitrogênio. O N é o elemento principal na síntese de aminoácidos, pois o produtos final do processo de assimilação do elemento são os aminoácidos (AMARAL; CORDEIRO; RENA, 2000; VERBRUGGEN; HERMANS, 2008).

2.3.6.4 Proteínas solúveis totais

A concentração de proteínas solúveis totais na parte aérea e na raiz apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$), pelo Teste F, na presença do Al. O modelo polinomial de segundo grau foi o que melhor se ajustou para a relação entre a concentração de proteínas em função do Al, onde nota-se uma tendência decrescente na síntese proteica na parte aérea até a concentração de 20 mg L⁻¹ de Al (Figura 11B).

O Al interfere na disponibilidade de P, que compõe a molécula de ATP e ADP, o que pode ter prejudicado o de fornecimento energia para a síntese de proteínas (AMARAL; CORDEIRO; RENA, 2000; VERBRUGGEN; HERMANS, 2008). A baixa concentração de alguns nutrientes, como o K e Mg, que participam da síntese protéica atuando diretamente no processo de incorporação dos aminoácidos em peptídeos pode ter contribuído para a diminuição da a concentração de proteínas. O Al também pode interagir com os polifosfatos de DNA, o que poderia interferir na replicação do DNA, prejudicando a síntese proteica, além de reduzir a

replicação do DNA devido a aumentar a rigidez da dupla hélice (MOSSOR-PIETRASZEWSKA, 2001; KOCHIAN, 2003; BASSO et al., 2003; SADE et al., 2016).

2.3.6.5 Carboidratos

A concentração de carboidratos apresentou diferença significativa ($p < 0,05$), pelo teste F, apenas na raiz, onde o modelo de regressão que melhor se ajustou a relação carboidratos em função do Al foi o linear com uma tendência decrescente da concentração de carboidratos a partir da concentração de 5 mg L^{-1} de Al. Na parte aérea não houve diferença na concentração de carboidratos (Figura 11C).

O baixo teor e disponibilidade de nutrientes pode prejudicar a taxa fotossintética responsável pela produção de carboidratos, principal substrato para a respiração das plantas. A baixa na disponibilidade de P pode ter interferido na atividade das enzimas de fosforilação prejudicando a produção de energia em forma de ATP. Os íons como Fe e Mg participam diretamente do processo de fotossíntese, o Fe como cofator, doador de elétrons, e o Mg ativa a enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (rubisco) responsável pela fixação do CO_2 , além de fazer parte da estrutura da molécula de clorofila (EPSTEIN; BLOOM, 2006; KLUGE; TEZOTTO-ULIANA; DA SILVA, 2015). Esses fatores podem ser relacionados a diminuição da concentração de carboidratos totais solúveis nas plantas, além disso a diminuição pode estar relacionada a degradação das reservas de amido, pois em raízes expostas ao Al ocorre um maior consumo de energia (GREVENSTUK et al., 2015).

2.3.6.6 Amido e Sacarose

O Al influenciou de forma significativa ($p < 0,05$) as concentrações de amido e sacarose nas plantas de paricá. O modelo de regressão polinomial de segundo grau foi o que melhor se ajustou a relação do amido e da sacarose com o Al. Observa-se uma tendência decrescente na concentração de amido conforme o aumento do Al. Os resultados também mostram uma tendência crescente na concentração de sacarose conforme o aumento do Al na solução nutritiva (Figura 11DE).

Em resposta ao estresse causado pelo metal as plantas de paricá utilizaram o amido para tentar ajustar seus processos metabólicos em curto prazo. O amido é a principal fonte de reserva das plantas, mas não pode ser translocado precisando ser quebrado. Em plantas sob estresse, o amido é degradado, e ocorre uma redução em sua quantidade devido a atividade da amilase.

Essa redução é acompanhada por um aumento da quantidade de açúcares solúveis redutores (glicose), que são transportados para outras partes da planta (KINGSTON-SMITH; WALKER; POLLOCK, 1999). O amido também pode ser quebrado e transformado em sacarose e distribuído para outras partes da plantas para ser utilizado em diversos processos metabólicos (TAIZ; ZEIGER, 2013). Kingston-Smith (1999) também relata que na maioria das plantas, a sacarose é o principal açúcar exportado dos locais de síntese para as regiões de consumo onde é utilizada para o crescimento, pois a hidrólise da sacarose fornece açúcares redutores. A partir disso o paricá pode ter aumentado a produção e acumulado parte da sacarose produzida como uma segunda fonte de reserva da planta.

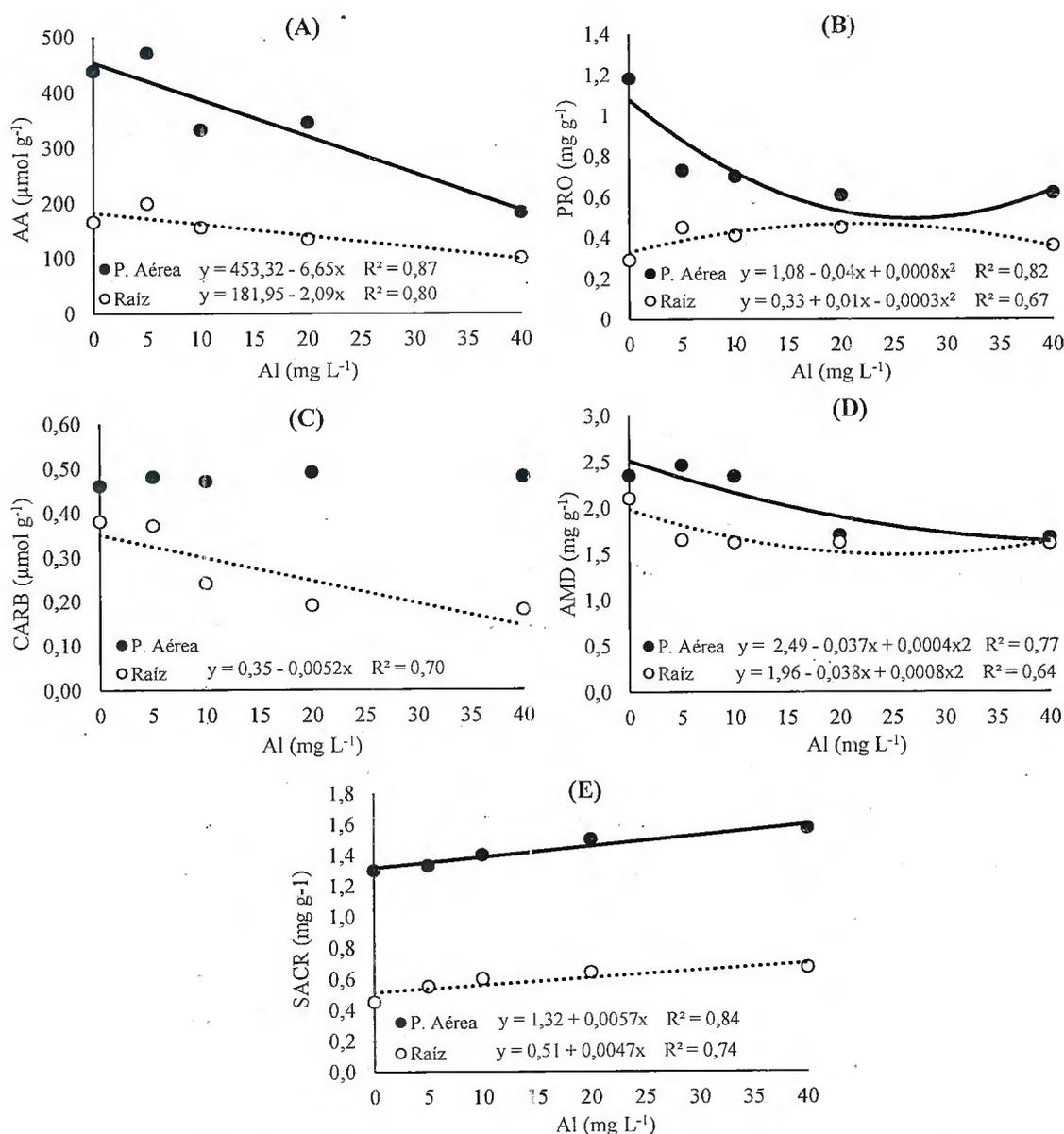


Figura 11- Concentração de aminoácido totais solúveis (AA), proteína (PRO), carboidratos totais (CARB), amido (AMD) e sacarose (SACR) em mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al (mg L^{-1}).

2.3.6.7 Prolina e Glicina betaína

A concentração de prolina e glicina betaína apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$), sob concentrações de Al na solução. O modelo de regressão linear mostra uma tendência decrescente da concentração de prolina conforme o aumento do Al na solução (Figura 12A). Para a concentração de glicina betaína o modelo polinomial quadrático foi o que melhor se ajustou a relação com o Al apresentando uma tendência crescente conforme a adição do metal no meio de crescimento das plantas (Figura 12B).

Em resposta a estresses ambientais, incluindo o Al^{3+} , as plantas podem acumular os aminoácidos prolina e/ou glicina betaína e sua concentração é usada para identificar a tolerância ou resistência das plantas a esses fatores (CHEN; MURATA, 2008; SRINIVAS; BALASUBRAMANIAN, 1995). Embora tenha sido sugerido que a prolina pode proteger as plantas da toxicidade de metais, por meio do ajuste osmótico celular e estabilização de macromoléculas e organelas (ASHRAF; FOOLAD, 2007; TALEBI et al., 2014), neste estudo o mecanismo não está envolvido na proteção das plantas. Houve uma diminuição do aminoácido com o aumento do Al na solução nutritiva, indicando que o elemento afeta uma possível estratégia das plantas de utilizar a prolina como um agente de atenuação de tensões induzidas pelo metal.

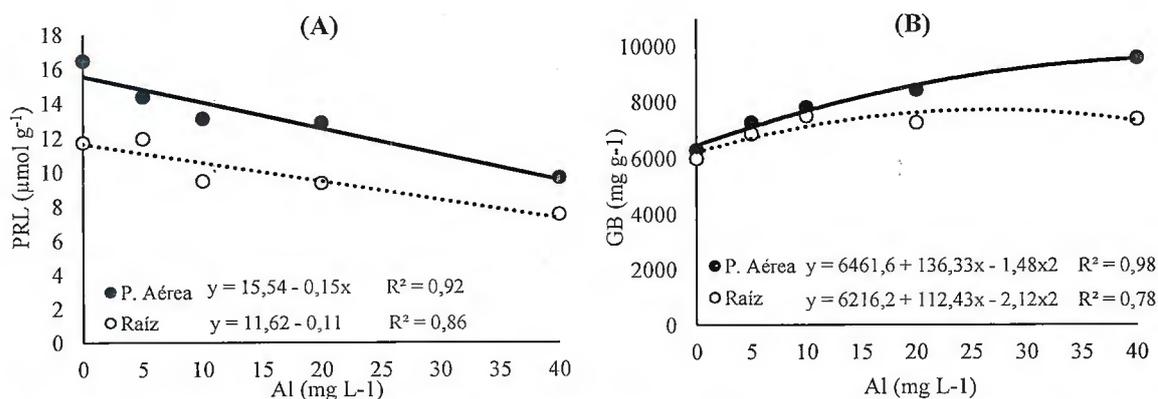


Figura 12- Concentração de prolina (PRL) e glicina betaína (GL) na parte aérea e raízes das mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob concentrações de Al ($mg L^{-1}$).

O aumento na concentração de glicina betaína nas plantas tratadas com Al pode ser uma possível estratégia para amenizar o efeito fitotóxico do metal na planta. O aumento na produção de glicina melhora a tolerância das plantas a vários estresses abióticos, proporcionando uma abordagem viável para melhorar a produção de rendimento estável em condições desfavoráveis (ASHRAF; FOOLAD, 2007). Ela atua na proteção da maquinaria fotossintética, reduz os níveis

de espécies reativas de oxigênio (ROS), ajuste osmótico, manutenção do pH celular, além da proteção da membrana plasmática (CHEN; MURATA, 2008; WANI et al., 2013).

Apesar do aumento da concentração de glicina betaína, da produção de matéria seca na raiz, baixa translocação de Al para a parte aérea e da absorção de alguns nutrientes não terem sido muito prejudicados pela ação do Al na solução nutritiva, as plantas apresentaram distúrbios metabólicos principalmente nas concentrações acima de 10 mg L⁻¹ de Al. A concentração e o tempo de exposição ao Al, entre outros possíveis fatores experimentais (pH, concentração de Al), influenciam fortemente as respostas das plantas e, portanto, devem ser rigorosamente controlados e relatados na descrição experimental (JUSTINO et al., 2006; GIANNAKOULA et al., 2008). Assim, a disponibilidade diária do elemento, as condições controladas de pH, podem ter acentuado o efeito fitotóxico do elemento influenciando nas estratégias de sobrevivência das plantas.

2.5 Conclusão

Sob estresse de Al, as plantas priorizaram o desenvolvimento do sistema radicular e tenderam a aumentar o acúmulo de macronutrientes na raiz, conforme o aumento da concentração do Al na solução nutritiva. A toxidez do Al provoca distúrbios metabólicos como a diminuição da produção de aminoácidos, proteínas e carboidratos. Há estímulo da produção de glicina betaína como estratégia para amenizar os efeitos fitotóxicos do metal, porém não sendo totalmente eficaz. Na sua fase inicial de crescimento, o paricá não apresenta tolerância à presença de Al no meio de cultivo, apresentando sintomas de déficit nutricional partir de 5 mg L⁻¹ de Al.

REFERENCIAS

ALAM, S.M.; ADAMS, W.A. Effects of aluminium on nutrient composition and yield of oats. **Journal of Plant Nutrition**, v. 1, p. 365-75, 1979.

AMARAL, J. A. T.; ANTONIO, T. C.; RENA, A. B. efeitos do alumínio, nitrato e amônio sobre a composição de metabólitos nitrogenados e de carboidratos em *Stylosanthes guianensis* e *S. macrocephala*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 2, p. 313-320, fev. 2000.

ALMEIDA, D. H. et al. Caracterização completa da madeira da espécie amazônica paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.37, n.6, p.1175-1181, 2013.

AMATA. Revisão sobre paricá: *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke. 2009. Disponível em: < www.amatabrasil.com.br/download-arquivo?id=1028>. Acesso em: 12 agosto 2015.

ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 59, n. 2, p. 206–216, 2007.

AZMAT, R.; KHAN, N. Nitrogen metabolism as a bio indicator of cu stress in *Vigna radiata*. **Pakistan Journal of Botany**, v. 43, n. 1, p. 515–520, 2011.

BASSO, L. H. M. et al. Aluminum effect on *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* shoots growth in vitro. **Scientia Forestalis**, p. 167–177, 2003.

BATES, L. S., WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.

BALESTRASSE, K.B.; GALLEGRO, S. M.; TOMARO, M. L. Aluminium stress affects nitrogen fixation and assimilation in soybean (*Glycine max* L.). **Plant Growth Regulation** v. 48, p. 271–281, 2006.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Anal Biochem**, v. 72, p. 248-254, 1976.

CAMPBELL W. H. Nitrate reductase structure, function and regulation: Bridging the Gap between Biochemistry and Physiology. **Plant Physiologic**, v. 50, p. 277–303, 1999.

CARMO, C. A. F. S.; ARAÚJO, S. W.; BERNARDI, A. C. C.; SALDANHA, M. S. C. Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos. **Embrapa Solos**, Rio de Janeiro, Circular Técnica 6, dez. 2000.

CHEN, R. F. et al. Aluminium-phosphorus interactions in plants growing on acid soils: Does phosphorus always alleviate aluminium toxicity? **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 92, n. 5, p. 995–1000, 2012.

CHEN, T. H. H.; MURATA, N. Glycinebetaine: an effective protectant against abiotic stress

in plants. **Trends in Plant Science**, v. 13, n. 9, p. 499–505, 2008.

CRISTANCHO, R. J. A. et al. Aluminum Speciation of Amended Acid Tropical Soil and Its Effects on Plant Root Growth. **Journal of Plant Nutrition**, p. 811–827, 2014.

DA CRUZ, F. J. R. et al. Aluminum negative impact on nitrate reductase activity, nitrogen compounds and morphological parameters in sorghum plants. **Australian Journal of Crop Science**, v. 5, n. 6, p. 641–645, 2011.

DA CRUZ, F. J. R.; ALMEIDA, H. J.; DOS SANTOS, D. M. M. Growth, nutritional status and nitrogen metabolism in *Vigna unguiculata* (L.) Walp is affected by aluminum. **Australian Journal of Crop Science**, v. 8, n. 7, p. 1132–1139, 2014.

DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.327-354.

DEMATTÊ, J. L. I.; DEMATTÊ, J. A. M. Comparações entre as propriedades químicas de solos das regiões da floresta amazônica e do cerrado do Brasil Central. **Scientia Agricola**, v. 50, n. 2, p. 272–286, 1993.

DE MELO, R. R. et al. Avaliação das propriedades físicas, químicas, mecânicas e de superfície de lâminas de paricá (*schizolobium amazonicum huber ex. ducke*). **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 2, p. 238–249, 2013.

DO AMARAL, J. A. T.; CORDEIRO, A. T.; RENA, A. B. Efeitos do alumínio, nitrato e amônio sobre a composição de metabólitos nitrogenados e de carboidratos em *stylosanthes guianensis* e *S. macrocephala*. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 35, n. 2, p. 313–320, 2000.

DUBOIS, M. et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v.28, n.3, p.350-356, 1956.

DURIEUX, R. P. et al. Inhibition of nitrate uptake by aluminium in maize. **Plant and Soil**, v. 151, n. 1, p. 97–104, 1993.

EPSTEIN, E., BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2 ed. Londrina, Editora Planta, 2006, p 58- 102.

FREITAS, F. A. DE et al. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, p. 72–79, 2006.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

GIANNAKOULA, A. et al. Aluminum tolerance in maize is correlated with increased levels of mineral nutrients, carbohydrates and proline, and decreased levels of lipid peroxidation and Al accumulation. **Journal of Plant Physiology**, v.165, p.385-396, 2008.

- GRANT, C.A. et al. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.95, 2001.
- GREVENSTUK, T. et al. Aluminium stress disrupts metabolic performance of *Plantago almogravensis* plantlets transiently. **BioMetals**, v. 28, n. 6, p. 997–1007, 2015.
- GRIEVE, C. M.; GRATTAN S. R. Rapid assay for determination of water soluble quaternary ammonium compounds. **Plant and Soil**, v 70, p 303-307, 1983.
- HARIDASAN, M. Alumínio é um elemento tóxico para as plantas nativas do cerrado? In: PRADO, C. H. B. A.; CASALI, C. A. **Fisiologia Vegetal: práticas em relações hídricas, fotossíntese e nutrição mineral**. Barueri, ed. Manole, 2006, p. 1-10.
- HOAGLAND, D.R.; ARNON, D. I. The water culture method for growing plants without soils. **California Agricultural Experimental Station**, 347p, 1950.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa- BDMEP**. 2015. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 01 novembro 2015.
- JIANG, H. X. et al. Phosphorus alleviates aluminum-induced inhibition of growth and photosynthesis in *Citrus grandis* seedlings. **Physiologia Plantarum**, v. 137, n. 3, p. 298–311, 2009.
- JUSTINO, G. C. et al. Absorção e redução de nitrato em duas cultivares de arroz na presença de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 8, p. 1285–1290, 2006.
- KINGSTON-SMITH, A. H.; WALKER, R. P.; POLLOCK, C. J. Invertase in leaves: Conundrum or control point? **Journal of Experimental Botany**, v. 50, n. 335, p. 735–743, 1999.
- KLUGE, R. A.; TEZOTTO-ULIANA, J. V.; DA SILVA, P. P. M. Aspectos fisiológicos e ambientais da fotossíntese. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 56–73, 2015.
- KOCHIAN, L. V.; PIÑEROS, M. A.; HOEKENGA, O. A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. **Plant and Soil**, v. 274, n. 1–2, p. 175–195, 2005.
- KOCHIAN, L. V. Cellular Mechanisms of Aluminum Toxicity and Resistance in Plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 46, n. 1, p. 237–260, 2003.
- LEMOS FILHO, J.P. **Efeito do alumínio sobre os teores de alguns elementos minerais, sobre a fotossíntese e sobre a atividade de certas oxidases em sorgo (*Sorghum bicolor* L. (Moench))**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha, Viçosa, 1982.
- LOMBI, E. et al. In situ fixation of metals in soils using bauxite residue. **Chemical assessment**, v. 118, p. 435–443, 2002.
- LOULAKAKIS, K. A.; ROUBELAKIS-ANGELAKIS, K. A.; KANELLIS, A. K. Regulation

of glutamate dehydrogenase and glutamine synthetase in avocado fruit during development and ripening. **Plant Physiology**, v. 106, p. 217–222, 1994.

MADARI, B. E. et al. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: TEIXEIRA, W. G. et al. **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, 2009, p. 172-188.

MATTIELLO, E. M. et al. Produção de matéria seca, crescimento radicular e absorção de cálcio, fósforo e alumínio *Porcoffea canephora* e *Coffea arabica* sob influência da atividade do alumínio em solução. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, vol.32, n 1, jan./fev.2008.

MOSSOR-PIETRASZEWSKA, T. Effect of aluminium on plant growth and metabolism. **Acta biochimica Polonica**, v. 48, n. 3, p. 673–686, 2001.

NICHOL, B. E. et al. The Effects of Aluminum on the Influx of Calcium, Potassium, Ammonium, Nitrate, and Phosphate in an Aluminum-Sensitive Cultivar of Barley (*Hordeum vulgare* L.). **Plant physiology**, v. 101, n. 4, p. 1263–1266, 1993.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Porto Alegre, v. 6, n 1, p. 97-111, jan/jun 2004.

PEOPLES, M. B. et al. Methods for evaluating nitrogen fixation by nodulated legumes in the field. **Australian Centre for International Agricultural Research**, Canberra, p. 76, 1989.

PÉCSVÁRADI, A. et al. Chloroplastic glutamine synthetase is activated by direct binding of aluminium. **Physiologia Plantarum**, v. 135, n 1, p. 43-50, 2009.

PIMENTA, J. A. et al. Efeito do alumínio sobre enzimas ligadas à assimilação do nitrogênio em sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Revista Brasileira Fisiologia Vegetal**, v. 1, n 2, p. 169-175, 1989.

ROSSIELLO, R. P.; NETTO, J. J. Toxidez de Alumínio em Plantas: Novos enfoques para um velho problema. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição Mineral de Plantas**. Sociedade Brasileira de Ciências Solos, 2006. p. 377-418.

RENGEL, Z. Role of calcium in aluminum toxicity. **New Phytol**, Australia, v. 121, p 499-513, apr. 1992.

RENGEL, Z.; ROBINSON, D. L. Competitive Al inhibition of net Mg^{2+} uptake by intact *Lolium multiflorum* roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 91, p. 1407-1413, 1989.

RIBEIRO, M. A. Q. et al. Aluminum Effects on Growth, Photosynthesis, and Mineral Nutrition of Cacao Genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 36, n. 8, p. 1161–1179, 2013.

SRINIVAS, V.; BALASUBRAMANIAN, D. Proline is a protein-compatible hydrotrope. **Langmuir**, v. 11, n. 7, p. 2830–2833, 1995.

STEINER, F. et al. Effects of aluminum on plant growth and nutrient uptake in young physic

nut plants. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 5, p. 1779–1788, 2012.

TABALDI, L. A. et al. Micronutrient concentration in potato clones with distinct physiological sensitivity to Al stress. **Ciência Rural**, v. 39, n. 2, p. 379–385, 2009.

TECCHIO, M. A. et al. Avaliação de variáveis fisiológicas em porta-enxertos de videira cultivados em solução nutritiva com a adição de alumínio. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 2, p. 274–283, 2005.

VAN HANDEL, E. Direct microdetermination of sucrose. **Anal Biochem.**, v. 22, p 280-283, 1968.

VERBRUGGEN, N.; HERMANS, C. Proline accumulation in plants: a review. **Amino Acids**, v 35, n4, p. 753–759, 2008.

WEATHERBURN, M. W. Phenol hipochlorite reaction for determination of ammonia. **Analytical Chemistry**, v. 39, p 971-974, 1967.

ZHAO, X. Q.; SHEN, R. F. Interactive regulation of nitrogen and aluminum in rice. v. 2324, n. June, p. 8–10, 2013.

3- ALUMÍNIO EM RAÍZES DE *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke

RESUMO

O paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) é uma espécie madeireira que vem ganhando grande destaque devido sua alta produtividade em curto período de tempo. Seu crescimento pode ser influenciado por fatores abióticos como a saturação por Al no solo, que em pH ácido é tóxico para as plantas e prejudica especialmente o sistema radicular das plantas. O objetivo do estudo foi analisar a presença de alumínio (Al^{3+}) em raízes de paricá cultivado com concentrações de solução nutritiva, por microanálises espectroscópicas de raios-X por dispersão de energia em Microscópio Eletrônico de Varredura. Foram utilizados três tratamentos com 0, 20 e 40 $mg L^{-1}$ de Al, aplicados na forma de cloreto de alumínio ($AlCl_3$). Os resultados mostram que a absorção do alumínio teve um aumento diretamente proporcional a adição do elemento à solução nutritiva. O alumínio tendeu a se acumular na epiderme das raízes (43% do total), diminuindo conforme a proximidade com o cilindro vascular.

Palavras chave: Alumínio; Tecido radicular; Paricá.

ABSTRACT

The paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) is a timber species which has been highlighted due high productivity in short time. The growth can be influenced by abiotic factors such as Al saturation in the soil that at acidic pH is toxic to plants and particularly damaging the root system. The aim of the study was to analyze the presence of aluminum (Al^{3+}) in paricá roots grown with different concentrations of nutrient solution by spectroscopic microanalysis x-ray energy dispersive in Scanning Electron Microscope. The three treatments were: 0, 20 e 40 $mg L^{-1}$, applied in the form of aluminum chloride ($AlCl_3$). The results show that the absorption of aluminum had a directly proportional increase in the addition element in the nutritive solution. The aluminum tended to accumulate in the epidermis of the roots (43% of total), decreasing as the proximity to the vascular cylinder.

KEYWORDS: Aluminum; Root tissue, Paricá

3.1 Introdução

O paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke), pertencente à família Leguminosae, é uma espécie madeireira de rápido crescimento, baixa densidade e sua produtividade pode alcançar de 25 a 30m³/ha/ano (MARQUES et al., 2006). Sua madeira é utilizada na produção de lâminas médias, miolo de compensados, caixotaria leve, portas e vem se mostrando promissor na produção de pasta para celulose (SIVIERO, 2006; CARVALHO, 2007).

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na litosfera, fazendo parte de 8% da composição da crosta terrestre, estando presente em diferentes formas no solo. Quando hidrolisado, adquire a forma trivalente de Al³⁺, predominante em condições ácidas (pH <5,5), tornando-se potencialmente tóxico para as plantas (ROSSIELLO; NETTO, 2006). A maior parte dos solos da Amazônia é ácida, com valores de pH que permitem a ocorrência do íon Al (HARIDASAN, 2008).

A primeira resposta a fitotoxidez de alumínio ocorre na raiz (MALAVOLTA, 2006), que num primeiro momento inibe a expansão e alongamento das células radiculares e, posteriormente, a divisão celular (KOCHIAN, 1995; MATSUMOTO, 2000). Segundo esses autores, em função da fitotoxicidade do metal, as injúrias podem ocorrer também na membrana plasmática, prejudicando a absorção e transporte de água e de nutrientes, e que observar os tecidos nos quais o alumínio se acumula fornece informações úteis para a compreensão dos efeitos tóxicos do elemento.

Em algumas espécies o alumínio pode se acumular na epiderme e causar necrose, prejudicando o desenvolvimento das raízes; no córtex, pode afetar a membrana plasmática e prejudicar o transporte de nutrientes e, no cilindro central, pode ser transportado para a parte aérea e prejudicar as funções metabólicas das plantas (KOPITTKE et al., 2016). Lemos Filho et al. (1997), estudando os efeitos do alumínio no desenvolvimento das raízes de *Leucaena leucocephala*, leguminosa arbórea, mostram que o alumínio se acumula nas células da epiderme e no meristema apical das raízes.

Diante do exposto, o objetivo do estudo foi analisar a presença de alumínio em raízes de paricá, cultivados em solução nutritiva, por microanálises espectrométricas de raios-X por dispersão de energia em Microscópio Eletrônico de Varredura.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Obtenção do material vegetal e condições de crescimento

As plantas foram cultivadas na casa de vegetação da Área de Ciência do Solo, do Instituto de Ciências Agrárias, da Universidade Federal Rural da Amazônia (Belém- PA), durante o período de agosto a outubro de 2015.

Para o estudo foram utilizadas sementes de paricá coletadas no município de Santarém – PA, que passaram por quebra de dormência, com escarificação manual seguida da emersão em água em temperatura ambiente durante 12 horas. As sementes foram semeadas em areia lavada e autoclavada, sendo irrigadas com água destilada. Após 15 dias da emergência foram selecionadas plântulas com aspecto e tamanho similar, transferidas para vasos plásticos com capacidade de 3 L preenchidos com sílica e solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), diluída a 1/2 de força iônica para a adaptação. Passados 30 dias em solução nutritiva, foram aplicados os tratamentos com alumínio.

3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com cinco blocos, onde cada bloco continha uma planta de cada tratamento totalizando cinco repetições, sendo cada planta uma unidade experimental. Para a determinar o acúmulo e localização do alumínio nas raízes foram utilizadas três concentrações de alumínio: 0, 20 e 40 mg L⁻¹, aplicado na forma de cloreto de alumínio (AlCl₃). O pH da solução nutritiva na presença de alumínio foi mantido em 4,8 ± 0,2 e a controle em 5,5 ± 0,2, sendo ajustado a cada dois dias com HCl 0,1 mol L⁻¹ e NaOH 1M.

3.2.3 Análises de espectrometria por energia dispersiva (EDS)

A determinação do alumínio nas raízes foi realizada no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências (IG) da UFPA através de análises de espectrometria por energia dispersiva EDS IXRF modelo Sedona -SD acoplado ao microscópio eletrônico de varredura MEV Zeiss modelo SIGMA-VP pertencente ao Instituto Tecnológico Vale (ITV), cedido em contrato de comodato para a UFPA (Figura 1). As condições de operação foram: corrente do

feixe de elétrons = 80 μ A, voltagem de aceleração constante = 20 kV, distância de trabalho = 8,5 mm, tempo de contagem para análise dos elementos = 30 s.

O sistema possibilita a observação do espectro de raios X através de uma análise qualitativa dos principais constituintes do material que está sendo observado (SANTOS; ZAMPIERON; ZAMPIERON, 2013).



Figura 1- Microscópio eletrônico de varredura (MEV). Fonte: Alexandre Moraes.

Após 45 dias expostas ao alumínio foram coletadas as amostras, sendo selecionadas as raízes primárias das plantas. As amostras foram preparadas no laboratório de Botânica da Empresa Brasileira de Pesquisa na Amazônia (EMBRAPA). O material foi lavado com água destilada e, em seguida desidratado em série etanólica crescente de 10 até 100%, sendo armazenado em álcool 100% (OLIVEIRA, 2015). As amostras foram seccionadas transversalmente e processadas em ponto crítico de CO₂, montadas em suportes metálicos (stubs) através de fita de carbono dupla face e metalizadas com camada de ouro (Figura 2).



Figura 2- Amostras de *Schizolobium amazonicum* e suportes para as amostras (stubs).

Foram analisadas cinco amostras de cada tratamento e obtidos os dados de 30 pontos de cada amostra, divididos entre epiderme, córtex e cilindro central, para a determinação do alumínio (Figura 3).

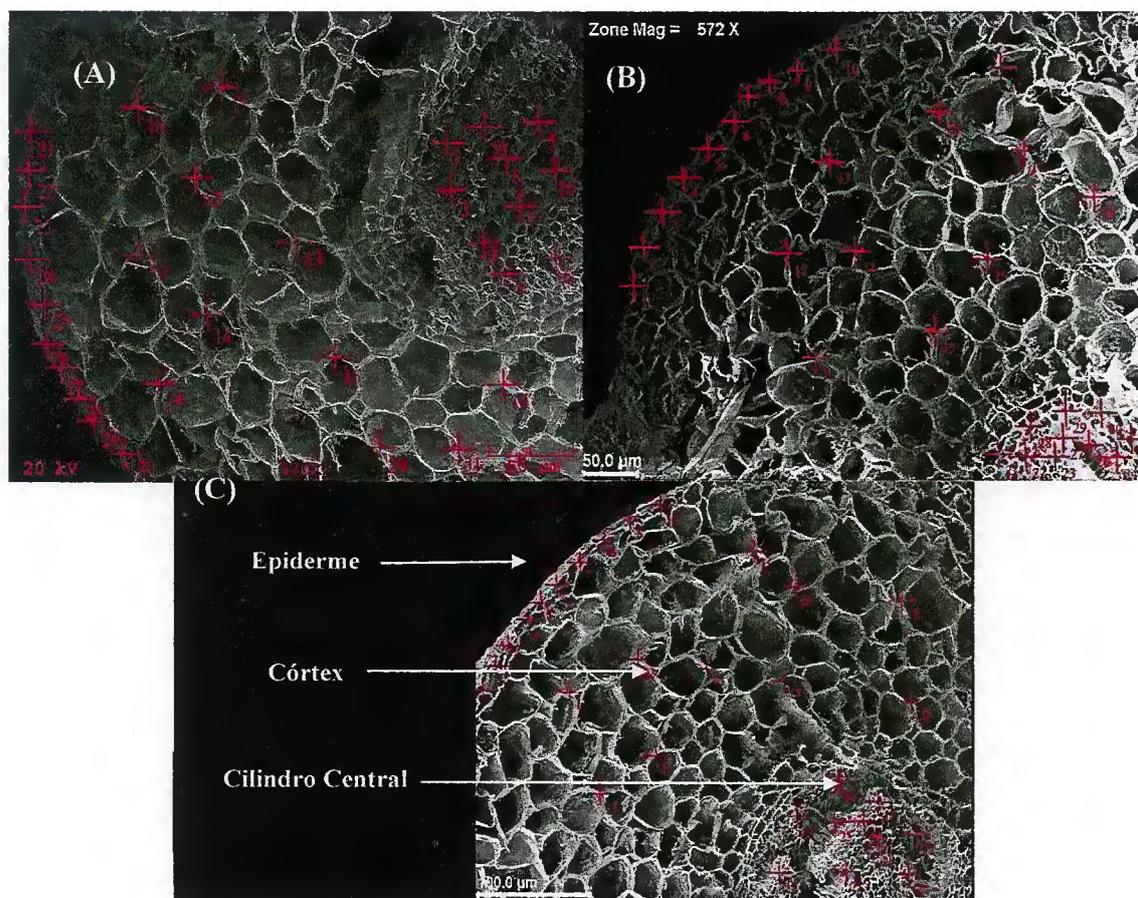


Figura 3- Corte transversal de raízes de *Schizolobium amazonicum* e pontos marcados para a leitura em EDS (Energy Dispersive X-ray Detector). (A) 0 mg L⁻¹ de Al; (B) 20 mg L⁻¹ de Al; 40 mg L⁻¹ de Al.

3.3 Resultados e Discussão

Na ausência de alumínio as raízes apresentaram-se visualmente longas e finas e de coloração mais escura, enquanto que na presença do metal apresentaram um ligeiro engrossamento, coloração castanho claro, aspecto quebradiço, porém, não foi observado redução do crescimento (Figura 4). Segundo Grabski e Schindler (1995), pode ocorrer o enrijecimento da rede de filamentos de actina, provocado pelo metal, e também pode interferir na divisão celular, contribuindo para a ocorrência do engrossamento observado no material objeto desse estudo.

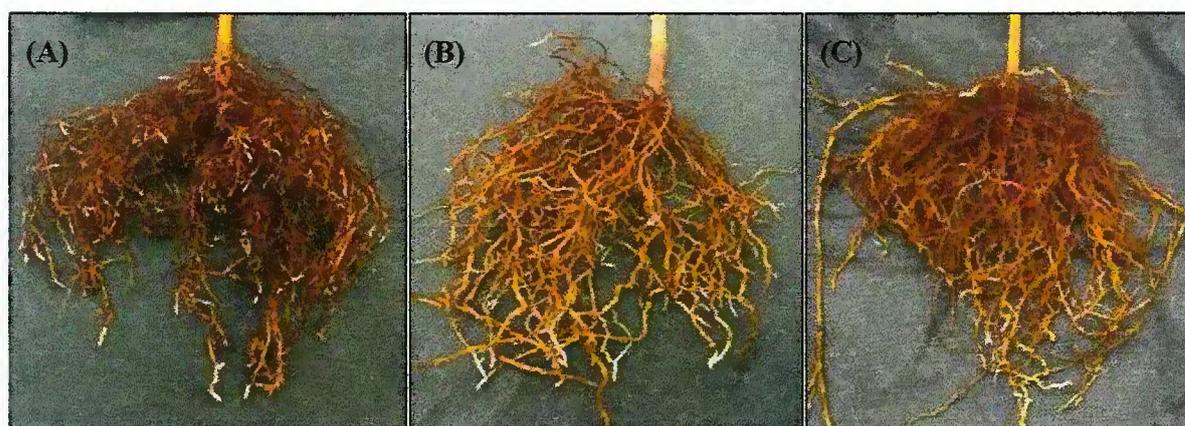


Figura 4- Raízes de *Schizolobium amazonicum*. (A) 0 mg L⁻¹ de Al; (B) 20 mg L⁻¹ de Al; (C) 40 mg L⁻¹ de Al.

Devido à fragilidade do material vegetal ao processo de preparo das amostras não foi possível identificar estruturas como floema, xilema, parênquima, entre outras, através de imagens no microscópio eletrônico de varredura (MEV). As amostras do tratamento controle apresentaram-se mais resistentes ao corte do que as expostas ao alumínio durante o preparo das amostras.

De acordo com as microanálises espectrométricas de raios-X por dispersão de energia (EDS) pôde-se observar que as plantas de paricá absorveram o alumínio presente na solução nutritiva e sua presença nos tecidos foi aumentando conforme o aumento da concentração do elemento (Figura 5). A presença crescente de Al é devido as raízes serem o primeiro local afetado pelo elemento, por estar em contato direto com o solo (RENGEL; 1992), e neste estudo na solução nutritiva.

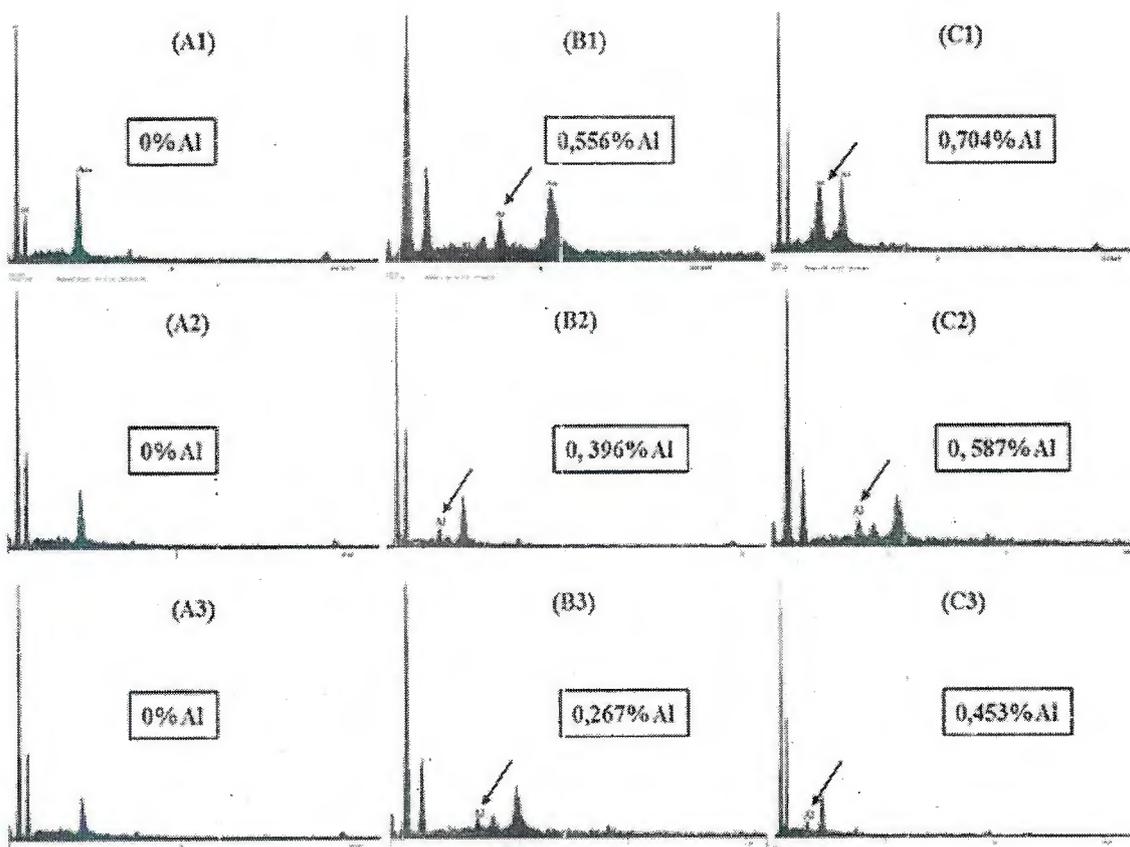


Figura 5- Espectro da análise em EDS e o nível de energia das camadas de alumínio na raiz de *Schizolobium amazonicum*. (A) 0 mg L⁻¹ de Al³⁺; (B) 20 mg L⁻¹ de Al³⁺; 40 mg L⁻¹ de Al³⁺. (1) Epiderme; (2) Córtecx; (3) Cilindro Central.

Os resultados mostraram que o alumínio tende a se acumular nos tecidos da epiderme, e a diminuir no sentido do córtex ao cilindro central (Tabela 1). Na epiderme o elemento representou 43% do total de alumínio detectado nas raízes.

Tabela 1- Valores percentuais médios de alumínio na epiderme (epd), córtex (ctx) e cilindro central (cc) das raízes de *Schizolobium amazonicum* em EDS.

Tratamentos	Al epd	Al ctx	Al cc
0 mg L ⁻¹ de Al ³⁺	0,001	0,005	0,00
20 mg L ⁻¹ de Al ³⁺	0,575	0,393	0,298
40 mg L ⁻¹ de Al ³⁺	0,846	0,689	0,408

A maioria do alumínio na epiderme das raízes analisadas ficou acumulado na epiderme radicular, diminuindo conforme a proximidade com o cilindro vascular, o que implica que pode ter havido interação com fósforo que pode formar um complexo P-Al e ter ficado precipitado

na epiderme (MATTIELLO et al. 2008). A interação entre esses dois elementos ocorre no solo e continuam na superfície e no interior das células das raízes, resultando na formação de complexos e compostos pouco solúveis como o $Al_4(PO_4)_3$ na parede celular, reduzindo a absorção e translocação do alumínio (ZHENG et al., 2005).

O alumínio pode também ter sido precipitado através da ação de ácidos orgânicos que formam complexos estáveis (quelação), impedindo sua absorção, evitando a interação com componentes celulares ou até a penetração via simplasto (citosol) nos tecidos radiculares (MIGUEL et al., 2010; BRACCINI et al., 2000). Dentro da célula o metal pode causar lesões nas estruturas celulares como o núcleo ou ser armazenado no vacúolo, uma forma de desintoxicação interna (ZHU et al., 2013).

A toxicidade do alumínio também pode ser resultado de interações complexas das vias apoplasto (parede celular e membrana plasmática) (KOCHIAN; PIÑEROS; HOEKENGA, 2005). O transporte do elemento até as células corticais pode passar pela parede celular cortical via apoplasto e entrar no esteio via plasmalema até a endoderme. A endoderme representa uma barreira para o transporte do alumínio via apoplasma, visto que as estrias de Caspary, hidrófobas, não permitem a passagem de íons. Este fato pode ter diminuído a ascensão do alumínio para o cilindro central evitando seu transporte para a parte aérea (RENGEL 1992).

Maior parte dos estudos observa que a maior associação do Al com a raiz ocorre via apoplasto, devido a afinidade com os pectatos, uma pequena fração do Al rapidamente entra e interage no simplasto (SCHMOHL; HORST, 2000). Romero et al. (1993) mostraram que a translocação de alumínio através de células corticais das raízes de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill), essencialmente, pela via apoplástica. Contudo, não se pode excluir que o maior conteúdo de alumínio apoplástico reforça o fluxo para dentro do simplasto.

A parede celular é o principal sítio de acúmulo de alumínio devido à forte ligação dos constituintes da pectina. O alumínio pode deslocar o Ca do apoplasto por competição ou por reduzir a diferença de potencial negativo na superfície da membrana. A membrana plasmática é estabilizada por íons Ca que se ligam a proteínas e resíduos de pectina carregados negativamente na parede celular. Essas cargas negativas tornam as pectinas um grande local de ligação do Al (RENGEL, 1992; VAZQUEZ et al., 1999; HORST et al., 1999).

A ligação do alumínio na matriz da pectina e de outros constituintes da parede celular pode alterar as características da parede celular e funções, como a extensibilidade, conduzindo assim à inibição do crescimento radicular, perosidade das paredes celulares o que pode limitar a transferência e a mobilidade de moléculas grandes tais como proteínas (SCHMOHL; HORST, 2000).

A distribuição celular de alumínio entre apoplasma e simplasma ainda é controversa, diferindo de uma espécie para a outra e variando conforme o grau de tolerância de cada espécie (KOCHIAN et al., 2004; ROSSIELLO; NETTO, 2006). Para a melhor identificação do grau de tolerância do paricá é indicado o uso de outras técnicas em conjunto com a espectrometria de raios-X, para o melhor entendimento da dinâmica do elemento.

3.5 Conclusão

Os resultados mostram que a espectrometria de raios-X possibilitou observar que o alumínio está mais presente na epiderme das raízes sendo observado a diminuição da sua presença no sentido do córtex e do cilindro central. Para a melhor compreensão dos mecanismos utilizados pelas plantas para reter o alumínio, indica-se a utilização de outros métodos como a histoquímica das estruturas celulares e outras técnicas de microscopia e fitoquímica.

REFERENCIAS

- BRACCINI, M. C. L. et al. Crescimento da planta e coloração das raízes com hematoxilina como critérios de avaliação de genótipos de café quanto à tolerância à toxidez de alumínio. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 24, p. 59-68, 2000.
- CARVALHO, P. E. R. Paricá: *Schizolobium amazonicum*. Circular Técnica, Colombo-PR, 2007. Disponível em: <
<http://www.sifloresta.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7714/circotec142.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 02 dezembro 2015.
- GRABSKI, S.; SCHINDLER, M. Aluminum induces Rigor within the Actin Network of Soybean Cells. **Plant Physiol**, v 108, p. 897-901, 1995.
- HARIDASAN, M. Alumínio é um elemento tóxico para as plantas nativas do cerrado? In: PRADO, C. H. B. A.; CASALI, C. A. **Fisiologia Vegetal: práticas em relações hídricas, fotossíntese e nutrição mineral**. Barueri, ed. Manole, 2006, p. 1-10.
- HOAGLAND, D.R.; ARNON, D. I. The water culture method for growing plants without soils. **California Agricultural Experimental Station**, 347p, 1950.
- HORST, W. J. et al. Does aluminium affect root growth of maize through interaction with the cell wall-plasma membrane-cytoskeleton continuum? **Plant and Soil**, v. 215, n. 2, p. 163-174, 1999.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa- BDMEP**. 2015. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 01 novembro 2015.
- KOCHIAN, L. V.; PIÑEROS, M. A.; HOEKENGA, O. A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. **Plant and Soil**, v. 274, n. 1-2, p. 175-195, 2005.
- KOCHIAN, L. V. Cellular Mechanisms of Aluminum Toxicity and Resistance in Plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 46, n. 1, p. 237-260, 2003.
- KOPITTKE, P. M. et al. Kinetics and nature of aluminium rhizotoxic effects: a review. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 15, p. 4451-4467, 2016.
- LEMOS FILHO, J. P.; SCATENA, V. L.; BRITO, R. A. A. Efeitos do alumínio no desenvolvimento das raízes de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de wit. (Leguminosae). **Arq. Biologic Tecnologic.**, v. 40, n. 1, p. 81- 88, mar. 1997.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Ceres, 2006. p 446-455.
- MARQUES, L. C. T.; YARED, J. A. G.; SIVIERO, M. A. A Evolução do Conhecimento sobre o Paricá para Reflorestamento no Estado do Pará. **Comunicado Técnico**, v. 158, p. 5, 2006.

- MATTIELLO, E. M. et al. Produção de matéria seca, crescimento radicular e absorção de cálcio, fósforo e alumínio *Porcoffea canephora* e *Coffea arabica* sob influência da atividade do alumínio em solução. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, vol.32, n 1, jan./fev.2008.
- MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. **International Review Cytology**, San Diego, v.200, p.1- 46, 2000.
- ROMERO, R. et al. Absorción de alumínio por las raíces de eucaliptos (*Eucalyptus globulus* Labill) en suelos naturales y encalados de galicia. Congreso Forestal Español: Ponencias y Comunicaciones, Lourizán, p. 183- 188, 1993.
- ROSSIELLO, R. P.; NETTO, J. J. Toxidez de Alumínio em Plantas: Novos enfoques para um velho problema. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição Mineral de Plantas**. Sociedade Brasileira de Ciências Solos, 2006. p. 377-418.
- RENGEL, Z. Role of calcium in aluminum toxicity. **New Phytol**, Australia, v. 121, p 499-513, apr. 1992.
- SANTOS, T. J.; ZAMPIERON, S. L. M.; ZAMPIERON, J. V. Biomonitoramento do chumbo, via espectroscopia por energia dispersiva, em plantas medicinais. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 5, n. 1, p. 27-36, abr. 2013.
- SIVIERO, M. A. Paricá: a vedete do reflorestamento. **Diário do Pará**, Belém, caderno regional, p. 8, jan. 2006.
- SCHMOHL, N.; HORST, W. J. Cell wall pectin content modulates aluminum sensitivity of *Zea mays* (L.) cells grown in suspension culture. **Plant Cell Environment**, v. 23, p. 735-742, 2000.
- VÁZQUEZ, M. D. et al. Change in apoplastic aluminum during the initial growth response to aluminum by roots of a tolerant maize variety. **Plant Physiology**, v. 119, p. 435-444, fev. 1999.
- ZHENG, S. J. et al. Immobilization of aluminum with phosphorus in roots is associated with high aluminum resistance in buckwheat. **Plant physiology**, v. 138, n. 1, p. 297-303, 2005.
- ZHU, X. F. et al. Coordination between apoplastic and symplastic detoxification confers plant aluminum resistance. **Plant physiology**, v. 162, n. 4, p. 1947-55, 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE A- Tabela do resumo da análise de variância para altura da planta (AP) em mm, matéria seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR) e total (MST) em gramas de mudas de *Schizolobium amazonicum* sob diferentes concentrações de Al (mg L⁻¹).

FV	GL	Quadrados médios			
		AP	MSPA	MSR	MST
Tratamentos	4	79,81*	0,78*	0,99*	1,3*
Blocos	4	3,73ns	0,004ns	0,04ns	0,05ns
Resíduo	16	6,01	0,02	0,01	0,01
Média geral	-	73,02	2,14	1,43	3,55
CV (%)	-	3,36	7,08	7,37	10,02

* significativo ($p < 0,05$); ns – não significativo ($p > 0,05$) pelo teste F.

APÊNCICE B- Tabela do resumo da análise de variância para teor e acúmulo de macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio(Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) em g kg⁻¹ na parte aérea e na raiz das mudas de *Schizolobium amazonicum* sob diferentes concentrações de Al (mg L⁻¹).

Quadrado Médio													
FV	GL	Teor Parte Aérea (g/kg)						Teor Raiz (g/kg)					
		N	P	Ca	Mg	K	N	P	C	Mg	K		
Tratamentos	4	28,91*	2,73*	7,14*	0,83*	1,57*	27,23*	1,04*	6,14*	0,092ns	0,36*		
Blocos	4	5,57ns	0,05ns	0,26ns	0,033ns	0,10ns	5,16ns	0,067ns	0,57ns	0,062ns	0,082ns		
Resíduo	16	6,23	0,094	1,13	0,054	0,11	2,70	0,19	0,57	0,044	0,056		
Média geral	-	31,58	2,73	10,7	2,09	2,55	28,68	3,42	6,89	2,41	1,97		
CV (%)	-	7,9	11,23	9,95	11,10	13,18	5,73	12,77	10,96	8,71	12		
Acúmulo Raiz (g/planta)													
FV	GL	Acúmulo Parte Aérea (g/planta)						Acúmulo Raiz (g/planta)					
		N	P	Ca	Mg	K	N	P	Ca	Mg	K		
Tratamentos	4	0,0004*	0,00002*	0,00007*	0,000018*	0,00001*	0,0013*	0,00002*	0,00004*	0,00005*	0*		
Blocos	4	0,00003ns	0	0,00001ns	0,00001ns	0,000001ns	0,00003ns	0ns	0,00001ns	0,000003ns	0ns		
Resíduo	16	0,00007	0	0,00001	0,000001	0,000001	0,00001	0	0,00001	0,000002	0		
Média geral	-	0,067	0,0059	0,023	0,0045	0,0055	0,041	0,005	0,009	0,0034	0,0027		
CV (%)	-	12,14	14,51	14,13	13,3	18,11	9,21	12,86	14,34	12,3	12,87		

*significativo ($p < 0,05$); ns – não significativo ($p > 0,05$) pelo teste F.

APÊNDICE C- Tabela do resumo da análise de variância para o teor e acúmulo de alumínio (Al) e micronutrientes ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn) em mg kg⁻¹ na parte aérea e na raiz das mudas de *Schizolobium amazonicum* sob diferentes concentrações de Al (mg L⁻¹).

		Teor Parte Aérea (mg/kg)							Teor Raiz (mg/kg)							
FV	GL	Fe	Cu	Mn	Zn	Al	Fe	Cu	Mn	Zn	Al	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
Tratamentos	4	8702,8*	0,025ns	306,79*	11,91ns	0,045*	233309,5*	7,81*	865,44*	1,86ns	30,46*					
Blocos	4	417,8ns	0,29ns	16,70ns	14,93ns	0,00006ns	10066,2ns	3,13ns	30,50ns	12,65ns	0,08ns					
Resíduo	16	600,7	0,17	22,95	11,31	0,00057	7435	1,60	46,82	12,36	0,11					
Média geral	-	342,3	5,07	34,70	36,60	0,20	816,16	11,41	61,19	32,95	2,86					
CV (%)	-	10,11	8,31	13,81	9,19	11,36	10,56	11,10	11,19	10,67	11,75					
		Acúmulo Parte Aérea (mg/planta)							Acúmulo Raiz (mg/planta)							
FV	GL	Fe	Cu	Mn	Zn	Al	Fe	Cu	Mn	Zn	Al	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
Tratamentos	4	0,072*	0,00002ns	0,00094*	0,0003*	0*	0,018ns	0,00008*	0,011*	0,001*	0,00014*					
Blocos	4	0,0018ns	0 ns	0,0001ns	0,00005ns	0ns	0,041ns	0,00001ns	0,00016ns	0,00009ns	0 ns					
Resíduo	16	0,0036	0,00001	0,0001	0,00009	0*	0,016	0	0,00011	0,00003	0					
Média geral	-	0,52	0,011	0,073	0,078	0,00044	1,06	0,016	0,091	0,46	0,0049					
CV (%)	-	11,51	10,20	13,66	12,37	10,44	11,93	13,84	11,66	11,86	11,30					

*significativo ($p < 0,05$); ns – não significativo ($p > 0,05$) pelo teste F.

APÊNDICE D- Tabela do resumo da análise de variância para amônio ($\mu\text{mol g}^{-1}$), nitrato ($\mu\text{M g}^{-1}$), aminoácido ($\mu\text{mol g}^{-1}$), proteína (mg g^{-1}), carboidratos ($\mu\text{mol g}^{-1}$), amido (mg g^{-1}), sacarose (mg g^{-1}), prolina ($\mu\text{mol g}^{-1}$) e glicina betaina (mg g^{-1}) da parte aérea e da raiz de mudas de *Schizolobium amazonicum*, sob diferentes concentrações de Al (mg L^{-1}).

Quadrados médios										
Parte Aérea										
FV	GL	AM	NIT	AA	PRO	PRL	CARB	AMD	SAC	GB
Tratamentos	4	283,89*	888,84*	63382,66*	0,27*	30,64*	0,0009ns	0,73*	0,04*	7572021,5*
Blocos	4	11,20ns	63,39ns	1733,61ns	0,002ns	1,91ns	0,001ns	0,06ns	0,001ns	67183,49*
Resíduo	16	2,87	19,38	1008,77	0,007	4,13	0,0004	0,04	0,0007	615049,97
Média geral	-	20,31	43,24	353,56	0,77	13,29	0,48	2,10	1,4	7878,72
CV(%)	-	8,34	10,18	8,98	10,52	15,29	4,52	10,03	1,98	9,95
Raiz										
FV	GL	AM	NIT	AA	PRO	PRL	CARB	AMD	SAC	GB
Tratamentos	4	1940,80*	888,84*	6840,54*	0,024*	16,66*	0,45*	0,22*	0,05*	3377153,3*
Blocos	4	22,73ns	63,38*	401,47ns	0,0002ns	0,33ns	0,0002ns	0,009ns	0,002ns	553292,5ns
Resíduo	16	24,84	19,38	209,49	0,0003	1,42	0,0007	0,004	0,005	721014,14
Média geral	-	42,41	43,24	150,59	0,39	10,16	0,27	1,72	0,6	6963,56
(%)	-	11,75	10,18	9,61	4,47	11,72	10,08	3,88	12	12,19

* significativo ($p < 0,05$); ns — não significativo ($p > 0,05$) pelo teste F