



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PEDRO HENRIQUE OLIVEIRA SIMÕES**

**CRESCIMENTO, ECOFISIOLOGIA E EFICIÊNCIA DO USO DE  
NUTRIENTES DE *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima FERTILIZADO  
NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

**BELÉM**  
**2021**

**PEDRO HENRIQUE OLIVEIRA SIMÕES**

**CRESCIMENTO, ECOFISIOLOGIA E EFICIÊNCIA DO USO DE  
NUTRIENTES DE *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima FERTILIZADO  
NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Ciências Florestais, para obtenção do título de Doutor.

**Área de concentração:** Manejo de ecossistemas de florestas nativas e plantadas.

**Orientador:** Prof. Dr. João Olegário Pereira de Carvalho

**BELÉM  
2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S588c

Simões, Pedro Henrique Oliveira

CRESCIMENTO, ECOFISIOLOGIA E EFICIÊNCIA DO USO DE  
NUTRIENTES DE *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima FERTILIZADO COM  
FÓSFORO E POTÁSSIO NA AMAZÔNIA ORIENTAL / Pedro Henrique Oliveira  
Simões. - 2019.

123 f. : il. color.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF),  
Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém,  
2019.

Orientador: Prof. Dr. João Olegário Pereira de Carvalho

1. Nutrição de plantas. 2. fisiologia vegetal. 3. Estatística multivariada. 4.  
ecofisiologia florestal. 5. silvicultura. I. Carvalho, João Olegário Pereira de, *orient.* II. Título

---

CDD 634.9

**PEDRO HENRIQUE OLIVEIRA SIMÕES**

**CRESCIMENTO, ECOFISIOLOGIA E EFICIÊNCIA DO USO DE  
NUTRIENTES DE *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima FERTILIZADO  
NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Ciências Florestais, área de concentração Manejo de ecossistemas de florestas nativas e plantadas, para obtenção do título de **Doutor**.

**Data da Aprovação: 30 de agosto de 2021.**

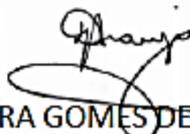
**BANCA EXAMINADORA**



**JOÃO OLEGÁRIO PEREIRA DE CARVALHO**  
Presidente



**CÂNDIDO FERREIRA DE OLIVEIRA NETO**  
1º examinador



**DENMORA GOMES DE ARAÚJO**  
2º examinador



**MANOEL TAVARES DE PAULA**  
3º examinador



**RUY GUILHERME CORREIA**  
4º examinador

*Dedico,*

*Aos meus pais José Fernando  
Albuquerque Simões e Maria de Lourdes  
Oliveira Simões, que nunca mediram  
esforços para que eu pudesse estudar e  
chegar até aqui. Essa vitória é deles.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus que me proporcionou o dom da vida e me manteve de pé e com saúde.

Agradeço aos meus pais Fernando e Lourdes que sempre acreditaram no poder transformador da educação e me fizeram chegar até aqui.

Agradeço à Universidade Federal Rural da Amazônia, que foi minha casa desde 2009 até os dias de hoje como discente, e também como docente, entre os anos de 2017 e 2019 no *campus* de Parauapebas.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF) da UFRA pela oportunidade que me proporcionou ao longo desses últimos 4 anos, para que eu pudesse me tornar Doutor.

Agradeço aos amigos e amigas que fiz nessa caminhada, em especial àqueles que ajudaram no Projeto Tachi, que acreditaram e contribuíram nas atividades e coleta de dados. Foi árduo, mas gratificante ao seu final.

Agradeço ao meu orientador Dr. João Olegário Pereira de Carvalho, por toda a confiança depositada, pela tranquilidade que sempre me passou para que eu pudesse desenvolver esse trabalho, e por toda ajuda em todos os momentos que precisei.

Agradeço a todos os professores da UFRA que contribuíram na minha formação, desde a graduação, passando pelo mestrado e agora doutorado.

Enfim, optei por não citar nomes, para não esquecer de ninguém. Finalizo externalizando aqui a minha gratidão a todos que contribuíram na realização desse sonho.

Muito obrigado!

## RESUMO

Estudos que tratam do comportamento, desenvolvimento inicial, ecofisiologia, absorção e eficiência do uso de nutrientes de árvores nativas da Amazônia em função da fertilização, são de extrema importância para subsidiar ações de recuperação e manejo de áreas degradadas. A utilização de espécies florestais nativas, seja para produção de madeira ou recuperação de áreas degradadas, ainda é dificultada pela carência de informações sobre suas exigências nutricionais para o estabelecimento e desenvolvimento das plantas no campo. O suprimento adequado de nutrientes, como o fósforo (P) e potássio (K) pode favorecer diferentes mecanismos de crescimento das plantas, como o desempenho fotossintético, contribuindo efetivamente para o estabelecimento das plantas no campo, pois atua na expressão da plasticidade fenotípica em relação à tolerância das plantas a condições limitantes de recursos primários (água, luz e nutrientes), contribuindo para incorporar áreas degradadas aos processos produtivos. *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima – Fabaceae é uma espécie pioneira que frequentemente inicia a sucessão secundária em áreas abertas, sendo indicada para reflorestamentos devido à sua alta capacidade de produção de biomassa, rápido crescimento em condições adversas e resistência às perturbações ambientais. Sua madeira tem características similares à madeira de eucalipto, quanto ao poder calorífico e ao rendimento de peso e volume no processo de carbonização, sendo considerada promissora para plantios energéticos na Amazônia brasileira e regiões limítrofes. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a resposta à fertilização com fósforo e potássio sobre o crescimento, ecofisiologia e eficiência de uso de nutrientes em plantio de *T. vulgaris* na Amazônia Oriental. No capítulo 1 foi avaliado o efeito da fertilização com P e K nas trocas gasosas de *T. vulgaris*; no capítulo 2 foi investigado o efeito da sazonalidade da precipitação nas trocas gasosas de *T. vulgaris* fertilizado com P e K, por meio da estatística multivariada; e no capítulo 3 foi avaliada a influência da fertilização com diferentes níveis de P e K no crescimento e eficiência do uso de nutrientes em plantio de *T. vulgaris*. O experimento foi instalado em março de 2016 na estação experimental da Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Igarapé-Açu/PA. Foram aplicadas três doses de P (0, 65,22 e 130,4 kg ha<sup>-1</sup>) e três doses de K (0, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>), em esquema fatorial 3 x 3 e delineamento em blocos casualizados. Medições pontuais de trocas gasosas foram realizadas em abril e novembro de 2018, com um analisador de gás a infravermelho.

Também foram avaliados os parâmetros de crescimento, concentração de nutrientes na biomassa, eficiência do uso de nutrientes (EUN) e coeficiente de uso biológico (CUB). A fertilização potássica em plantio de *T. vulgaris* proporcionou acréscimos positivos (aproximadamente 30%) na taxa de fotossíntese líquida por unidade de área foliar. As demais variáveis de trocas gasosas, como a  $g_s$ ,  $C_i$ ,  $E$ ,  $\Phi C$ , EUA e  $EiUA$ , também foram favorecidas com a dose de  $78.2 \text{ g kg}^{-1}$  de K, sugerindo a atuação do K na regulação de processos fisiológicos indispensáveis ao crescimento do vegetal, como a abertura e fechamento dos estômatos. A análise fatorial e análise de componentes principais possibilitaram a redução inicial de 8 variáveis de trocas gasosas para 2 e 3 componentes principais, nos períodos de alta e baixa pluviosidade, respectivamente. A sazonalidade influenciou no comportamento das variáveis fisiológicas e conseqüentemente no seu agrupamento dentro de cada componente principal. *T. vulgaris* respondeu positivamente à fertilização com P e K nas variáveis morfológicas de crescimento em diâmetro e altura, trocas gasosas, concentração de nutrientes na biomassa de parte aérea, EUN e CUB, podendo dobrar a produtividade em volume e em biomassa de madeira na idade de três anos. Os maiores  $CUB_P$ ,  $CUB_K$  e  $CUB_{Mg}$  encontrados representam valores compatíveis com os níveis críticos de CUB definidos para produção de biomassa do tronco de eucalipto. Os compartimentos lenhosos de *T. vulgaris* apresentaram os maiores valores de CUB, algo bastante desejável e de grande interesse para a silvicultura. Em função da variabilidade genética natural dentro do povoamento proveniente de sementes nativas, recomenda-se, para os próximos estudos com a espécie, considerar o fator idade do plantio para avaliar a exportação relativa de nutrientes nas colheitas realizadas. Espera-se que mais estudos sejam realizados com a espécie, devido o seu enorme potencial silvicultural, de modo a fomentar o uso de *T. vulgaris* em programas de recuperação de áreas degradadas e em plantios energéticos na Amazônia.

**Palavras-chave:** Taxa de fotossíntese; Análise de componentes principais; Coeficiente de uso biológico; Florestas energéticas.

## ABSTRACT

Studies that address the behavior, initial development, ecophysiology, uptake and efficiency of nutrient use of native Amazonian trees as a function of fertilization are extremely important to support actions for the recovery and management of degraded areas. The use of native forest species, whether for timber production or the recovery of degraded areas, is still hampered by the lack of information on their nutritional requirements for the establishment and development of plants in the field. The adequate supply of nutrients, such as phosphorus (P) and potassium (K) can favor different mechanisms of plant growth, such as photosynthetic performance, effectively contributing to the establishment of plants in the field, because it acts in the expression of phenotypic plasticity in relation to the tolerance of plants to limiting conditions of primary resources (water, light and nutrients), contributing to incorporate degraded areas to productive processes. *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima - Fabaceae is a pioneer species that often initiates secondary succession in open areas, and is ideally considered for reforestation due to its high capacity for biomass production, rapid growth under adverse conditions, and high resistance to environmental disturbances. Its wood has similar characteristics to eucalyptus wood, regarding calorific value and weight and volume yield in the carbonization process, being considered promising for energy plantations in the Brazilian Amazon and bordering regions. In this sense, the objective of this thesis was to evaluate the response to fertilization with phosphorus and potassium on growth, ecophysiology and nutrient use efficiency in *T. vulgaris* plantation in the Eastern Amazon. Chapter 1 evaluated the effect of P and K fertilization on gas exchange in *T. vulgaris*; chapter 2 investigated the effect of seasonal precipitation on gas exchange in *T. vulgaris* fertilized with P and K, using multivariate statistics; and chapter 3 evaluated the influence of fertilization with different levels of P and K on growth and nutrient use efficiency in *T. vulgaris* plantation. The experiment was installed in March 2016 at the experimental station of the Federal Rural University of the Amazon, in the municipality of Igarapé-Açu/PA. Three doses of P (0, 65.22 and 130.44 kg ha<sup>-1</sup>) and three doses of K (0, 100 and 200 kg ha<sup>-1</sup>) were applied in a 3 x 3 factorial scheme and randomized block design. Spot measurements of gas exchange were performed in April and November 2018 with an infrared gas analyzer. Growth parameters, nutrient concentration in biomass, nutrient use efficiency (EUN) and biological use coefficient (CUB) were also evaluated.

Potassium fertilization in *T. vulgaris* plantation provided positive increases (approximately 30%) in net photosynthesis rate per unit leaf area. The other gas exchange variables, such as  $g_s$ ,  $C_i$ ,  $E$ ,  $\Phi C$ ,  $EUA$  and  $EiUA$ , were also favored with the dose of  $78.2 \text{ g kg}^{-1}$  of K, suggesting the role of K in the regulation of physiological processes essential for plant growth, such as the opening and closing of stomata. Factor analysis and principal components analysis allowed the initial reduction of 8 variables of gas exchange to 2 and 3 principal components, in the periods of high and low rainfall, respectively. Seasonality influenced the behavior of physiological variables and consequently their grouping within each principal component. *T. vulgaris* responded positively to fertilization with P and K in the morphological variables of growth in diameter and height, gas exchange, nutrient concentration in aboveground biomass,  $EUN$  and  $CUB$ , and could double the productivity in volume and wood biomass at the age of three years. The higher  $CUB_P$ ,  $CUB_K$  and  $CUB_{Mg}$  found represent values compatible with the critical  $CUB$  levels defined for biomass production of the eucalyptus stem. The woody compartments of *T. vulgaris* showed the highest  $CUB$  values, something quite desirable and of great interest for forestry. Due to the natural genetic variability within the stand from native seeds, it is recommended, for future studies with the species, to consider the planting age factor to evaluate the relative export of nutrients in the harvests performed. It is hoped that more studies will be conducted with the species, due to its enormous silvicultural potential, in order to encourage the use of *T. vulgaris* in programs to recover degraded areas and in energy plantations in the Amazon.

**Keywords:** Photosynthesis rate; Principal Component Analysis; Biological Use Coefficient; Energy Forests.

## LISTA DE FIGURAS

- Figure 1.** Monthly rainfall (mm), maximum, average and minimum monthly temperatures (°C), at the experiment site, during the period of evaluation of the planting of *T. vulgaris* in Igarapé-açu, PA. .... 34
- Figure 2.** Schematic representation of plots (A) and fertilization sites (B) for evaluation of *T. vulgaris* fertilized with P and K, Igarapé-açu, PA. .... 35
- Figure 3.** Graph of response surface for the variables photosynthetic rate (A), stomach conductance (B), transpiration rate (C), internal CO<sub>2</sub> concentration (D), instantaneous carboxylation efficiency (E), water use efficiency (F), intrinsic water use efficiency (G) and leaf temperature (H), in *T. vulgaris* plantation, according to the application of P and K. .... 40
- Figura 4** - Localização do município de Igarapé-Açu e fotos do experimento com *T. vulgaris*, Pará, Brasil. .... 61
- Figura 5** - Pluviosidade mensal (mm), umidade relativa do ar (%) e temperaturas do ar (°C) máximas e mínimas mensais, no local do experimento, durante os 12 meses de avaliação, na estação experimental da Universidade Federal Rural da Amazônia, Igarapé-Açu, PA, Brasil. .... 62
- Figura 6** - Representação esquemática das parcelas (A) e locais de adubação em coveta lateral (B) para avaliação do *T. vulgaris* fertilizado com P e K, Igarapé-açu, Pará, Brasil. .... 65
- Figura 7** - Médias dos valores de diagnose nutricional para cada tratamento em plantio de *T. vulgaris* fertilizado com P e K. Os nutrientes analisados foram: N foliar (a); P foliar (b); K foliar (c); Na foliar (d); Ca foliar (e); Mg foliar (f); Fe foliar (g); Zn foliar (h); Cu foliar (i); e Mn foliar (j). Barras representam o desvio padrão em relação às médias dos tratamentos. .... 69
- Figura 8** - Efeito da fertilização com P e K sobre as trocas gasosas do *T. vulgaris*, nos períodos de alta (tempo 1) e baixa (tempo 2) pluviosidade. Letras diferentes (minúsculas para alta e maiúsculas para baixa pluviosidade) indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de significância. Igarapé-açu, Pará, Brasil. 73
- Figura 9** - Componentes principais gerados (a, c) e Representação bidimensional “plano fatorial” da correlação das variáveis de trocas gasosas (b, d) obtidas em plantio de *T. vulgaris* fertilizado com P e K, nos períodos de alta e baixa pluviosidade, respectivamente. Igarapé-açu, Pará, Brasil. .... 76
- Figura 10** - Localização do município de Igarapé-Açu e fotos reais do plantio de *T. vulgaris*, Pará, Brasil. .... 102
- Figura 11** - Pluviosidade mensal (mm), umidade relativa do ar (%) e temperaturas (°C) máximas e mínimas mensais, no local do experimento, durante os 12 meses de avaliação. .... 103
- Figura 12** - Representação esquemática das parcelas (A) e locais de adubação em coveta lateral (B) para avaliação da resposta de *T. vulgaris* à fertilização com P e K, Igarapé-açu, Pará, Brasil. .... 105

<b>Figura 13</b> - Crescimento em altura (m) (a) e diâmetro (mm) (b) de <i>T. vulgaris</i> , em resposta à fertilização com P e K. ....	108
<b>Figura 14</b> - Efeito da fertilização com P e K sobre as concentrações de nutrientes do <i>T. vulgaris</i> , nos compartimentos de biomassa da parte aérea. Letras diferentes indicam diferença estatística entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5%. ....	111
<b>Figura 15</b> - Efeito da fertilização com P e K sobre a EUN do <i>T. vulgaris</i> na biomassa da parte aérea. Letras diferentes indicam diferença estatística entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5%. ....	113
<b>Figura 16</b> - Efeito da fertilização com P e K sobre o CUB do <i>T. vulgaris</i> , nos compartimentos de biomassa da parte aérea (folhas, galhos e fuste+casca). Letras diferentes indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5%.....	115

## LISTA DE TABELAS

<b>Table 1.</b> Chemical and physical attributes of the soil in the experimental area up to 1.2 meters deep, determined before the experiment was implemented. ....	33
<b>Table 2.</b> Amounts of fertilizers applied (commercial products) and amount of nutrients actually offered, per treatment, to establish the factorial test for the planting of <i>T. vulgaris</i> .....	35
<b>Table 3.</b> Average results of gas exchange variables in <i>T. vulgaris</i> planting, submitted to fertilization doses with phosphorus and potassium.....	38
<b>Table 4.</b> Pearson's correlation matrix of the 8 gas exchange variables in <i>T. vulgaris</i> planting, submitted to fertilization doses with phosphorus and potassium, Igarapé-Açu, PA. ....	39
<b>Tabela 5 -</b> Atributos químicos e físicos do solo da área experimental, na estação da Universidade Federal Rural da Amazônia, Igarapé-Açu, PA (valores médios de cinco locais de coleta).....	63
<b>Tabela 6 -</b> Quantidades de nutrientes (entre parêntesis) e fertilizantes por tratamento, aplicados ao plantio de <i>T. vulgaris</i> , município de Igarapé-açu, Pará, Brasil. ....	64
<b>Tabela 7 -</b> Análise de variância dos nutrientes (valores F e p) da diagnose nutricional de folhas de <i>T. vulgaris</i> sob fertilização com fósforo e potássio, na área experimental da Universidade Federal Rural da Amazônia, Igarapé-Açu, Pará, Brasil. ....	68
<b>Tabela 8 -</b> Análises de variância das trocas gasosas (valores F e p), obtidas nos períodos de alta e baixa pluviosidade de <i>T. vulgaris</i> sob fertilização com P e K, Igarapé-açu, Pará, Brasil. ....	71
<b>Tabela 9 -</b> Extração de componentes principais para o conjunto de variáveis de trocas gasosas obtidas no período de alta pluviosidade, com seus coeficientes de correlação, ordem de importância das variáveis originais e as cumulalidades.....	74
<b>Tabela 10 -</b> Extração de componentes principais para o conjunto de variáveis de trocas gasosas obtidas no período de baixa pluviosidade, com seus coeficientes de correlação, ordem de importância das variáveis originais e as cumulalidades. ....	75
<b>Tabela 11 -</b> Atributos químicos e físicos do solo da área experimental (valores médios de cinco locais de coleta). ....	103
<b>Tabela 12 -</b> Quantidades de nutrientes (entre parêntesis) e fertilizantes por tratamento, aplicados ao plantio de <i>T. vulgaris</i> , município de Igarapé-açu, Pará, Brasil. ....	105
<b>Tabela 13 -</b> Análise de variância das concentrações dos nutrientes na biomassa de parte aérea (valores F e p), obtidas em plantio de <i>T. vulgaris</i> sob fertilização com P e K. ....	109
<b>Tabela 14 -</b> Análise de variância da EUN na biomassa de parte aérea (valores F e p), em plantio de <i>T. vulgaris</i> sob fertilização com fósforo e potássio.....	112
<b>Tabela 15 -</b> Análise de variância do CUB da biomassa de parte aérea (valores F e p), para os compartimentos folhas, galhos e fuste+casca, obtidas em plantio de <i>T. vulgaris</i> sob fertilização com fósforo e potássio. ....	114

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	7
<b>ABSTRACT</b> .....	9
<b>1. CONTEXTUALIZAÇÃO</b> .....	16
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	21
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	21
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	21
<b>3. QUESTÕES CIENTÍFICAS E HIPÓTESES</b> .....	21
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	23
<b>4. EFFECT OF PHOSPHORUS AND POTASSIUM ON GAS EXCHANGES OF <i>Tachigali vulgais</i></b> .....	30
<b>ABSTRACT</b> .....	30
<b>4.1 Introduction</b> .....	31
<b>4.2 Materials and methods</b> .....	33
<b>4.2.1 Experimental site</b> .....	33
<b>4.2.2 Experiment installation and conduction</b> .....	34
<b>4.2.3 Gas exchange analysis</b> .....	35
<b>4.2.4 Data analysis</b> .....	36
<b>4.3 Results</b> .....	37
<b>4.4 Discussion</b> .....	42
<b>4.5 Conclusion</b> .....	47
<b>REFERENCES</b> .....	48
<b>5. ECOFISIOLOGIA DE <i>Tachigali vulgaris</i> L. G. Silva &amp; H. C. Lima EM FUNÇÃO DA SAZONALIDADE PLUVIOMÉTRICA: UMA ABORDAGEM MULTIVARIADA</b> .....	56
<b>RESUMO</b> .....	56
<b>ABSTRACT</b> .....	57
<b>5.1 Introdução</b> .....	58
<b>5.2 Material e métodos</b> .....	61
<b>5.2.1 Área de estudo</b> .....	61
<b>5.2.2 Instalação do experimento e delineamento experimental</b> .....	63
<b>5.2.3 Avaliação do estado nutricional</b> .....	65
<b>5.2.4 Análise das trocas gasosas</b> .....	65
<b>5.2.5 Análises estatísticas</b> .....	66
<b>5.3 Resultados</b> .....	68

<b>5.4</b>	<b>Discussão</b> .....	77
5.4.1	Diagnose Nutricional .....	77
5.4.2	Trocas gasosas.....	78
5.4.3	Análise de Componentes Principais.....	81
<b>5.5</b>	<b>Conclusão</b> .....	85
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	86
<b>6.</b>	<b>CRESCIMENTO E EFICIÊNCIA DO USO DE NUTRIENTES EM PLANTIO DE <i>Tachigali vulgaris</i> L. G. Silva &amp; H. C. Lima FERTILIZADO COM FÓSFORO E POTÁSSIO NA AMAZÔNIA ORIENTAL</b> .....	97
	<b>RESUMO</b> .....	97
	<b>ABSTRACT</b> .....	98
<b>6.1</b>	<b>Introdução</b> .....	99
<b>6.2</b>	<b>Material e métodos</b> .....	102
6.2.1	Área de estudo.....	102
6.2.2	Instalação do experimento e delineamento experimental .....	104
6.2.3	Avaliação do crescimento .....	105
6.2.4	Análises químicas de tecido vegetal .....	106
6.2.5	Eficiência do uso de nutrientes (EUN) e coeficiente de uso biológico (CUB) ...	106
6.2.6	Análises estatísticas.....	107
<b>6.3</b>	<b>Resultados</b> .....	108
<b>6.4</b>	<b>Discussão</b> .....	116
6.4.1	Crescimento.....	116
6.4.2	Concentração de nutrientes na biomassa da parte aérea .....	116
6.4.3	Eficiência do uso de nutrientes - EUN.....	118
6.4.4	Coeficiente de uso biológico - CUB .....	120
<b>6.5</b>	<b>Conclusão</b> .....	122
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	123
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS</b> .....	131

## 1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Apesar da expansão das áreas desmatadas no Bioma Amazônia, chegando a cerca de 729 mil km<sup>2</sup>, o que corresponde a 17% do seu território, apenas uma pequena porção (0,42%) da área desmatada foi destinada a programas de reflorestamento (GUIMARÃES et al., 2018; INPE, 2018). Entre os fatores que dificultam a implementação de plantios na região amazônica, destaca-se o conhecimento limitado da silvicultura de espécies nativas (WALTERS et al., 2005).

O emprego da flora nativa em reflorestamentos deveria ser implementado pois aumentaria a diversidade de espécies utilizadas, reduzindo riscos biológicos e econômicos (ERSKINE et al., 2005). Além disso, a maior utilização dessas espécies em reflorestamentos proporcionaria a reposição da madeira de alto valor comercial oriunda de florestas nativas, e a maior diversificação biológica e de uso do solo (TONINI et al., 2018), diminuindo assim a pressão sobre o ecossistema nativo remanescente (FARIAS et al., 2016). Dessa forma, há a urgência de criar uma lista de espécies potenciais que combinem alta sobrevivência e rápido crescimento para plantações em áreas alteradas na Amazônia (SALOMÃO et al., 2014).

A espécie *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima - Fabaceae ocorre desde a região amazônica até o oeste do estado da Bahia, além das regiões de cerrados de Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso, e possui importância econômica e ambiental (SILVA et al. 2002; SAPORETTI JUNIOR et al. 2003). É uma espécie pioneira que frequentemente inicia a sucessão secundária em áreas abertas, sendo considerada ideal para o reflorestamento devido à sua alta capacidade de produção de biomassa, rápido crescimento em condições adversas e alta resistência às perturbações ambientais (FELFILI et al., 1999; FARIAS et al., 2016).

De acordo com Freitas et al. (2012), as plantas de *T. vulgaris* podem ser indicadas para o uso em projetos de recuperação de áreas degradadas, tanto para as condições de pleno sol, quanto para 50% de sombreamento das mudas. Silva et al. (2021) identificaram densidade básica moderada e poder calorífico acima de 7,95 MJ/kg, sendo um valor adequado para bioenergia, além de indicarem um grande potencial para melhoramento genético da espécie.

Em relação ao poder calorífico superior do carvão vegetal (PCS), como comparativo, em estudos realizados por Vale et al. (2002) para *T. vulgaris* e Santos et al.

(2012) para *Eucalyptus grandis*, foram encontrados valores próximos de PCS, sendo eles 4.849 kcal kg<sup>-1</sup> e 4.496 kcal kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Em estudo realizado por Mochitutti et al. (1999), ao compararem áreas sob plantio de *T. vulgaris* e capoeira, observaram maior teor de Ca<sup>+</sup> Mg<sup>2+</sup> e P na camada 0-5 cm do solo na área com a espécie, demonstrando a capacidade de translocação dos nutrientes das camadas mais profundas para a superfície do solo, importante função na recuperação de áreas degradadas. Essa é uma das vantagens da utilização do *T. vulgaris* para a recuperação de solos, pois no final do período de pousio, o agricultor poderá obter bons rendimentos econômicos com a venda da lenha ou carvão, além de recuperar a área para novos cultivos (MOCHIUTTI et al., 1999).

O suprimento adequado de nutrientes pode favorecer diferentes mecanismos de crescimento das plantas, como o desempenho fotossintético, contribuindo efetivamente para o estabelecimento do plantio no campo (SILVA et al., 2006; FERREIRA et al., 2009). A tolerância das plantas a condições limitadas de recursos primários (água, luz e nutrientes), assim como o sucesso no estabelecimento inicial das mesmas sobre áreas degradadas são, em grande parte, determinados pela eficiência no uso destes recursos (FUNK; VITOUSEK, 2007). A melhoria nas condições edáficas pode favorecer as plantas em diversos aspectos, inclusive, no processo fotossintético, melhorando desempenhos de parâmetros fisiológicos ligados à tolerância das plantas com potencial para restauração florestal e, contribuindo para incorporar áreas degradadas aos processos produtivos (FERREIRA et al., 2009).

Além da taxa fotossintética, entender como ocorrem as influências do ambiente sobre o controle estomático tem sido foco central de estudos com fisiologia vegetal (WARREN et al., 2011; OTTO et al., 2013; MOSTAGHIMI et al., 2021). Modelos climáticos globais sugerem uma probabilidade crescente de mudanças no padrão sazonal de pluviosidade e períodos de seca severa nas próximas décadas (CIAIS et al., 2014; IPCC, 2014), tornando, dessa forma, a atuação dos nutrientes essenciais determinante na manutenção do crescimento dos plantios florestais. A pluviosidade é amplamente reconhecida como a variável climatológica mais importante na região tropical (MORAES et al., 2005; SOUZA et al., 2009), controlando a produção agrícola na região amazônica (MOLION, 1987). Para compreender os fatores que controlam o crescimento das florestas e o uso dos recursos naturais, diversos trabalhos já foram realizados (HUBBARD et al. 2004; YIN et al. 2004; TEIXEIRA et al. 2008; MACHADO et al. 2010; FERREIRA et

al. 2012), todavia, ainda são raros aqueles que investigam especificamente o manejo da fertilização com espécies nativas da Amazônia.

O fósforo (P) é um dos elementos mais importantes envolvidos na fotossíntese e no crescimento das plantas (POUR et al., 2021), sendo as culturas leguminosas altamente responsivas à adubação fosfatada (CHAUDHARY et al., 2008). O P é necessário para a síntese do trifosfato de adenosina (ATP) e de numerosos outros compostos fosforilados; é elemento-chave para qualquer célula armazenar energia e utilizá-la em toda reação endergônica (EPSTEIN, 1975). Portanto, a importância do nutriente para a produtividade das plantas decorre de sua participação nas estruturas e nos processos vitais, refletindo em divisão e alongamento celular, incrementando o crescimento das raízes e o desenvolvimento dos vegetais (MARSCHNER, 2012). Estudos tem relatado que a fertilização fosfatada melhoraram taxas fotossintéticas e a produção de biomassa de plantas, principalmente no estágio inicial de crescimento (FERNANDEZ et al., 2000; MELO et al., 2016; POUR et al., 2021).

O potássio (K) atua no metabolismo das plantas promovendo a síntese de lípidos, hidratos de carbono e proteínas (HABERMAN et al., 2019; LIU et al., 2019; MELO et al., 2021), além de regular o movimento estomático (ZORB et al., 2014; RAGEL et al., 2019), possibilitando à planta a utilizar mais eficientemente a água (EVANS, 1989). Estudos sugerem que as capacidades fotossintéticas das plantas superiores mudam drasticamente em resposta a diferentes fornecimentos de K (WENG et al., 2007; GERARDEAUX et al., 2009).

Diversos estudos têm sido realizados no mundo com o objetivo de mensurar o consumo de água e nutrientes por florestas em função do manejo. Todavia, são raros os trabalhos que tratam especificamente do manejo da fertilização, com a perspectiva de aumentar a eficiência de uso de água e nutrientes por florestas plantadas. Na literatura, são encontrados alguns estudos com espécies como *Eucalyptus sp.* (MACHADO et al., 2010; SCHUMACHER et al., 2019; LAFETÁ et al., 2021), *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl. (FERREIRA et al., 2012), *Acacia mangium* Willd. (SANTOS et al., 2017) e *Inga edulis* Mart. (RANGEL-VASCONCELOS et al., 2016), porém ainda é um campo da ciência que carece de estudos com espécies nativas da Amazônia que possuem potencial para programas de reflorestamento.

A fertilização é uma prática de manejo florestal que contribui decisivamente para o aumento da produtividade. Os estudos de EUN em plantios de *Eucalyptus spp.* já

realizados estabeleceram que a EUN de um nutriente aumenta com a redução da sua disponibilidade (BARROS et al., 1986) e, também, em função da idade ou crescimento da planta (SILVEIRA et al., 2005).

Há grande evidência de que a EUN pelas plantas varia entre as espécies no mesmo ambiente, entre diferentes condições climáticas numa mesma cultura, entre sítios e estação do ano (TAYLOR; WILLATT, 1983). Neste sentido, estudos que objetivem analisar o comportamento, desenvolvimento inicial, absorção e EUN de árvores nativas em função da fertilização, são de extrema importância para subsidiar ações de recuperação e manejo de áreas degradadas (VALADÃO et al., 2014; REIS et al., 2015), além de que os experimentos poderiam ser replicados para diversas outras espécies florestais nativas da Amazônia.

A influência da EUN no desenvolvimento de plantios florestais foi investigada em estudos recentes que agregaram informações acerca do comportamento ecofisiológico de espécies florestais nativas (LIMA JR. et al., 2006; LENHARD et al., 2013; VALADÃO et al., 2014; REIS et al., 2015). Entretanto, apesar da concentração foliar de nutrientes e a EUN serem funções vitais para o estabelecimento de uma planta, há pouca informação disponível sobre espécies nativas da Amazônia, principalmente em relação às respostas de desenvolvimento em função da fertilização com P e K.

O conhecimento da ecofisiologia de espécies florestais merece atenção especial, uma vez que o crescimento e desenvolvimento das mesmas passam por uma série de combinações de fatores que induzirão as plantas a culminar no bom desempenho em condições de campo. Na ausência do equilíbrio dos fatores ditos primários ou abióticos, tais como luz, CO<sub>2</sub>, água e nutrientes, pode haver inibição do crescimento das plantas, impedindo o sucesso dos projetos de manejo, plantios de produção e/ou de enriquecimento. Portanto, o estudo das estratégias ecofisiológicas usadas pelas árvores, relacionadas com a utilização de recursos físicos, se faz necessário para entender a dinâmica dos ecossistemas, bem como para aperfeiçoar as técnicas de manejo florestal sustentável, em função das pressões que sofrem as florestas primárias. O mais elevado desempenho ecofisiológico das espécies é, em grande medida, função do eficiente mecanismo fotossintético, resultando em alta produção de biomassa e favorecendo as condições de armazenamento do metabolismo primário e a produção de substâncias do metabolismo secundário (GONÇALVES et al., 2012).

Métodos estatísticos multivariados são ferramentas extremamente úteis em experimentos com grande número de variáveis (ANDRADE et al., 2017), como é o caso do estudo ecofisiológico de plantios florestais. A decisão sobre quais variáveis são importantes para explicar o efeito dos fatores pode ser tomada com base em resultados da análise fatorial (AF) e da análise de componentes principais (ACP). A AF propõe resumir a estrutura de inter-relações de um grande número de variáveis, por meio de novas variáveis latentes conhecidas como fatores (ANDRADE et al., 2017). A ACP é utilizada para explicar a variância de um grande conjunto de dados de variáveis interligadas com um pequeno conjunto de variáveis independentes (MANLY, 2008; BUENO et al., 2010), reduzindo a representação dimensional dos dados (HAIR et al., 2009). Diversos estudos comprovam a eficiência da aplicação de métodos de análise multivariados na área florestal (LEITE et al., 2010; UZUN et al., 2017; RICKEN et al., 2018; TAVARES et al., 2019). Entretanto, investigações com métodos multivariados para espécies amazônicas pouco exploradas são raras.

São raras as informações encontradas na literatura atual sobre a nutrição com P e K no crescimento do *T. vulgaris* e, mais raro ainda, informações sobre o manejo da fertilização objetivando de aumentar a EUN em plantios florestais. De forma geral, as diferentes espécies florestais nativas apresentam exigências nutricionais distintas e, como inexiste uma recomendação específica para cada espécie, a maioria das recomendações é baseada em experimentos com espécies do gênero *Eucalyptus*.

Ao considerar a complexidade e dinamismo dos processos que envolvem a produção florestal, o estudo das necessidades nutricionais da espécie florestal *T. vulgaris* tem grande contribuição para formação de plantios homogêneos e que consigam expressar seu máximo potencial de crescimento. A partir do entendimento da sua interação com as doses de P e K aplicadas, busca-se otimizar o aproveitamento dos fertilizantes, garantindo o sucesso da utilização da espécie em programas de plantios comerciais e de recuperação de áreas alteradas.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliar a resposta à fertilização com fósforo e potássio sobre o crescimento, ecofisiologia e eficiência de uso de nutrientes em plantio de *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima na Amazônia Oriental.

### 2.2 Objetivos específicos

- a. Avaliar o efeito da fertilização com fósforo e potássio nas trocas gasosas em plantio de *T. vulgaris*;
- b. Investigar o efeito da sazonalidade da precipitação nas trocas gasosas de *T. vulgaris* fertilizado com fósforo e potássio, por meio da estatística multivariada;
- c. Avaliar a influência da fertilização com diferentes níveis de fósforo e potássio no crescimento e eficiência do uso de nutrientes em plantio de *T. vulgaris*.

## 3. QUESTÕES CIENTÍFICAS E HIPÓTESES

### 3.1 Capítulo 1

**Questão científica:** É possível otimizar as trocas gasosas de plantio jovem de *T. vulgaris* mediante a fertilização com fósforo e potássio?

**Hipótese:** As doses de superfosfato triplo até 130,4 g kg<sup>-1</sup> e cloreto de potássio até 200 g kg<sup>-1</sup> otimizam as trocas gasosas de plantio jovem de *T. vulgaris*.

### 3.2 Capítulo 2

**Questão científica:** O uso de estatística multivariada na análise de variáveis ecofisiológicas em função da sazonalidade da precipitação, em plantio jovem de *T. vulgaris*, apresenta resultados confiáveis para explicar o comportamento das plantas?

**Hipótese:** A estatística multivariada pode ser utilizada para explicar a influência da sazonalidade da precipitação nas trocas gasosas do *T. vulgaris* fertilizado com fósforo e potássio.

### 3.3 Capítulo 3

**Questão científica:** Considerando que os índices de eficiência do uso de nutrientes são características intrínsecas às espécies e que os fatores ambientais influenciam no comportamento das plantas, é possível aumentar a eficiência de utilização dos nutrientes em função da fertilização com fósforo e potássio?

**Hipótese:** *T. vulgaris* apresenta melhores índices de eficiência do uso de nutrientes em função do aumento das doses de superfosfato triplo até 130,4 g kg<sup>-1</sup> e cloreto de potássio até 200 g kg<sup>-1</sup>

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. R. S.; CRUZ, A. F. S.; BEZERRA, T. M. E.; LIMA, J. R. S. Aplicação da estatística multivariada na identificação das características biométricas de produção e qualidade de frutos do melão. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v.10, n.1, p.25-40, 2017.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; CARMO, D.N.; NEVES, J.C.L. Classificação nutricional de sítios florestais: descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, v. 10, p. 112-120, 1986.
- BUENO, C.R.P. et al. Análise multivariada na determinação do risco de erosão em solos sob irrigação. **Irriga**, v.15, n.1, p.23-25, 2010.
- CHAUDHARY, M. I.; ADU-GYAMFI, J.; SANEOKA, H. NGUYEN, T. N.; The effect of phosphorus deficiency on nutrient uptake, nitrogen fixation and photosynthetic rate in mashbean, mungbean and soybean. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.30, n.4, pp.537-544, 2008.
- CIAIS, P.; DOLMAN, A. J.; BOMBELLI, A.; DUREN, R.; PEREGON, A.; RAYNER, P. J.; MILLER, C.; GOBRON, N.; KINDERMAN, G.; MARLAND, G.; GRUBER, N.; CHEVALLIER, F.; ANDRES, R. J.; BALSAMO, G.; BOPP, L.; BRÉON, F.-M.; BROQUET, G.; R. DARGAVILLE, R.; BATTIN, T. J.; BORGES, A.; BOVENSMANN, H.; BUCHWITZ, M.; BUTLER, J.; CANADELL, J. G.; COOK, R. B.; DEFRIES, R.; ENGELN, R.; GURNEY, K. R.; HEINZE, C.; HEIMANN, M.; HELD, A.; HENRY, M.; LAW, B.; LUYSSAERT, S.; MILLER, J.; MORIYAMA, T.; MOULIN, C.; MYNENI, R. B.; NUSSLI, C.; OBERSTEINER, M.; OJIMA, D.; PAN, Y.; PARIS, J.-D.; PIAO, S. L.; POULTER, B.; PLUMMER, S.; QUEGAN, S.; RAYMOND, P.; REICHSTEIN, M.; RIVIER, L.; SABINE, C.; SCHIMEL, D.; TARASOVA, O.; VALENTINI, R.; WANG, R.; WERF, G.; WICKLAND, D.; WILLIAMS, M.; ZEHNER, C. Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system. **Biogeosciences**, v.11, pp.3547–3602, 2014.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina, Ed. Planta, 2006. 401p.
- ERSKINE, P. D.; LAMB, D.; BORSCHMANN, G. Growth performance and management of a mixed rainforest tree plantation. **New Forests**, v. 9, p. 117-234, 2005.
- EVANS, J. R. Photosynthesis and nitrogen relationship in leaves of C3 plants. **Oecologia**, v.78, n.1, p.9-19, 1989.
- FARIAS, J. de; MARIMON, B.S.; SILVA, L. de C.R.; PETTER, F.A.; ANDRADE, F.R.; MORANDI, P.S.; MARIMON-JUNIOR, B.H. Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils

with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 368, p.173–182, 2016.

FELFILI, J. M.; SILVA JÚNIOR, M. C. Distribuição dos diâmetros numa faixa de Cerrado na fazenda Água Limpa (FAL) em Brasília - DF. **Acta Botânica**, v.2, n. (1 - 2), p. 85 - 104, 1999.

FERNANDEZ, J.Q.P.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; MORAES, E.J. Productivity of *Eucalyptus camaldulensis* affected by rate and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian oxisol. **Forest Ecology and Management**, v.127, pp. 93–102, 2000.

FERREIRA, M. J.; GONÇALVES, J. F. de C.; FERRAZ, J. B. S. Crescimento e eficiência do uso da água de plantas jovens de castanheira-da-amazônia em área degradada e submetidas à adubação. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 2, p. 393-401, 2012.

FERREIRA, M. J.; GONÇALVES, J. F.; FERRAZ, J. B. S. Photosynthetic parameters of young Brazil nut (*Bertholletia excelsa* H. B.) plants subjected to fertilization in a degraded area in Central Amazonia. **Photosynthetica**, v. 47, n. 4, p. 616-620, 2009.

FREITAS, G. A.; VAZ-DE-MELO, A.; PEREIRA, M. A. B.; ANDRADE, C. A. O.; LUCENA, G. N.; SILVA, R. R. Influência do sombreamento na qualidade de mudas de *Sclerolobium paniculatum* Vogel para recuperação de área degradada. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 2, p. 5-12, 2012.

FUNK, J. L.; VITOUSEK, P. M. Resource-use efficiency and plant invasion in low-resource systems. **Nature**, v. 446, n. 7139, p. 1079- 1081, 2007.

GERARDEAUX, E.; SAUR, E.; CONSTANTIN, J.; PORTÉ, A.; JORDAN-MEILLE, L. Effect of carbon assimilation on dry weight production and partitioning during vegetative growth. **Plant Soil**, v.324, pp. 329-343, 2009.

GONÇALVES, J. F. de C.; SANTOS JR., U. M. dos; ARAÚJO, V. B. F. de; BASTOS, R. P. Ecofisiologia de árvores da Amazônia. **Ciência & Ambiente**, v. 44, p. 100-120, 2012.

GUIMARÃES, Z. T. M.; SANTOS, V. A. H. F. DOS; NOGUEIRA, V. L. P.; MARTINS, N. O. DE A.; FERREIRA, M. J. Leaf traits explaining the growth of tree species planted in a Central Amazonian disturbed área. **Forest Ecology and Management**, v. 430, p. 618–628, 2018.

HABERMAN, A., DAG, A., SHTERN, N., ZIPORI, I., EREL, R., BEN-GAL, A., YERMIYAHU, U. Long-term impact of potassium fertilization on soil and productivity in intensive olive cultivation. **Agronomy**, v.9, pp.1–14, 2019.

HAIR, J.; ANDERSON, R.; TATHAM R. **Análise multivariada de dados**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 600 p.

HUBBARD, R.M.; RYAN, M.G.; GIARDINA, C.P.; BARNARD, H. The effect of fertilization on sap flux and canopy conductance in a *Eucalyptus saligna* experimental Forest. **Global Change Biology**, v. 10, p. 427–436, 2004.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2018. **Monitoramento da floresta amazônica por satélite**. Projeto PRODES. <http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes/> (acesso em 05 fev. 2021).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Core Writing Team, Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014; pp. 1–151.

LAFETÁ, B. O.; SANTANA, R. C.; NOGUEIRA, G. S.; PENIDO, T. M. A.; OLIVEIRA, L. F. R. de; VIEIRA, D. dos S. Biomassa e coeficiente de utilização biológico de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* × *E. camaldulensis* em diferentes espaçamentos de plantio. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, e3378, 2021.

LEITE, H. G.; SILVA, M.L.M. da; BINOTI, D.H.B.; FARDIN, L.; TAKIZAWA, F.H. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. **European Journal of Forest Research**, v.130, n.2, pp.263-269, 2010.

LENHARD, N. R.; PAIVA NETO, V. B.; SCALON, S. D. P. Q.; ALVARENGA, A. A. Crescimento de mudas de pau-ferro sob diferentes níveis de sombreamento. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 2, p. 178-186, 2013.

LIMA JR., É. C.; ALVARENGA, A. A.; CASTRO, E. M.; VIEIRA, C. V.; BARBOSA, J. P. R. A. D. Aspectos fisiológicos de plantas jovens de *Cupania vernalis* Camb. submetidas a diferentes níveis de sombreamento. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 33-41, 2006.

LIU, J., HU, T., FENG, P., WANG, L., YANG, S. Tomato yield and water use efficiency change with various soil moisture and potassium levels during different growth stages. **PLoS One**, v.14, pp.1–14, 2019.

MACHADO, A. F. L.; FERREIRA, L. R.; SANTOS, L. D. T.; FERREIRA, F. A.; VIANA, R. G.; MACHADO, M. S.; FREITAS, F. C. L. Eficiência fotossintética e uso da água em plantas de eucalipto pulverizadas com glyphosate. **Planta Daninha**, v. 28, n. 2, p.319-327, 2010.

MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. Porto Alegre: Bookman, 2008. 229p.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd. ed. London: Academic Press, 2012. 651p.

MELO, E. A. S. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ROCHA, J. H. T.; HAKAMADA, R. E.; BAZANI, J. H.; WENZEL, A. V. A.; ARTHUR, J. C., JR.; BORGES, J. S.; MALHEIROS, R.; LEMOS, C. C. Z.; FERREIRA, E. V. O.; FERRAZ, A. D. V. Responses of Clonal Eucalypt Plantations to N, P and K Fertilizer Application in Different Edaphoclimatic Conditions. **Forests**, v.7, n.2, pp.1-15, 2016.

MELO, E. N. de; SOUTO, A. G. de L.; CAVALCANTE, L. F.; DINIZ, B. L. M. T.; CAVALCANTE, I. H. L.; FERREIRA FILHO, R. M.; SILVA, M. R. M. da; OLIVEIRA, C. J. A.; MELO, P. A. F. R. de. Leaf mineral composition and noni fruit production under vegetal mulching and potassium fertilization. **Scientia Horticulturae**, v.281, p. 109990, 2021.

MOCHIUTTI, S; MELÉM JUNIOR, N. J.; FARIAS NETO, J. T. de; QUEIROZ, J. A. L. de. **Taxi-branco (*Sclerolobium paniculatum*): leguminosa arbórea para a recuperação de áreas degradadas pela agricultura migratória**. Comunicado técnico. Embrapa Amapá, 1999. 5p.

MOLION, L. C. B. 1987. On the dynamic climatology of the Amazon basin and associated rain-producing mechanisms. In: The Geophysiology of Amazonia Vegetation and Climate Interactions. New York, John Wiley and Sons.

MORAES, B. C. de; COSTA, J. M. N. da; COSTA, A. C. L. da; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da pluviosidade no estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, n.2, pp. 207 – 214, 2005.

MOSTAGHIMI, F.; SEYEDI, N.; SHAFIEI, A. B.; CORREIA, O. How do leaf carbon and nitrogen contents of oak hosts affect the heterotrophic level of *Loranthus europaeus*? Insights from stable isotope ecophysiology assays. **Ecological Indicators**, v. 125, p.107583, 2021.

OTTO, M. S. G.; VERGANI, A. R.; GONÇALVES, A. N.; VRECHI, A.; SILVA, S. R.; STAPE, J. L. Fotossíntese, condutância estomática e produtividade de clones de *Eucalyptus* sob diferentes condições edafoclimáticas. **Revista Árvore**, vol.37 n.3, 2013.

POUR, A. P.; FARAHBAKHS, H.; TOHIDINEJAD, E. Nitrogen, phosphorous and potassium levels affected growth indices, leaf gas exchange parameters and biomass production of henna (*Lawsonia inermis* L.) ecotypes. **Industrial Crops and Products**, v.163, pp.113297, 2021.

RAGEL, P.; RADDATZ, N.; LEIDI, E. O.; QUINTERO, F. J.; PARDO, J. M. Regulation of K<sup>+</sup> nutrition in plants. **Frontiers in Plant Science**, v.10, pp.1–21, 2019.

RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; KATO, O. R.; VASCONCELOS, S. S.; OLIVEIRA, F. DE A. Acúmulo de biomassa e nutrientes de duas leguminosas arbóreas introduzidas em sistema de pousio na Amazônia. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 3, p. 735-746, 2016.

REIS, S. M.; MORANDI, P. S.; OLIVEIRA, B.; OLIVEIRA, E. A. de; VALADÃO, M. B. X.; MARIMON, B. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H. Influência do sombreamento no desenvolvimento inicial e eficiência no uso de nutrientes de *Dilodendron bipinnatum* Radkl (Sapindaceae). **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 581-590, 2015.

RICKEN, P.; HESS, A. F.; BORSOI, G. A. Relações biométricas e ambientais no incremento diamétrico de *Araucaria angustifolia* no planalto serrano catarinense. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1592-1603, 2018.

SALOMÃO, R. P.; BRIENZA JUNIOR, S.; ROSA, N. A. Dinâmica de reflorestamento em áreas de restauração após mineração em unidade de conservação na Amazônia. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 1–24, 2014.

SANTOS, F. M.; CHAER, G. M.; DINIZ, A. R.; BALIEIRO, F. de C. Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a sandy tropical soil. **Forest Ecology and Management**, v. 384, p. 110–121, 2017.

SAPORETTI JUNIOR, A. W.; MEIRA NETO, J. A. A.; ALMADO, R. de P. Fitossociologia de Cerrado *sensu stricto* no Município de Abaeté-MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 413-419, 2003.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V. G. **Manejo da biomassa e sustentabilidade nutricional em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em pequenas propriedades rurais.** **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 144-156, 2019.

SILVA, C. E. M.; GONÇALVES, J. F. de C.; FELDPAUSCH, T. R.; LUIZÃO, F. J.; MORAIS, R. R.; RIBEIRO, G. O. Eficiência no uso dos nutrientes por espécies pioneiras crescidas em pastagens degradadas na Amazônia central. **Acta Amazonica**, v. 36, n.4, pp. 503-512, 2006.

SILVA, L. O.; COSTA, D. A.; SANTO FILHO, K. do E.; FERREIRA, H. D.; BRANDÃO, D. Levantamento florístico e fitossociológico em duas áreas de Cerrado *sensu stricto* no Parque Estadual da Serra de Caldas Novas, Goiás. **Acta Botanica Brasilica**, v. 16, n. 1, p. 43-53, 2002.

SILVA, M. O. dos S.; SILVA, M. G. da; BUFALINO, L.; ASSIS, M. R. de; GONÇALVES, D. de A.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. de P. Variations in

productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 1, p. 211–224, 2021.

SILVEIRA, R.L.V.A.; GAVA, J.L.; MALAVOLTA, E. **O potássio na cultura do eucalipto**. In YAMADA, T.; ROBERTS, T.L (Ed.). Potássio na agricultura brasileira Piracicaba: POTAFÓS, 2005. cap. 20, p. 523-590.

SOUZA, E. B.; LOPES, M. N. G.; ROCHA, E. J. P.; SOUZA, J. R. S.; CUNHA, A. C.; SILVA, R. R.; FERREIRA, D. B. S.; SANTOS, D. M.; CARMO, A. M. C.; SOUSA, J. R. A.; GUIMARÃES, P. L.; MOTA, M. A. S.; MAKINO, M.; SENNA, R. C.; SOUSA, A. M. L.; MOTA, G. V.; KUHN, P. A. F.; SOUZA, P. F. S.; VITORINO, M. I. Pluviosidade climatológica sobre a Amazônia oriental durante o período chuvoso: observações e simulações regionais com o RegCM3. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n.2, p. 111-124, 2009.

TAVARES, L. de S.; VALADÃO, F. C. de A.; WEBER, O. L. dos S.; ESPINOSA, M. M. Análise multivariada de espécies florestais nativas em relação aos atributos químicos e texturais do solo na região de Cotriguaçu-MT. **Ciência Florestal**, v.29 n.1, pp.281-297, 2019.

TAYLOR, H. M.; WILLATT, S. T. Shrinkage of soybean roots. **Agronomy Journal**, v. 75, p. 818-820, 1983.

TEIXEIRA, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; ARTHUR JÚNIOR, J.C.; DEZORDI, C. *Eucalyptus* sp seedling response to potassium fertilization and soil water. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 1, p. 47-63, 2008.

TEIXEIRA, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ARTHUR JÚNIOR, J. C.; DEZORDI, C. *Eucalyptus* sp seedling response to potassium fertilization and soil water. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 1, p. 47-63, 2008.

TONINI, H.; SCHWENGBER, D. R.; MORALES, M. M.; OLIVEIRA, J. M. F. de. Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* sob diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, e201801569, p. 1-8, 2018.

UZUN, H.; YILDIZ, Z.; GOLDFARB, J. L.; CEYLAN, S. Improved prediction of higher heating value of biomass using an artificial neural network model based on proximate analysis. **Bioresource Technology**, v. 234, p. 122–130, 2017.

VALADÃO, M. B. X; MARIMON JR., B. H.; MORANDI, P. S.; REIS, S. M. OLIVEIRA, B.; OLIVEIRA, E. A.; MARIMON, B. S. Initial development and biomass partitioning of *Physocalymma scaberrimum* Pohl (Lythraceae) under different shading levels. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 129-139, 2014.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.

WALTERS, B.B.; SABOGAL, C.; SNOOK, L.K.; ALMEIDA, E. Constraints and opportunities for better silvicultural practice in tropical forestry: an interdisciplinary approach. **Forest Ecology and Management**, v.209, p. 3–18, 2005.

WARREN, C. R.; ARANDA, I.; CANO, F. J. Responses to water stress of gas exchange and metabolites in *Eucalyptus* and *Acacia spp.* **Plant, Cell and Environment**, v.34, p.1609–1629, 2011.

WENG, X. Y.; ZHENG, C. J.; XU, H. X.; SUN, J. Y. Characteristics of photosynthesis and functions of the water-water cycle in rice (*Oryza sativa* L.) leaves in response to potassium deficiency. **Physiologia Plantarum**, v.131, pp. 614-621, 2007.

YIN GUANG-CAI, ZHOU GUO-YI, MORRIS JIM, HUANG ZHI-HONG, CHU GUO WEI, ZHOU GUANG-YI. Sap flow response of Eucalyptus (*Eucalyptus urophylla*) to environmental stress in south china. **Journal of Zhejiang University Science**, v. 5, p. 1218-1225, 2004.

ZORB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture - Status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, v.171, pp.656–669, 2014.

#### 4. EFFECT OF PHOSPHORUS AND POTASSIUM ON GAS EXCHANGES OF *Tachigali vulgaris*<sup>1</sup>

##### ABSTRACT

*Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima is a pioneer species with great potential for reforestation. The inadequate supply of phosphorus and potassium results in nutritional disorders, requiring nutritional complementation. This study aimed to evaluate the effect of phosphorus (P) and potassium (K) doses on *Tachigali vulgaris* gas exchange. Three doses of P (0, 26.7 and 53.5 kg<sup>-1</sup> ha) and three doses of K (0, 50 and 100 kg<sup>-1</sup> ha) were applied in a 3x3 factorial scheme and randomized block design. The data were submitted to analysis of variance using the Tukey 1% test and Pearson's linear correlation test. Potassium fertilization provided increases of approximately 30% in the rate of liquid photosynthesis ( $P_N$ ). Stomatic conductance ( $G_s$ ), internal CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ), perspiration (E), instantaneous caboxilation efficiency ( $\Phi_C$ ), water use efficiency (EWU) and intrinsic water use efficiency (iEWU) were also favored with a dose of 78.2 g kg<sup>-1</sup> K, suggesting their role in regulating essential physiological processes for plant growth. The highest  $P_N$  values were observed with application of 33.1 g kg<sup>-1</sup> P and 78.2 g kg<sup>-1</sup> K, with rates of 4.28 and 4.86  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectively, which also occurred with E,  $\Phi_C$ , EWU and iEWU. It was observed that P exerted antagonistic effects on K absorption, which may also have impaired Mg<sup>2+</sup> absorption due to the fact that Ca<sup>2+</sup> is an accompanying ion of potassium fertilizer.

**Keywords:** Forest sustainability; Mineral fertilization; Photosynthesis rate; Stomatal conductance.

---

<sup>1</sup> Publicado na revista *Australian Journal of Crop Science*, v.14(12), p.1961-1969, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.12.2838>

## 4.1 Introduction

Increasing the availability of water and nutrients accelerates forest stand growth by increasing leaf area, photosynthetic capacity (Munger et al., 2003) and plant tolerance to different conditions, including stresses (Shahabifar et al., 2019; Wu et al., 2019), which favors storage of primary metabolism and production of secondary metabolism substances (Gonçalves et al. 2012). Inadequate supply of an essential element results in nutritional disorders (Taiz and Zeiger 2013), so that nutritional complementation is one of the determining factors for success in reforestation projects.

To understand the factors that control the growth of forests and the use of natural resources, several studies have already been conducted (Hubbard et al., 2004; Yin et al., 2004; Teixeira et al., 2008; Machado et al., 2010; Ferreira et al., 2012), and in these the efficiency of resource use, constitutes an important index for the definition of management practices that increase productivity and sustainability, since the final production of wood is the result of the interaction of genotype and environment. However, there are few works dealing specifically with fertilization management, with the perspective of increasing the efficiency of use by planted forests.

The species *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima, Fabaceae, occurs throughout the Amazon region, up to the western states of Bahia, Minas Gerais, Goiás and Mato Grosso (Silva et al., 2002; Saporetti Junior et al., 2003). It is a pioneer species that frequently initiates secondary succession in open areas (Carvalho 1994), being considered ideal for reforestation due to its high biomass production capacity (Felfili et al., 1999), rapid growth in adverse conditions and high resistance to environmental disturbances. According to Freitas et al. (2012), *T. vulgaris* plants can be indicated for use in degraded area recovery projects, both for full sun conditions and for 50% seedling shading. Farias et al. (2016), found that *T. vulgaris* performed better than the eucalyptus in a reforestation experiment in a degraded area, with a three times higher survival and growth rate, in addition to additional benefits, such as double the production of burlap and lower growth of invasive grasses.

Among essential macronutrients, phosphorus is one of the most striking due to its low availability in the soil, a condition resulting from the presence of kaolinite, Fe and Al oxides, and acidity conditions normally observed in the field. The adequate availability of phosphorus is fundamental from the initial stages of plant development, and

subsequent compensation is not effective (Zucareli et al., 2006). Leguminous forest species are highly responsive to phosphate fertilization, and phosphorus deficiency results in decreased amounts of leaves and nodules, resulting in lower photosynthetic efficiency and biological fixation of atmospheric N (Chaudhary et al., 2008).

Potassium is the second most extracted nutrient by plants and seeds, having important functions, including increasing the tolerance of plants to different stresses (Zamani et al., 2020), despite remaining in ionic form within the plant. It acts in the regulation of physiological processes, such as enzymatic activation, cation/anion balance, sodium transporters and hydrogen pump (hydrogen - ATPases), opening and closing of stomata, sugar transport, protein synthesis and ATP production (Almeida et al., 2007; Zamani et al., 2020).

Therefore, the study of the ecophysiological strategies used by the trees, related to the use of physical resources, is necessary to improve the management techniques of planted forests and to subsidize the assessment of the most efficient species and genotypes, in addition to the definition of management practices that may increase the productivity and sustainability of forest plantations. Considering the determining role of gas exchange for the understanding of carbon dynamics in the forest ecosystem, this work aimed to evaluate the effect of phosphorus and potassium fertilization on gas exchange in *T. vulgaris* plantations.

## 4.2 Materials and methods

### 4.2.1 Experimental site

The experiment was installed in March 2016 at Fazenda Escola de Igarapé-Açu (FEIGA), an experimental station at the Federal Rural University of the Amazon (UFRA), which is located in the municipality of Igarapé-Açu, State of Pará, Brazil (01°07'33 "S, 47 ° 37'27" W). The region's climate falls under the category of wet megathermic, type Am of the Köppen classification, with annual averages of temperature of 25°C, relative humidity of 85% and precipitation of 2350 mm, with a strong concentration between the months of January to June and rarer from July to December (Hohnwald et al., 2019; Ramos et al., 2009). At the site of the experiment, a meteorological station was installed that collected climatic data during the planting evaluation period (Fig 1).

**Table 1.** Chemical and physical attributes of the soil in the experimental area up to 1.2 meters deep, determined before the experiment was implemented.

Soil layer (cm)	pH	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup>	H <sup>+</sup> Al <sup>+3</sup>	SB	CEC	P	V	O.M.	Granulometry		
												Sand	Silt	Clay
(cm)	(CaCl <sub>2</sub> )								(mg/dm <sup>3</sup> )	%	%	(g/kg)		
0-20	4.1	0.041	0.2	0.1	0.4	2	5.9	2.34	3	15	1.2	170	140	690
20-40	4	0.021	0.2	0.1	0.6	2.2	4.2	2.52	2	13	0.5	230	80	690
40-60	4	0.01	0.2	0.1	0.6	2.2	4.2	2.51	2	12	0.5	270	130	600
60-80	4,1	0.01	0.2	0.1	0.5	2	4.6	2.31	1	13	0.5	270	150	580
80-100	4,1	0.01	0.2	0.1	0.4	2	5.8	2.31	4	13	0.5	290	150	560
100-120	4,1	0.031	0.2	0.1	0.4	1.8	5.3	2.13	1	16	0.5	370	120	510

*pH = hydrogenionic potential; K<sup>+</sup> = potassium; Ca<sup>+2</sup> = calcium; Mg<sup>+</sup> = magnesium; Al<sup>+3</sup> = aluminium; H<sup>+</sup>Al<sup>+3</sup> = hydrogen and aluminium; SB = sum of bases; CEC = cation exchange capacity; P = phosphorus; V = base saturation; M.O. = organic matter. The levels of K, Na, Ca and Mg, exchangeable in the soil were determined by atomic absorption spectrophotometry and flame spectrophotometry (Raij et al., 2000).*

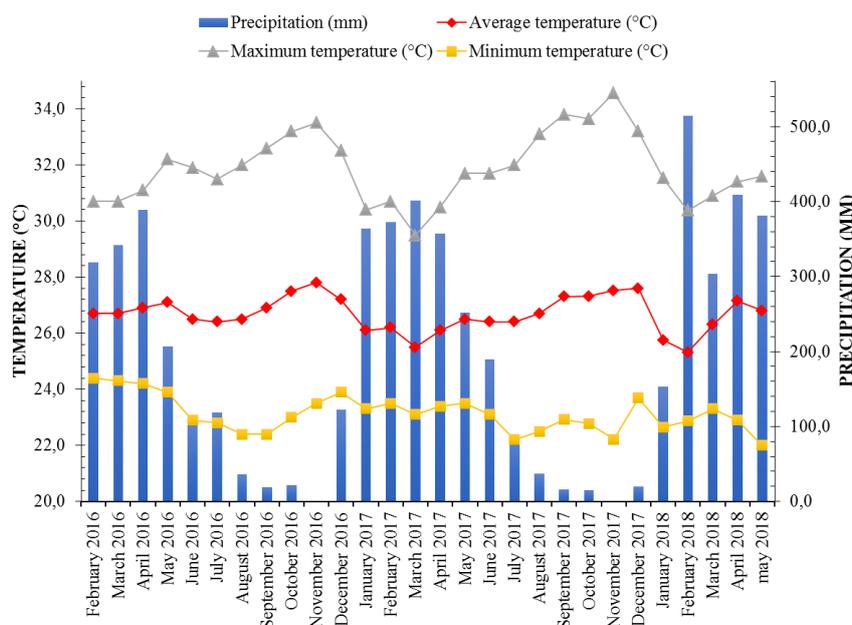
The experimental area has a flat relief and the soil was classified as dystrophic Red-Yellow Latosol, medium texture (266 g kg<sup>-1</sup> of clay) (Embrapa, 1999). Before the installation of the experiment, the chemical and physical attributes of the soil up to 1.2 meters deep were characterized in the Soil Analysis Laboratory of Embrapa Amazônia Oriental, in Belém, State of Pará (Table 1). Soil samples were collected at random throughout the planting area to remove the composite samples. Although the acidity levels found were high (Raij, 1991), it was decided not to use limestone to correct the

soil, considering the possibility of evaluating the growth potential of *T. vulgaris* with fertilizers under acidic conditions.

#### 4.2.2 Experiment installation and conduction

After 30 days of implantation of the experiment, the planting of *T. vulgaris* was submitted to phosphate and potassium fertilization through the application of three doses of P (0, 26.7 and 53.5 kg ha<sup>-1</sup>, in the form of superphosphate) triple) and three doses of K (0, 50 and 100 kg ha<sup>-1</sup>, in the form of potassium chloride), as well as their combinations, in a 3x3 factorial scheme (Table 2). The fertilizer doses were defined according to recommendations for fast growing forest species in clayey soils of medium texture (Silveira et al., 2001; Andrade, 2004; Arco-verde et al., 2005), which were divided into two more applications in during the first year of cultivation, at 60 days and 12 months.

The planting area was divided into four blocks, five meters apart, in order to maximize the effect of treatments on each plot. Each block was divided into nine plots (treatments), with an area of 80 m<sup>2</sup> (10 x 8 m), containing 16 plants in the 3 x 2 m spacing (Fig. 2). The external line of each plot served as a border, so the useful area for evaluations was formed by the 4 central trees of each plot. The experimental design was in randomized blocks, with four replications, totaling 36 plots.

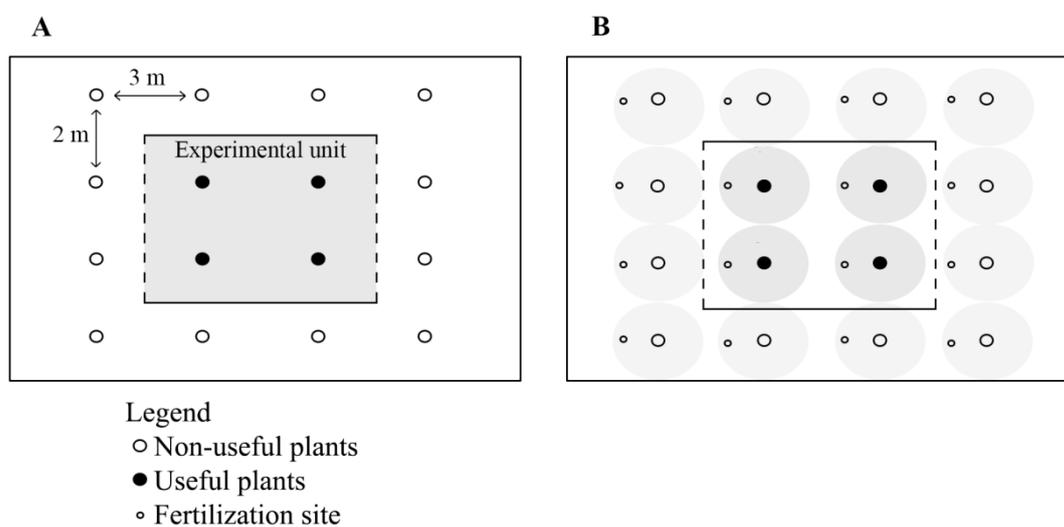


**Figure 1.** Monthly rainfall (mm), maximum, average and minimum monthly temperatures (°C), at the experiment site, during the period of evaluation of the planting of *T. vulgaris* in Igarapé-açu, PA.

**Table 2.** Amounts of fertilizers applied (commercial products) and amount of nutrients actually offered, per treatment, to establish the factorial test for the planting of *T. vulgaris*.

Treatments	Fertilizers applied		Effectively provided nutrients					
	TSP	KCl	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P	K <sub>2</sub> O	K	Ca	Cl
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----		----- kg ha <sup>-1</sup> -----					
P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
P <sub>0</sub> K <sub>1</sub>	0	100	0	0	50	39.1	0	39
P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	0	200	0	0	100	78.2	0	78
P <sub>1</sub> K <sub>0</sub>	65.2	0	26.7	16.6	0	0	6.5	0
P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	65.2	100	26.7	16.6	50	39.1	6.5	39
P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	65.2	200	26.7	16.6	100	78.2	6.5	78
P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	130.4	0	53.5	33.1	0	0	13	0
P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	130.4	100	53.5	33.1	50	39.1	13	39
P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	130.4	200	53.5	33.1	100	78.2	13	78

TSP: Triple superphosphate; KCl: Potassium chloride



**Figure 2.** Schematic representation of plots (A) and fertilization sites (B) for evaluation of *T. vulgaris* fertilized with P and K, Igarapé-açu, PA.

#### 4.2.3 Gas exchange analysis

The gas exchange evaluations were carried out in April 2018, on fully expanded and mature leaves, in the middle third of the treetops, between 9:00 am and 11:00 am, representing the period when photosynthesis reaches its maximum values determined from the daytime leaf gas exchange curves. The net photosynthetic rate ( $P_N$ ), stomatal conductance ( $G_S$ ), transpiratory rate ( $E$ ) and internal CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ), were

calculated using the values of the variations in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O vapor concentrations inside the chamber, using an infrared gas analyzer (Infrared gas analyzer - IRGA), model Li-6400 (Li-Cor, Biosciences Inc., Nebraska, USA). Leaf temperature ( $L_T$ ) data were also obtained with IRGA. Photosynthetically active radiation (PAR), atmospheric CO<sub>2</sub> inside the leaf chamber and the chamber block temperature were kept constant during measurements, with values of 1000  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$  and 26 to 27 °C, respectively (Silvestre et al., 2017). An artificial radiation source (ADC BioScientific Ltd., Hoddesdon, UK) was used, coupled to the IRGA, for constant maintenance of the photon quantity. Using the values of  $P_N$ ,  $E$ ,  $G_S$  and  $C_i$ , the following relationships were calculated:  $EWU = A/E$ ,  $iEWU = P_N/G_S$  and  $\Phi_c = P_N/C_i$  (Zhang et al. 2001), where  $EWU$  means efficiency in the use of water,  $iEWU$  means intrinsic efficiency of water use and  $\Phi_c$ , which corresponds to instant carboxylation efficiency.

#### 4.2.4 Data analysis

The experimental data were evaluated for normality and homogeneity of variances by the Shapiro-Wilk and Bartlett tests, respectively. Subsequently, for parametric variables, the means of treatments were subjected to analysis of variance and comparisons of means by the Tukey test and Pearson's linear correlation test, using the statistical software SAS 9.1.3 (Sas, 2007). For non-parametric variables, the data were evaluated using the Kruskal-Wallis test with Bonferroni and correction using *RStudio* software version 1.1.383 (*R* Core team, 2015). All analyzes were assessed at the level of 1% significance.

### 4.3 Results

#### Net photosynthesis rate

On the rates of net photosynthesis per unit leaf area ( $P_N$ ), there was a significant effect ( $p \leq 0.01$ ) for the factors doses of P and doses of K, as well as their interaction (PxK). The highest averages for  $P_N$  were found in treatments  $P_2K_0$  (33.1 g kg<sup>-1</sup> of P; 13 g kg<sup>-1</sup> of Ca) and  $P_0K_2$  (78.2 g kg<sup>-1</sup> of K and; 78 g kg<sup>-1</sup> of Cl), with values 4.28 and 4.86  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectively, which differed statistically from the other treatments (Table 3 and Fig. 3A). It was observed that the highest mean values of  $P_N$  occurred in the treatments with the highest doses of triple superphosphate and potassium chloride (Fig. 3A). The  $P_N$  correlated positively and significantly ( $p \leq 0.01$ ), using the T test, with  $G_S$  (0.593),  $E$  (0.507),  $C_i$  (0.771),  $EWU$  (0.852),  $iEWU$  (0.712),  $\Phi C$  (0.997) and  $L_T$  (-0.375) (Table 4).

#### Stomatal conductance

There was a significant effect on  $G_S$ , when considering the influence of P and K doses, in addition to the interaction of factors (PxK) ( $p < 0.01$ ). The highest averages of  $G_S$  were found in treatments  $P_0K_0$  (without fertilizer application),  $P_0K_1$  (39.1 g kg<sup>-1</sup> K and 39 g kg<sup>-1</sup> Cl) and  $P_2K_2$  (33.1 g kg<sup>-1</sup> P, 78.2 g kg<sup>-1</sup> K, 13 g kg<sup>-1</sup> Ca and 78 g kg<sup>-1</sup> Cl), with the values of 0.36, 2.26 and 0.37 mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectively (Fig. 3B). According to the values of Pearson's correlation coefficients, the  $G_S$  presented positive and significant correlations at the level of 1% probability of error, by the T test, with  $P_N$  (0.593),  $E$  (0.977),  $\Phi C$  (0.65) and  $L_t$  (-0.648) (Table 4).

#### Transpiratory rate

There was a significant effect on  $E$  when considering the influence of P and K doses, in addition to the interaction of factors (PxK) ( $p < 0.01$ ). The highest mean for  $E$  was found with the  $P_2K_2$  treatment  $P_2K_2$  (33.1 g kg<sup>-1</sup> P; 78.2 g kg<sup>-1</sup> K; 13 g kg<sup>-1</sup> Ca and 78 g kg<sup>-1</sup> Cl), with the value of 5.22 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (Fig. 3C). When analyzing Pearson's correlation coefficients, it appears that  $E$  was positively and significantly correlated to the 1% probability of error, by the T test, with  $P_N$  (0.507),  $G_S$  (0.977),  $\Phi C$  (0.57) and  $L_T$  (-0.618).

**Table 3.** Average results of gas exchange variables in *T. vulgaris* planting, submitted to fertilization doses with phosphorus and potassium.

Doses of P	Doses of K			
	0	100	200	Average <sup>(1)</sup>
	$P_N^{(2)}$	$P_N^{(2)}$	$P_N^{(2)}$	$P_N^{(2)}$
0	2,96 aB	1,65 aA	4,86 bC	3,16 a
65,22	3,43 aB	2,26 bA	3,69 aB	3,13 a
130,43	4,28 bC	2,19 bA	3,81 aB	3,43 a
Average <sup>(1)</sup>	3,56 b	2,03 a	4,12 c	
	$g_s^{(2)}$	$g_s^{(2)}$	$g_s^{(2)}$	$g_s^{(2)}$
0	0,36 bB	0,26 bA	0,35 bB	0,32 b
65,22	0,27 aB	0,18 aA	0,24 aB	0,23 a
130,43	0,33 bB	0,25 bA	0,37 bB	0,32 b
Average <sup>(1)</sup>	0,32 b	0,23 a	0,32 b	
	$C_i^{(2)}$	$C_i^{(2)}$	$C_i^{(2)}$	$C_i^{(2)}$
0	126,32 aA	123,45 aA	137,53 abB	129,11 a
65,22	135,12 bA	134,34 bA	139,64 bB	136,37 b
130,43	136,96 bB	129,05 abA	133,45 aA	133,15 ab
Average <sup>(1)</sup>	132,81 a	128,95 a	136,87 b	
	$E^{(2)}$	$E^{(2)}$	$E^{(2)}$	$E^{(2)}$
0	5,58 bB	4,19 bA	5,09 bAB	4,95 b
65,22	4,06 aC	3,23 aA	3,81 aB	3,69 a
130,43	5,01 bB	4,01 bA	5,22 bC	4,75 b
Average <sup>(1)</sup>	4,88 b	3,81 a	4,71 b	
	$\Phi C^{(2)}$	$\Phi C^{(2)}$	$\Phi C^{(2)}$	$\Phi C^{(2)}$
0	0,0234 aAB	0,0134 aA	0,0353 bB	0,0240 a
65,22	0,0254 aB	0,0168 bA	0,0264 aB	0,0228 a
130,43	0,0312 bB	0,0171 bA	0,0286 aB	0,0256 a
Average <sup>(1)</sup>	0,0267 b	0,0157 a	0,0301 c	
	$EWU^{(2)}$	$EWU^{(2)}$	$EWU^{(2)}$	$EWU^{(2)}$
0	0,5318 aB	0,3948 aA	0,9531 bC	0,6265 a
65,22	0,8445 bB	0,7019 cA	0,9709 bC	0,8391 b
130,43	0,8541 bB	0,5481 bA	0,7338 aB	0,7119 a
Average <sup>(1)</sup>	0,7434 b	0,5482 a	0,8859 b	
	$iEWU^{(2)}$	$iEWU^{(2)}$	$iEWU^{(2)}$	$iEWU^{(2)}$
0	8,22 aB	6,14 aA	13,71 bC	9,35 a
65,22	12,36 bA	12,42 cA	15,19 cB	13,33 b
130,43	12,61 bC	8,77 bA	10,12 aB	10,51 a
Average <sup>(1)</sup>	11,06 b	9,11 a	13,01 b	
	$L_T^{(2)}$	$L_T^{(2)}$	$L_T^{(2)}$	$L_T^{(2)}$
0	25,23 aA	25,49 aA	25,16 aA	25,29 a
65,22	25,11 aA	26,83 aA	26,11 aA	26,01 a
130,43	25,93 aA	26,57 aA	25,84 aA	26,11 a
Average <sup>(1)</sup>	25,42 a	26,29 a	25,71 a	

(1) Average values in the absence of interaction between the treatments of P and K, and the means followed by the same letter did not differ by 1% by the Tukey test; (2) Mean values in the significant interaction between the treatments of P and K, and the means accompanied by lower case letters in the same column (P) and upper case letters in the same line (K) do not differ by 1% by the Tukey test.

**Table 4.** Pearson's correlation matrix of the 8 gas exchange variables in *T. vulgaris* planting, submitted to fertilization doses with phosphorus and potassium, Igarapé-Açu, PA.

Variables	$P_N$	$g_s$	$C_i$	$E$	$\Phi C$	$EWU$	$iEWU$	$L_t$
$P_N$	1							
$g_s$	0,593*	1						
$C_i$	0,77*	-0,024	1					
$E$	0,507*	0,977*	-0,13	1				
$\Phi C$	0,997*	0,65*	0,722*	0,57*	1			
$EWU$	0,852*	0,102	0,977*	-0,005	0,812*	1		
$iEWU$	0,712*	-0,127	0,977*	-0,205	0,661*	0,965*	1	
$L_t$	-0,375*	-0,648*	0,121	-0,618	-0,417*	-0,08	0,109	1

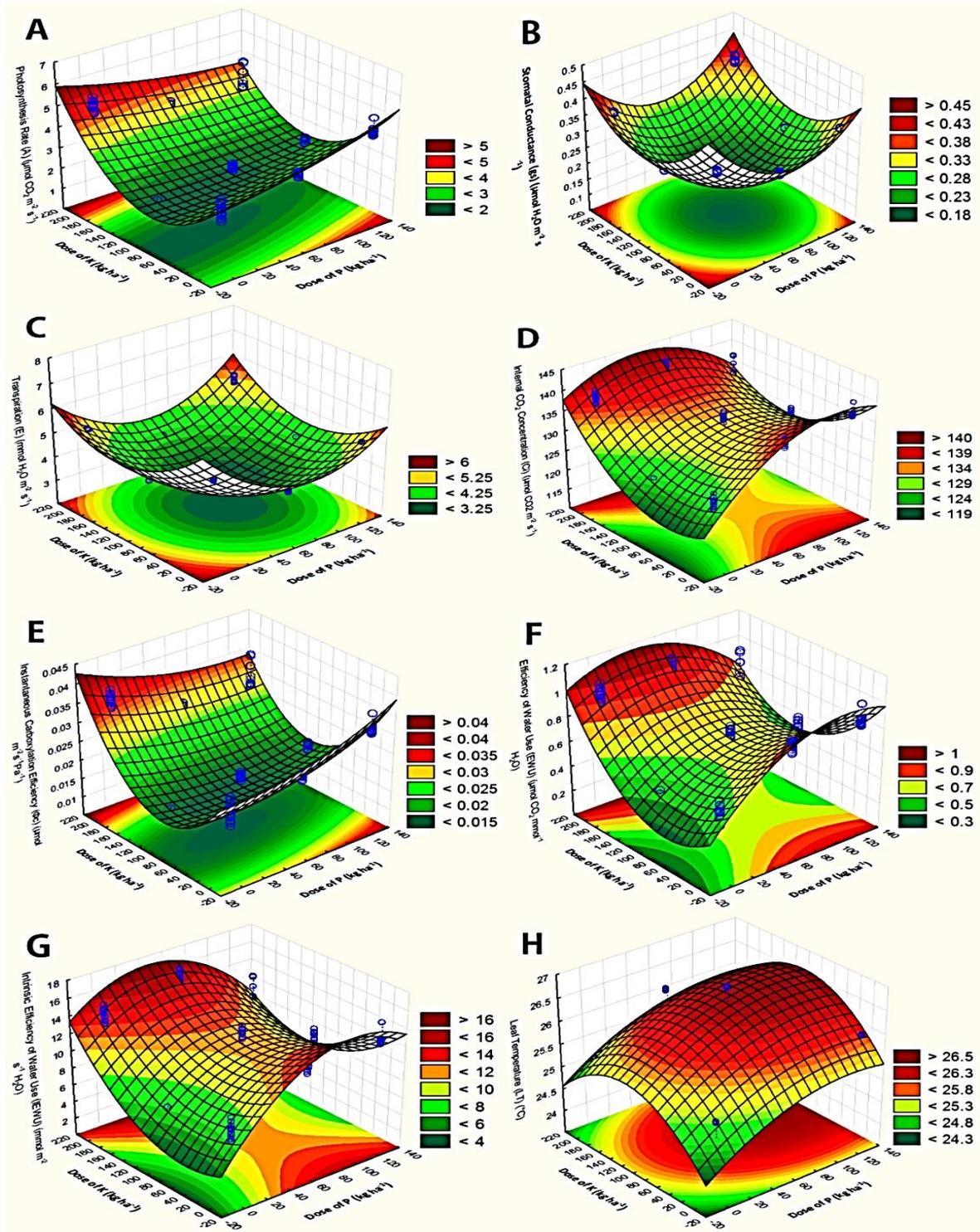
\*Significant at 1% probability of error, by the T test;  $P_N$  = net photosynthetic rate per unit leaf area ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );  $g_s$  = stomatal conductance to water vapor ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );  $E$  = transpiratory rate ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );  $C_i$  = internal  $\text{CO}_2$  concentration ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );  $\Phi C$  = instant carboxylation efficiency ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ );  $EWU$  = Water use efficiency ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ );  $iEWU$  = Intrinsic water use efficiency ( $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ );  $L_T$  = Leaf temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ).

#### Internal $\text{CO}_2$ concentration

There was a significant effect on the  $C_i$  of the factors P and K, in addition to the interaction between them (PxK) ( $p < 0.01$ ). The highest averages of  $C_i$  were found in treatments  $P_2K_0$  (33.1  $\text{g kg}^{-1}$  P and 13  $\text{g kg}^{-1}$  Ca) and  $P_1K_2$  (16.6  $\text{g kg}^{-1}$  P, 78.2  $\text{g kg}^{-1}$  K, 6.5  $\text{g kg}^{-1}$  Ca and 78  $\text{g kg}^{-1}$  Cl), resulting in 136.96 and 139.64  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectively (Fig. 3D). The  $C_i$  showed correlations with positive and significant at the level of 1% probability of error, by the T test, with  $P_N$  (0.77),  $\Phi C$  (0.57) and  $L_T$  (-0.618).

#### Water use efficiency

There was a significant effect on the  $EWU$  when considering the influence of P and K doses, in addition to the interaction of factors (PxK) ( $p < 0.01$ ). The treatments  $P_0K_2$  (78.2  $\text{g kg}^{-1}$  K and 78  $\text{g kg}^{-1}$  Cl) and  $P_1K_2$  (16.6  $\text{g kg}^{-1}$  P, 78.2  $\text{g kg}^{-1}$  K, 6.5  $\text{g kg}^{-1}$  Ca and 78  $\text{g kg}^{-1}$  Cl), presented the highest averages of  $EWU$ , with the values of 0.9531 and 0.9709  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ , respectively (Fig. 3F). In relation to Pearson's correlation coefficients (Table 4), it appears that the  $EWU$  correlated positively and significantly to the 1% probability of error, by the T test, with  $P_N$  (0.852),  $C_i$  (0.977),  $\Phi C$  (0.812) and  $iEWU$  (0.965).



**Figure 3.** Graph of response surface for the variables photosynthetic rate (A), stomatal conductance (B), transpiration rate (C), internal  $\text{CO}_2$  concentration (D), instantaneous carboxylation efficiency (E), water use efficiency (F), intrinsic water use efficiency (G) and leaf temperature (H), in *T. vulgaris* plantation, according to the application of P and K.

### Intrinsic efficiency of water use

A significant effect on  $iEWU$  was observed when considering the influence of P and K doses, in addition to the interaction of factors (PxK) ( $p < 0.01$ ). The highest averages were found in the  $P_1K_2$  treatment (16.6 g kg<sup>-1</sup> P, 78.2 g kg<sup>-1</sup> K, 6.5 g kg<sup>-1</sup> Ca and 78 g kg<sup>-1</sup> Cl), with the values of 15.19 mmol m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O (Fig. 3G). The  $iEWU$  correlated positively and significantly at the level of 1% probability of error, using the T test, with  $P_N$  (0.712),  $Ci$  (0.977),  $\Phi C$  (0.661) and  $EWU$  (0.965) (Table 4).

### Instant carboxylation efficiency

There was a significant effect on  $\Phi C$  when considering the influence of P and K doses, in addition to the interaction of factors (PxK) ( $p < 0.01$ ). The highest mean for the variable was found with the  $P_0K_2$  treatment (78.2 g kg<sup>-1</sup> K and 78 g kg<sup>-1</sup> Cl), resulting in 0.0353 ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ ) (Fig. 3E). It was found that the  $\Phi C$  correlated positively and significantly at the level of 1% probability of error, by the T test, with  $P_N$  (0.997),  $G_S$  (0.65),  $Ci$  (0.722),  $E$  (0.57),  $EWU$  (0.812),  $iEWU$  (0.965) and  $L_T$  (-0.417).

### Leaf temperature

There was a significant effect on the  $L_T$  of the doses of P, K and the interaction of factors (PxK) ( $p < 0.01$ ). The  $L_T$  means were statistically equal to each other, with no difference between treatments, ranging from 25.1 to 26.8 °C (Fig. 3H). The  $L_T$  showed correlations with positive and significant values at the level of 1% probability of error, by the T test, with  $P_N$  (-0.375),  $G_S$  (-0.648) and  $\Phi C$  (-0.417).

#### 4.4 Discussion

The high  $P_N$  rates of *T. vulgaris* plants corroborate the values of  $G_S$  (Fig. 3B), which also reflected in the higher rates of  $E$  on the plants submitted to treatments with higher doses of K (Fig. 3C). In a study by Gazola et al. (2019), the dose of 180 kg ha<sup>-1</sup> of K<sub>2</sub>O provided the highest total biomass values, with an increase of 18.2% in relation to the control, which translated into high photosynthetic rates. Silva et al. (2012) evaluated the impacts of fertilization on eucalyptus plantations in the initial growth stage in Quartzarenic Neossol found that, at 24 months, the group that received the highest dose of fertilizer had produced 50% more biomass compared to the other groups. Studies show that fast-growing forest species respond to K fertilization in the leaf area index (Christina et al., 2015; Epron et al., 2011; Inocencio et al., 2014), increasing the efficiency of the use of light in forest plantations.

Thus, fertilization with K can favor a greater intensity of interception of sunlight and photosynthetic processes, which in turn result in greater growth. This effect is also due to the functions performed by K in the plant, including the regulation of the osmotic potential of plant cells, controlling the opening and closing of stomata, resulting in greater efficiency in the use of water (Siddiqui et al., 2008; Taiz and Zeiger, 2013).

Photosynthetic activity can be affected by non-stomatal factors, notably factors that have a biochemical origin (Farquhar and Sharkey, 1982). This aspect can be studied when considering  $\Phi C$ , which is given by the relationship between photosynthesis and intracellular CO<sub>2</sub> concentration (Zhang et al., 2001). Photosynthesis is usually reduced by P deficiency (Turnbull et al., 2007) because there is a requirement for a balanced concentration of orthophosphate (Pi) in the cytosol (Walker and Robinson, 1978). The clear limitation of photosynthesis by cytosolic Pi was demonstrated in *Eucalyptus globulus* sequestering cytosolic Pi with mannose; when Pi was kidnapped with mannose, the maximum rate of photosynthesis was reduced by 83% (Turnbull et al., 2007).

Person's correlations show that the greater the  $P_N$ , the greater the values of  $G_S$ ,  $E$ ,  $C_i$ ,  $EWU$ ,  $iEWU$  and  $\Phi C$ . In the case of  $L_T$ , the results indicate that the lower the  $P_N$  value, the higher the leaf temperature. The regulation of stomatal opening through the absorption and release of K<sup>+</sup> is among the main mechanisms for controlling water loss by plants (Maathuis, 2009). Similar behavior can be observed with the management of fertilization, corroborating the high correlation found between the variables  $P_N$  and  $\Phi C$ , in which the

highest photosynthetic rates were accompanied by the highest values of instantaneous carboxylation efficiency (Fig. 3A and 3E).

The highest  $G_S$  value was found in the treatment with the maximum doses of P and K, which presented an average of  $0.37 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Fig. 3B). In an ecophysiological context, the way in which  $P_N$  and gas are related is extremely important, since as these two physiological variables vary proportionally, they allow  $C_i$  and  $EWU$  to remain at adequate levels, enabling the optimization of gas exchange and controlling absorption of carbon dioxide, essential in the formation of compounds resulting from photosynthesis. In fact, there was a positive and significant correlation between  $G_S$  and  $P_N$ ,  $E$  and  $\Phi C$ , indicating the existence of interdependence between the variables in question. The growth performance of plants can be improved by the supply of K through an improvement in stomatal movements (Lebaudy et al., 2008), mesophyll conductance (Longstreth and Nobel, 1980), chlorophyll synthesis (Onanuga et al., 2012) and assimilation and export to leaves (Zhao et al., 2001; Jin et al., 2011).

The observed reduction in  $G_S$ , besides implying a drop in  $\text{CO}_2$  assimilation, also affects  $E$  (Fig. 3C), since both are diffusive processes and lead to a reduction in the production of photoassimilates. During gas exchange, the absorption of carbon dioxide from the external environment promotes water loss and the reduction of this loss also restricts the entry of  $\text{CO}_2$  (Shimazaki et al., 2007). This interdependence expressed by the relationship between photosynthesis and transpiration indicates the  $EWU$ , in which the observed values relate to the amount of carbon that the plant fixes for each unit of evapotranspired water (Jaimez et al., 2005; Taiz and Zeiger, 2013). This process is influenced by climatic conditions, however the adequate nutritional supply tends to promote higher photosynthetic rates, implying higher yields (Melo et al., 2009).

Therefore, plants that are well supplied with K have higher  $EWU$ , which would result in an increase in the useful life of the leaves (Silva et al., 2002; Laclau et al., 2009), and consequently can increase the production of biomass. P supplementation may be related to an accumulation of proline, which is an osmotic adjuster, which could influence the osmotic regulation of stomatal guard cells, favoring the maintenance of cell turgor (Zamani et al., 2020).

It was observed that  $C_i$  showed a high correlation with  $P_N$  and  $EWU$ , with similar behavior in treatments with the application of intermediate doses of P, with the highest overall average found when considering the interaction with treatments with the

application of the highest doses of K, resulting in a value of  $136.87 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Mori et al. (2018), evaluating the fertilization with potassium and magnesium in *Acacia mangium* planting, found that the quantity of soil nutrients were not affected by the triple superphosphate fertilization, however, the fertilizer application increased the Mg content in the leaves. In addition to its function in the photosynthetic process as a structural component of chlorophyll, Mg is necessary in other physiological processes. In most cases, the involvement of Mg in metabolic processes depends on the activation of numerous enzymes, such as ribulose-1,5-bisphosphate (RuBP) carboxylase, a key enzyme in the process of photosynthesis and the most abundant on the planet. Several scientific studies report that a small reduction in leaf magnesium content has a significant impact on the photosynthetic rate (Farhat et al., 2016; Marschner, 2012).

According to Mulder's chart, P has antagonistic effects on K uptake and synergistic on Mg uptake, and Ca has antagonistic effects on K and Mg uptake (Crous et al., 2015). Following this theory, fertilization with P (and Ca as an accompanying ion) in plantations with fast-growing forest species can influence the harvest, reducing K uptake and increasing or reducing Mg uptake. However, the effects of P (and Ca) fertilization on Mg and K acquisitions have been tested mainly on agricultural crops and there are no reports on tree species plantations, despite the importance of assessing nutrient loss from plantation soils during the harvest.

Initially, it should be noted that the climatic conditions during the evaluation period (Figure 1), favored an increase in the content of water stored in the soil, with no water limitation for the growth of the trees. The results presented show that the intermediate dose of P together with  $39.1 \text{ g kg}^{-1}$  and  $78.2 \text{ g kg}^{-1}$  of K showed the best results for *EWU*, as well as for *iEWU*. These treatments also showed reduced *E* rates. During gas exchange, the absorption of carbon dioxide from the external environment promotes water loss and the reduction of this loss also restricts the entry of  $\text{CO}_2$  (Shimazaki et al., 2007).

This interdependence expressed by the relationship between  $P_N$  and *E* indicates the efficiency in the use of water, in which the observed values relate to the amount of carbon that the plant fixes for each unit of evapotranspired water (Jaimez et al., 2005; Taiz and Zeiger, 2013). Such interdependence was observed in high Pearson correlation coefficients between the variables  $P_N$ ,  $C_i$ ,  $\Phi C$  and *iEWU*. This process is influenced by climatic conditions, however the adequate nutritional supply tends to promote higher

photosynthetic rates, implying higher yields (Melo et al., 2009). Several studies show that potassium fertilization allows a considerable increase (up to 100%) in *EWU*, as reported by Stape et al. (2004), Binkley et al. (2004), Almeida et al. (2007) and Teixeira et al. (2008), working with *Eucalytus grandis*. Ferreira et al. (2012), evaluating young plants of *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl. submitted to green adubation, found *EWU* values close to  $3.5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ . The stomatal closure mechanism in order to restrict water loss through transpiration can be considered an adaptive strategy used by different species to limit water loss and to exceed water deficiency, as was verified for the woody species *Tabebuia aurea* Benth. & Hook. f ex S. Moore (Cabral et al., 2004) and *Minquartia guianensis* Aubl. (Liberato et al., 2006). The information in the literature suggests that the higher productivity in response to K is directly related to the fact that this element activates numerous enzymes and also participates as an intracellular solute in the stoma opening and closing process, regulating the process of carbon assimilation and water loss, increasing turgor and leaf expansion, providing greater use of solar radiation.

The instantaneous carboxylation efficiency showed a reduction of approximately 30% in the mean values in the control treatment compared to the  $P_0K_2$  treatment, which showed the best result. This reduction followed the behavior of the other physiological variables ( $P_N$ ,  $G_S$ ,  $C_i$ ,  $E$ , *EWU* and *iEWU*), as was also observed by Nascimento et al. (2014) in the species *Hymenaea courbaril* L. in response to the omission of P. In an ecophysiological context, the way in which  $P_N$  and  $G_S$  are related is extremely important, because as these two physiological variables vary proportionally, they allow  $C_i$  and the *EWU* remain at adequate levels, enabling the optimization of gas exchange and controlling the absorption of carbon dioxide, which is essential in the formation of compounds resulting from photosynthesis (Simões et al., 2018).

For  $L_T$ , there was a negative and significant correlation of this variable with some of the physiological variables studied ( $P_N$ ,  $G_S$ ,  $E$  and  $\Phi C$ ). Nascimento et al. (2014) evaluating the species *Hymenaea courbaril* L. in response to suppression of N, P and K, found that the absence of nitrogen resulted in a significant increase in leaf temperature compared to suppression of P and K. Aspects such as the reduction in transpiration, a consequence of the reduction in stomatal conductance (smaller stomatal opening), restricts heat dissipation together with the loss of water vapor (Taiz and Zeiger, 2013). Considering the microclimate conditions of planting, in which the canopy is formed, the

results show mild temperatures in the middle third of the plants, as a result of the greater retention of solar radiation in the upper third of the planting.

#### 4.5 Conclusion

Potassic fertilization in *T. vulgaris* plantation provided increases of approximately 30% in the  $P_N$ . The variables  $G_S$ ,  $C_i$ ,  $E$ ,  $\Phi_C$ , EWU and iEWU, were also favored with the dose of  $78.2 \text{ g kg}^{-1}$  of K, suggesting the action of K in the regulation of physiological processes such as control of plant water relations, sugar transport, protein synthesis and ATP production. Antagonistic effects were observed with the joint application of the highest doses of P and K, because the highest values of  $P_N$  were observed in treatments with  $33.1 \text{ g kg}^{-1}$  of P and  $78.2 \text{ g kg}^{-1}$  of K, with rates of  $4.28$  and  $4.86 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectively, which also occurred with the variables  $E$ ,  $\Phi_C$ , EWU and iEWU, indicating that P exerted antagonistic effects on the uptake of K, which may also have impaired the uptake of Mg due to Ca being an ion accompanying the potassium fertilizer.

#### Acknowledgements

The authors would like to thank the Federal Rural University of the Amazon for supporting the researchers. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

## REFERENCES

Almeida AC, Soares JV, Landsberg JJ, Rezende GD (2007) Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. *Forest Ecol Manag.* 251: 10-21.

Andrade LRM (2004) Corretivos e fertilizantes para culturas perenes e semiperenes. In: Sousa DM and Lobato E. *Cerrado: Correção do solo e adubação*. 2nd edn. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília.

Arco-verde MF, Tonini H, Mourão Jr. M (2005) A silvicultura nas savanas de Roraima. In: Barbosa RI, Xaud HAM, Souza JMC. (Ed.) *Savanas de Roraima: Etnoecologia, Biodiversidade e Potencialidades Agrossilvipastoris*. Boa Vista: FEMACT, 195-200.

Binkley D, Stape JL, Ryan MG (2004) Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecol Manag.* 193: 5-16.

Cabral EL, Barbosa DCA, Simabukuro EA (2004) Crescimento de plantas jovens de *Tabebuia aurea* (Manso) Benth. & Hook. f. ex S. Moore submetidas a estresse hídrico. *Acta bot bras.* 18: 241-251.

Carvalho PER (1994) *Espécies florestais brasileiras*. 1st edn. EMBRAPA - CNPF/SPI, Brasília.

Chaudhary MI, Adu-gyamfi JJ, Saneoka H, Nguyen NT, Suwa R, Kanai S, El-Shemy HÁ, Lightfoot DA, Fujita K (2008) The effect of phosphorus deficiency on nutrient uptake, nitrogen fixation and photosynthetic rate in mashbean, mungbean and soybean. *Acta Physiol Plant.* 30: 537-544.

Christina M, Le Maire G, Battie-Laclau P, Nouvellon Y, Bouillet J-P, Jourdan C, Gonçalves JLM, Laclau J-P (2015) Measured and modeled interactive effects of

potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. *Glob Chang Biol.* 21: 2022-2039.

Crous KY, Ósvaldsson A, Ellsworth DS (2015) Is phosphorus limiting in a mature *Eucalyptus* woodland? Phosphorus fertilisation stimulates stem growth. *Plant Soil.* 391: 293-305.

Embrapa (1999) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. In: Brasília, DF: Embrapa Produção da Informação. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.

Epron D, Laclau JP, Almeida JCR, Goncalves JLM, Ponton S, Sette CR, Nouvellon Y (2011) Do changes in carbon allocation account for the growth response to potassium and sodium applications in tropical *Eucalyptus* plantations? *Tree Physiol.* 32: 667-679.

Farhat N, Elkhouni A, Zorrig W, Smaoui A, Abdelly C, Rabhi M (2016) Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. *Acta Physiol Plant.* 38: 145.

Farias J, Marimon BS, Silva LCR, Petter FA, Andrade FR, Morandi OS, Marimon-Junior BH (2016) Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. *Forest Ecol Manag.* 368: 173-182.

Farquhar GD, Sharkey TD (1982) Stomatal conductance and photosynthesis. *Annu Rev Plant Biol.* 33: 317-345.

Felfili JM, Silva Júnior MC (1999) Distribuição dos diâmetros numa faixa de Cerrado na fazenda Água Limpa (FAL) em Brasília - DF. *Acta Bot Bras.* 2: 85-104.

Ferreira MJ, Gonçalves JFC, Ferraz JBS (2012) Crescimento e eficiência do uso da água de plantas jovens de castanheira-da-amazônia em área degradada e submetidas à adubação. *Cienc Florest.* 22: 393-401.

Freitas GA, Vaz-de-Melo A, Pereira MAB, Andrade CAO, Lucena GN, Silva RR (2012) Influência do sombreamento na qualidade de mudas de *Sclerolobium paniculatum* Vogel para recuperação de área degradada. Journal Biotec Biodivers. 3: 5-12.

Gazola RN, Buzetti S, Teixeira Filho MCM, Gazola RPD, Celestrino TS, Silva AC, Silva PHM (2019) Potassium Fertilization of *Eucalyptus* in an Entisol in Low-Elevation Cerrado. Rev Bras Cienc Solo. 43: 1-17.

Gonçalves JFC, Santos Júnior, UM, Araújo VBF, Bastos RP (2012) Ecofisiologia de árvores da Amazônia. Cienc Amb. 44: 100-120.

Hohnwald H, Kato OR, Walentowski H (2009) Accelerating capoeira regeneration on degraded pastures in the northeastern amazon by the use of pigs or cattle. Sustainability. 11: 1-16.

Hubbard RM, Ryan MG, Giardina CP, Barnard H (2004) The effect of fertilization on sap flux and canopy conductance in a *Eucalyptus saligna* experimental forest. Glob Chang Biol. 10: 427-436.

Inocencio MF, Carvalho JG, Furtini Neto AE (2014) Potássio, sódio e crescimento inicial de espécies florestais sob substituição de potássio por sódio. Rev Arvore. 38: 113-123.

Jaimez RE, Rada F, García-Núñez C, Azócar A (2005) Seasonal variations in leaf gas exchange of plantain cv. Hartón (*Musa AAB*) under different soil water conditions in a humid tropical region. Sci Hortic. 104: 79-89.

Jin SH, Huang JQ, Li, XQ, Zheng BS, Wu JS, Wang ZJ, Liu GH, Chen M (2011) Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in *Carya cathayensis*. Tree Physiol. 31: 1142-1151.

Laclau J-P, Almeida JCR, Gonçalves JLM, Saint-André L, Ventura M, Ranger J, Moreira RM, Nouvellon Y (2009) Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf

lifespan and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. *Tree Physiol.* 29: 111-124.

Lebaudy A, Vavasseur A, Hosy E, Dreyer I, Leonhardt N, Thibaud JB, Simonneau T, Sentenac H (2008) Plant adaptation to fluctuating environment and biomass production are strongly dependent on guard cell potassium channels. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 105: 271–276.

Liberato MAR, Gonçalves JFC, Chevreuril LR, Nina Junior AR, Fernandes AV, Santos Junior UM (2006) Leaf water potential, gas Exchange and chlorophyll a fluorescence in acariquara seedlings (*Miquartia guianensis* Aubl.) under swater stress and recovery. *Braz J Plant Physiol.* 18: 315-323.

Longstreth DJ and Nobel PS (1980) Nutrient influences on leaf photosynthesis. Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium for *Gossypium hirsutum* L. *Plant Physiol.* 65: 541–543.

Maathuis FJ (2009) Physiological functions of mineral macronutrients. *Curr Opin Plant Biol.* 12: 250-258.

Machado AS, Aurelio M, Silva LCR, Nascimento RGM, Quirino SMS, Téo SJ (2010) Dinâmica de crescimento de plantios jovens de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda*. *Pesq Florest Bras.* 30: 165-170.

Marschner P (2012) Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd. ed. London: Academic Press.

Melo AS, Silva Júnior CD, Fernandes PD, Sobral LF, Brito MEB, Dantas JDM (2009) Alterações das características fisiológicas da bananeira sob condições de fertirrigação. *Cienc Rural.* 39: 733-741.

Mori T, Ishizuka S, Konda R, Genroku T, Nakamura R, Kajino H, Wicaksono A, Heriyanto J, Hardjono A, Ohta S (2018) Potassium and magnesium in leaf and top soil

affected by triple superphosphate fertilisation in an *Acacia mangium* plantation. *J Trop For Sci.* 30: 1-8.

Munger GT, Will RE, Borders BE (2003) Effects of competition control and annual nitrogen fertilization on gas exchange of different-aged *Pinus taeda*. *Can J Forest Res.* 33: 1076–1083.

Nascimento HHC, Pacheco CM, Lima DRM, Silva EC, Nogueira RJMC (2014) Aspectos ecofisiológicos de mudas de *Hymenaea courbaril* L. em resposta a supressão de N, P e K. *Sci For.* 42: 315-328.

Onanuga AO, Jiang P, Adl SM (2012) Phosphorus, potassium and phytohormones promote chlorophyll production differently in two cotton (*Gossypium hirsutum*) varieties grown in hydroponic nutrient solution. *J Agric Sci.* 4: 157-167.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2000) Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais, 1st edn. Instituto Agronômico, Campinas.

Raij BV (1991) Fertilidade do solo e adubação, 1nd edn. Ceres, São Paulo

Ramos AM, Santos LAR, Fortes LTG (2009) Normais climatológicas do Brasil 1961-1990, 1nd edn. INMET, Brasília.

R Core Team (2015) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>

Saporetto Junior AW, Meira Neto JAA, Almado RP (2003) Fitossociologia de cerrado *sensu stricto* no município de Abaeté-MG. *Rev Arvore.* 27: 413-419.

Shahabifar J, Panahpour E, Moshiri F, Gholami A, Mostashari M (2019) The quantity/intensity relation is affected by chemical and organic P fertilization in calcareous soils. *Ecotox Environ Safe.* 172: 144-151.

Shimazaki KI, Doi M, Assmann SM, Kinoshita T (2007) Light regulation of stomatal movement. *Annu Rev Plant Biol.* 58: 219-247.

Siddiqui MY, Shah AH, Tariq MA (2008) Effects of fertilization and water stress on *Eucalyptus camaldulenses* seedlings. *J Trop For Sci.* 20: 205-210.

Silva PHM, Poggiani F, Libardi PL, Gonçalves NA (2012) Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. *Forest Ecol Manag* 301: 67–78.

Silva SR, Barros NF, Novais RF, Pereira PRG (2002) Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. *Rev Bras Cienc Solo.* 26: 1001-1010.

Silveira RLVA, Higashi EM, Sgarbi F, Muniz MRA (2001) *Seja doutor do seu eucalipto*, 1st edn. Informações Agronômicas, Piracicaba.

Silvestre WVD, Silva PA, Palheta LF, Oliveira Neto CF, Souza R, Festucci-Buselli RA, Pinheiro HA (2017) Differential tolerance to water deficit in two açai (*Euterpe oleracea* Mart.) plant materials. *Acta Physiol Plant.* 39: 1–10.

Simões PHO, Palheta, LF, Costa, TC, Nogueira GAS, Nascimento VR, Souza AIAF, Araújo, DG, De Paula MT, Rodrigues MR, Oliveira Neto CF, Brito AEA, Okumura RS (2018) Ecophysiological aspects of *Tachigali vulgaris* seedlings using different sources and doses of nitrogen. *Aust J Crop Sci.* 12: 1512-1518.

Stape JL, Binkley D, Ryan MG (2004) Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *Forest Ecol Manag.* 193: 17-31.

Statistical Analysis System Institute – SAS (2007) SAS® 9.1.3 (TS1M3) for Windows Microsoft. Cary, NC: SAS Institute.

Taiz L and Zeiger E (2013) *Fisiologia Vegetal*. 1st edn. Artmed, Porto Alegre.

Teixeira PC, Gonçalves JLM, Arthur Júnior JC, Dezordi C (2008) *Eucalyptus* sp seedling response to potassium fertilization and soil water. *Cienc Florest*. 18: 47-63.

Turnbull TL, Warren CR, Adams MA (2007) Novel mannose sequestration technique reveals variation in subcellular orthophosphate pools do not explain the effects of phosphorus nutrition on photosynthesis in *Eucalyptus globulus* seedlings. *New Phytol*. 176: 849–861.

Walker DA and Robinson SP (1978) Chloroplast and cell. A contemporary view of photosynthetic carbon assimilation. *Ber Deutsch Bot Ges*. 91: 513-526.

Wu X, Wang D, Riaz M, Zhang L, Jiang C (2019) Investigating the effect of biochar on the potential of increasing cotton yield, potassium efficiency and soil environment. *Ecotox Environ Safe*. 182: 109451.

Yin GC, Zhou GY, Morris J, Huang ZH, Chu GW, Zhou GY (2004) Sap flow response of eucalyptus (*Eucalyptus urophylla*) to environmental stress in south China. *J Zhejiang Univ Sci*. 5: 1218-1225.

Zamani S, Naderi MR, Soleymani A, Nasiri BM, Miransari M (2020) Sunflower (*Helianthus annuus* L.) biochemical properties and seed components affected by potassium fertilization under drought conditions. *Ecotox Environ Safe*. 190: 110017.

Zhang S, Li Q, Ma K, Chen L (2001) Temperature dependent gas exchange and stomatal/non-stomatal limitation to CO<sub>2</sub> assimilation of *Quercus liaotungensis* under midday higher irradiance. *Photosynthetica*. 39: 383-388.

Zhao DL, Oosterhuis DM, Bednarcz CW (2001) Influence of potassium on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. *Photosynthetica*. 39: 103–109.

Zucareli C, Ramos Junior EU, Barreiro AA, Nakagawa J, Cavariani C (2006) Adubação fosfatada, componentes de produção, produtividade e qualidade fisiológica em sementes de feijão. J Seed Sci. 28: 09-15.

## 5. ECOFISIOLOGIA DE *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima EM FUNÇÃO DA SAZONALIDADE PLUVIOMÉTRICA: UMA ABORDAGEM MULTIVARIADA

### RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o crescimento e trocas gasosas em plantio de *Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima fertilizado com fósforo e potássio em função da sazonalidade pluviométrica, por meio da estatística multivariada. O experimento foi instalado em março de 2016 na estação experimental da Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Igarapé-Açu/PA. Foram aplicadas três doses de P (0, 65,22; e 130,4 kg ha<sup>-1</sup>) e três doses de K (0, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>), em esquema fatorial 3 x 3 e delineamento em blocos casualizados. Medições pontuais de trocas gasosas foram realizadas em abril e novembro de 2018, com um analisador de gás a infravermelho. No período de baixa pluviosidade e alta irradiância, as taxas fotossintéticas foram até 4 vezes superiores do que no período de alta pluviosidade, alcançando 20,35  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  no tratamento P130,43K100. Durante o segundo ano de cultivo, considerando duas estações de crescimento, mesmo aumentando a competição por luz, água e nutrientes após o fechamento do dossel, o incremento em altura e diâmetro das árvores de *T. vulgaris* fertilizadas com o tratamento P130,43K200 foi cerca de 10,6% maior que o controle, além do diâmetro até 57,5% maior (P65,22K100). A fertilização isolada com P ou K não se mostrou vantajosa, apresentando crescimento em altura inferior quando comparada ao tratamento sem fertilização. A análise fatorial e análise de componentes principais são ferramentas que possibilitam a redução inicial de 8 variáveis de trocas gasosas para 2 e 3 componentes principais, nos períodos de alta e baixa pluviosidade, respectivamente. A sazonalidade influenciou no comportamento das variáveis fisiológicas e consequentemente no seu agrupamento dentro de cada componente principal.

**Palavras-chave:** Taxa de fotossíntese; Análise de componentes principais; Análise fatorial; Tachi-Branco.

## ABSTRACT

In the present study we evaluated the growth and gas exchange in plantation of *Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima fertilized with phosphorus and potassium as a function of rainfall seasonality, applying multivariate statistics. The experiment was installed in March 2016 at the experimental station of the Federal Rural University of the Amazon, in the municipality of Igarapé-Açu, Pará state, Brazilian Amazon. Three doses of P (0.0, 65.22 and 130.44 kg ha<sup>-1</sup>) and three doses of K (0, 100 and 200 kg ha<sup>-1</sup>) were applied in a 3x3 factorial scheme and randomized block design. Spot measurements of gas exchange were performed in April and November 2018 with an infrared gas analyzer. In the low rainfall and high irradiance period, photosynthetic rates were up to 4 times higher than in the high rainfall period, reaching 20.35  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  in the P130.43K100 treatment. During the second year after planting, considering two growing seasons, even increasing competition for light, water, and nutrients after canopy closure, the increment in height and diameter of *T. vulgaris* trees fertilized with the P130,43K200 treatment was about 10.6% higher than the control, in addition to the diameter up to 57.5% higher (P65,22K100). Isolated fertilization with P or K did not prove to be advantageous, showing lower height growth when compared to the treatment without fertilization. Factor Analysis and Principal Component Analysis are tools that allow the initial reduction of 8 variables of gas exchange to 2 and 3 principal components, in periods of high and low rainfall, respectively. Seasonality influenced the behavior of physiological variables and consequently their grouping within each principal component.

**Keywords:** Photosynthesis rate; Principal Component Analysis; Factor Analysis; Tachi-Branco.

## 5.1 Introdução

Cenários de emissões sugerem concentrações de monóxido de carbono variando entre 550 e 900  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ Mol}^{-1}$  até o final deste século (IPCC, 2014), o que influenciará consideravelmente a fisiologia e o crescimento de ecossistemas florestais (OFORI-AMANFO et al., 2021) naturais e artificiais. Embora os efeitos do aumento da concentração de carbono sobre as árvores tenham recebido grande atenção (KÖRNER et al., 2005; LEUZINGER et al., 2007; URBAN et al., 2014), investigações dos efeitos de outros fatores, como déficit hídrico, má distribuição de chuvas, solos rasos e de baixa retenção de água, baixos teores de nutrientes e de matéria orgânica, ainda são insuficientes para prever a sustentabilidade desses ecossistemas em longo prazo (GONÇALVES et al., 2012; CAMPELO et al., 2015), uma vez que vários outros fatores provavelmente covariam com o aumento da concentração de  $\text{CO}_2$ .

O suprimento inadequado de um elemento essencial resulta em distúrbios nutricionais (TAIZ; ZEIGER, 2016), de modo que a complementação nutricional é um dos fatores determinantes para o sucesso em projetos de reflorestamento. Além da taxa fotossintética, entender como ocorrem as influências do ambiente sobre o controle estomático tem sido foco central de estudos com fisiologia vegetal (WARREN et al., 2011; OTTO et al., 2013; MOSTAGHIMI et al., 2021). Modelos climáticos globais sugerem uma probabilidade crescente de mudanças no padrão sazonal de pluviosidade e períodos de seca severa nas próximas décadas (CIAIS et al., 2014; IPCC, 2014), tornando, dessa forma, a atuação dos nutrientes essenciais determinante na manutenção do crescimento dos plantios florestais.

Para compreender os fatores que controlam o crescimento das florestas e o uso dos recursos naturais, diversos estudos já foram realizados (HUBBARD et al. 2004; YIN et al. 2004; TEIXEIRA et al. 2008; MACHADO et al. 2010; FERREIRA et al. 2012). Todavia, são raros os trabalhos que investigam especificamente o manejo da fertilização com espécies nativas da Amazônia.

A espécie *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima - Fabaceae ocorre na região amazônica e nos estados da Bahia, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso, em cerrados, e possui importância econômica e ambiental (SILVA et al. 2002; SAPORETTI JUNIOR et

al. 2003). É uma espécie pioneira que frequentemente inicia a sucessão secundária em áreas abertas, sendo considerada ideal para o reflorestamento devido à sua alta capacidade de produção de biomassa (FELFILI et al., 1999; FARIAS et al., 2016). De acordo com Freitas et al. (2012), as plantas de *T. vulgaris* podem ser indicadas para o uso em projetos que visam a recuperação de áreas degradadas, tanto para as condições de pleno sol, quanto para 50% de sombreamento das mudas.

O fósforo (P) é um dos elementos mais importantes envolvidos na fotossíntese e no crescimento das plantas (POUR et al., 2021), sendo as culturas leguminosas altamente responsivas à adubação fosfatada (CHAUDHARY et al., 2008). Estudos têm relatado que a fertilização fosfatada melhora as taxas fotossintéticas e produção de biomassa de plantas, principalmente no estágio inicial de crescimento (FERNANDEZ et al., 2000; MELO et al., 2016; POUR et al., 2021). O potássio (K) atua no metabolismo das plantas promovendo a síntese de lípidos, hidratos de carbono e proteínas (HABERMAN et al., 2019; LIU et al., 2019; MELO et al., 2021), além de regular o movimento estomático (ZORB et al., 2014; RAGEL et al., 2019). Estudos sugerem que as capacidades fotossintéticas das plantas superiores mudam drasticamente em resposta a diferentes fornecimentos de K (WENG et al., 2007; GERARDEAUX et al., 2009).

Métodos estatísticos multivariados são ferramentas extremamente úteis em experimentos com grande número de variáveis (ANDRADE et al., 2017), como é o caso do estudo ecofisiológico de plantios florestais. A decisão sobre quais variáveis são importantes para explicar o efeito dos fatores pode ser tomada com base em resultados da análise fatorial (AF) e da análise de componentes principais (ACP). A AF propõe resumir a estrutura de inter-relações de um grande número de variáveis, por meio de novas variáveis conhecidas como fatores (ANDRADE et al., 2017). A ACP é utilizada para explicar a variância de um grande conjunto de dados de variáveis interligadas com um pequeno conjunto de variáveis independentes (MANLY, 2008; BUENO et al., 2010), reduzindo a representação dimensional dos dados (HAIR et al., 2009). Diversos estudos comprovam a eficiência da aplicação de métodos de análise multivariados na área florestal (LEITE et al., 2010; UZUN et al., 2017; RICKEN et al., 2018; TAVARES et al., 2019). Entretanto, investigações com métodos multivariados para espécies amazônicas pouco exploradas são raras.

Considerando o papel determinante das trocas gasosas para o entendimento da dinâmica de carbono no ecossistema florestal, o presente trabalho teve como objetivo

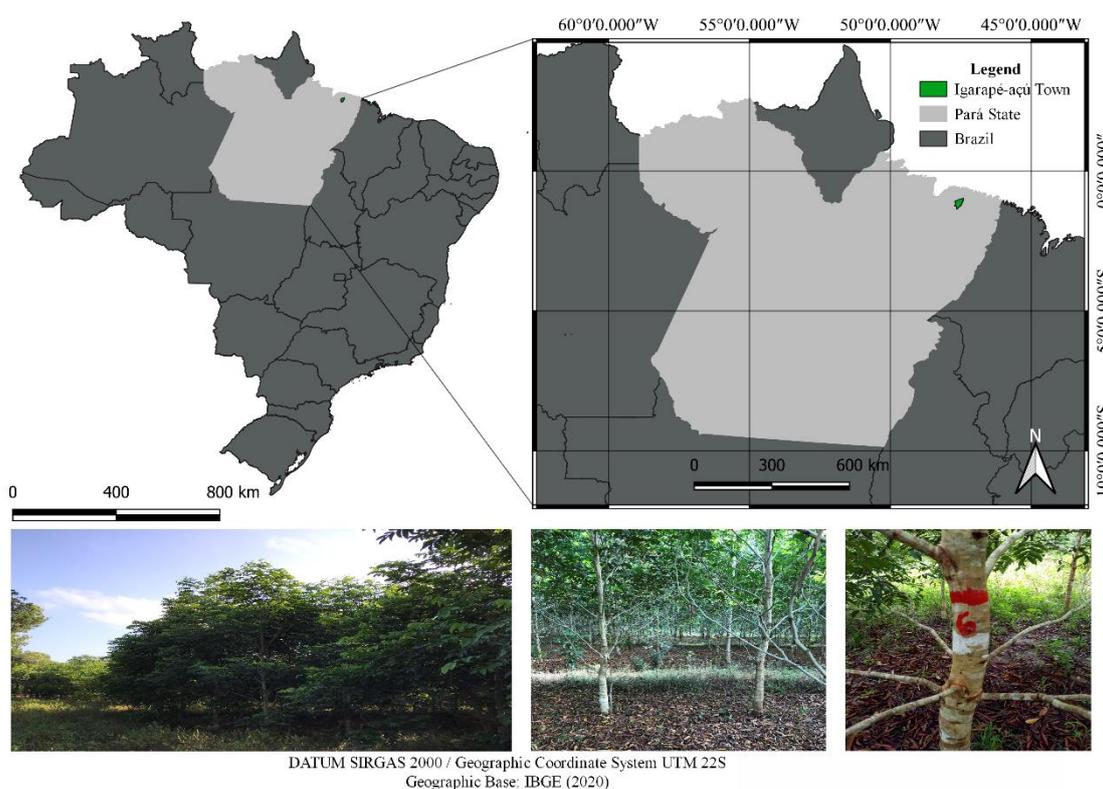
investigar o efeito da sazonalidade da precipitação no crescimento e trocas gasosas do *T. vulgaris* fertilizado com fósforo e potássio, por meio da estatística multivariada.

## 5.2 Material e métodos

### 5.2.1 Área de estudo

O experimento foi instalado no ano de 2016 na estação experimental da Universidade Federal Rural da Amazônia, localizada no município de Igarapé-Açu (coordenadas geográficas: 01° 07' 33" de latitude sul e 47° 37' 27" de longitude a oeste de Greenwich), Estado do Pará, Brasil (Figura 4).

**Figura 4** - Localização do município de Igarapé-Açu e fotos do experimento com *T. vulgaris*, Pará, Brasil.

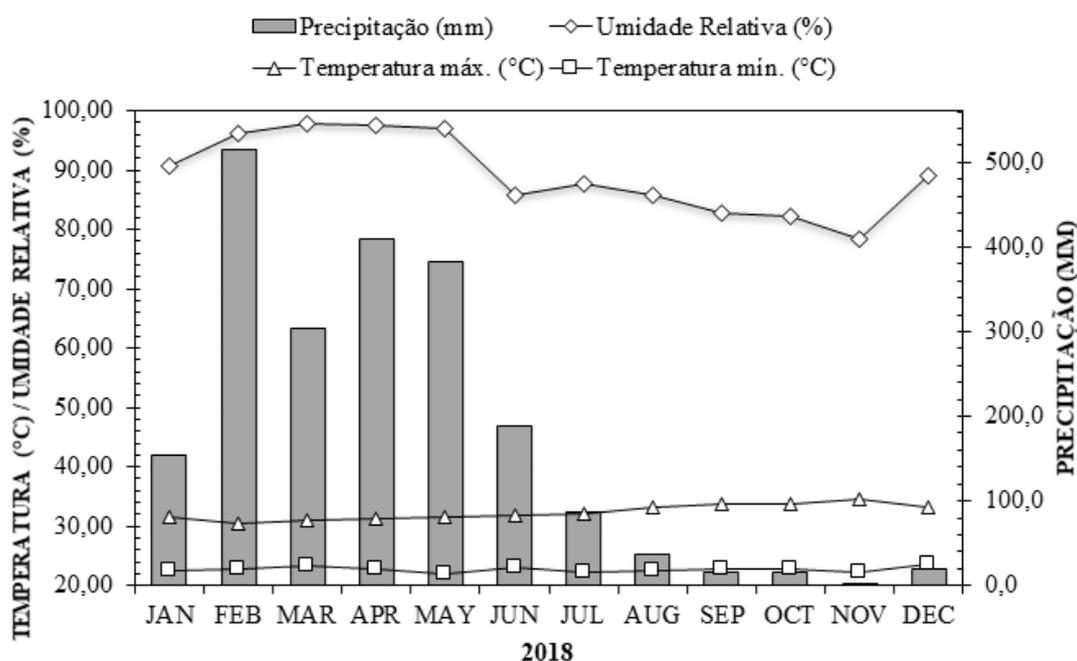


**Fonte:** Autor (2021).

O clima da região insere-se na categoria de megatérmico úmido, do tipo Am e subtipo Am2 da classificação de Köppen, com temperatura média anual de 26,5°C, umidade relativa média do ar de 85% e pluviosidade média de 2.350 mm, com forte concentração nos meses de janeiro a junho e mais fraca de julho a dezembro (COSTA et al. 2013; HOHNWALD et al. 2019). No local do experimento, foi instalada uma estação meteorológica, onde foram coletados dados climáticos no período de avaliação do plantio (Figura 5), os quais evidenciaram as estações de alta e baixa pluviosidade, características

do clima equatorial amazônico. Foram observadas temperaturas elevadas o ano todo, com oscilações entre o mês mais quente e o mês mais frio de 25,3°C à 27,6°C, portanto, com baixa amplitude térmica. A pluviosidade acumulada de fevereiro a maio (alta pluviosidade) oscilou entre 303,4 e 514,4 mm, a umidade relativa entre 96,3 e 97,8% e a temperatura média de 25,3 a 27,1°C; de agosto a dezembro (baixa pluviosidade) as precipitações se mantiveram entre 0,8 e 15 mm, 78,3 e 89% de umidade relativa e 26,7 a 27,6°C de temperatura média. Apesar da baixa amplitude térmica ao longo do ano, fica evidente a sazonalidade da pluviosidade e umidade relativa. A divisão dos meses definidos como períodos de alta e baixa pluviosidade foi feita com base nos dados do presente estudo e seguem o padrão climático da região (PARRY et al., 2008; COSTA et al., 2013; INMET, 2019).

**Figura 5** - Pluviosidade mensal (mm), umidade relativa do ar (%) e temperaturas do ar (°C) máximas e mínimas mensais, no local do experimento, durante os 12 meses de avaliação, na estação experimental da Universidade Federal Rural da Amazônia, Igarapé-Açu, PA, Brasil.



**Fonte:** Autor (2021).

A área experimental possui relevo plano e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de textura média (266 g kg<sup>-1</sup> de argila) (BASTOS; PACHECO, 1999). Foi realizada a caracterização dos atributos químicos e físicos do solo

até 1,2 metros de profundidade (Tabela 5) no laboratório de análises de solos da Embrapa Amazônia Oriental, em Belém-PA.

**Tabela 5** - Atributos químicos e físicos do solo da área experimental, na estação da Universidade Federal Rural da Amazônia, Igarapé-Açu, PA (valores médios de cinco locais de coleta).

Profundidade	pH	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup>	H <sup>+</sup> Al <sup>+3</sup>	SB	CTC	P	V	M.O.	Granulometria		
												Areia	Silte	Argila
(cm)	(CaCl <sub>2</sub> )				(cmolc/dm <sup>3</sup> )				(mg/dm <sup>3</sup> )	%	%	(g/kg)		
0-20	4,1	0,041	0,2	0,1	0,4	2	5,9	2,34	3	15	1,2	170	140	690
20-40	4	0,021	0,2	0,1	0,6	2,2	4,2	2,52	2	13	0,5	230	80	690
40-60	4	0,01	0,2	0,1	0,6	2,2	4,2	2,51	2	12	0,5	270	130	600
60-80	4,1	0,01	0,2	0,1	0,5	2	4,6	2,31	1	13	0,5	270	150	580
80-100	4,1	0,01	0,2	0,1	0,4	2	5,8	2,31	4	13	0,5	290	150	560
100-120	4,1	0,031	0,2	0,1	0,4	1,8	5,3	2,13	1	16	0,5	370	120	510

*pH* = potencial hidrogeniônico; *K*<sup>+</sup> = potássio; *Ca*<sup>+2</sup> = cálcio; *Mg*<sup>+</sup> = magnésio; *Al*<sup>+3</sup> = alumínio; *H*<sup>+</sup>*Al*<sup>+3</sup> = hidrogênio e alumínio; *SB* = soma de bases de porcentagem de saturação por bases; *CTC* = capacidade de troca de cátions; *P* = fósforo; *V* = saturação por bases; *M.O.* = matéria orgânica. Os teores de *K*, *Na*, *Ca* e *Mg*, trocáveis no solo foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e espectrofotometria de chama (Raij et al., 2000).

**Fonte:** Autor (2021).

### 5.2.2 Instalação do experimento e delineamento experimental

As sementes de *T. vulgaris* utilizadas para produção das mudas foram obtidas de produtor certificado, colhidas de matrizes localizadas no município de Santarém-PA (2° 26' 22"S; 54° 11' 55"W) e colocadas para germinar em sementeiras, com areia lavada como substrato.

A espécie apresenta dormência tegumentar, dessa forma, realizou-se a aplicação de tratamento pré-germinativo para promover e uniformizar a germinação das sementes. Para superar a dormência, foi realizada a remoção de uma pequena porção do tegumento na extremidade oposta ao eixo embrionário (desponte), para facilitar o processo de embebição da semente e assim dar início à germinação.

Após 30 dias do início da germinação, as plântulas foram transplantadas para sacos de mudas de tamanho 15x25cm, com volume de 1,9 dm<sup>3</sup> de solo. Decorridos oito meses, as mudas atingiram 40 cm de altura, estando aptas ao plantio na área experimental.

Foram aplicadas três doses de P (0, 65,22 e 130,44 kg ha<sup>-1</sup>, com superfosfato triplo) e três doses de K (0, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>, com cloreto de potássio), bem como suas

combinações, em esquema fatorial 3x3 (Tabela 6). As doses dos fertilizantes foram definidas, previamente, de acordo com recomendações para espécies florestais de rápido crescimento em solos argilosos de textura média (SILVEIRA et al., 2001; ANDRADE, 2004; ARCO-VERDE et al., 2005), sendo realizadas em duas aplicações no decorrer do primeiro ano de cultivo, aos 60 dias e aos 12 meses pós-plantio. As adubações ocorreram nos meses de abril e fevereiro do ano subsequente, períodos favorecidos pelo conteúdo de água no solo em função das chuvas.

A área do plantio foi dividida em 4 blocos, distanciados 5 m entre si, com objetivo de potencializar o efeito dos tratamentos em cada parcela. Cada bloco foi dividido em 9 parcelas (tratamentos) de 10 m de largura por 8 m de comprimento, contendo 16 plantas no espaçamento de 2 m entre plantas e 3 m entre faixas, totalizando 36 parcelas (Figura 6). A linha externa de cada parcela serviu como bordadura, sendo assim, cada unidade experimental foi formada pelas 4 árvores centrais de cada parcela.

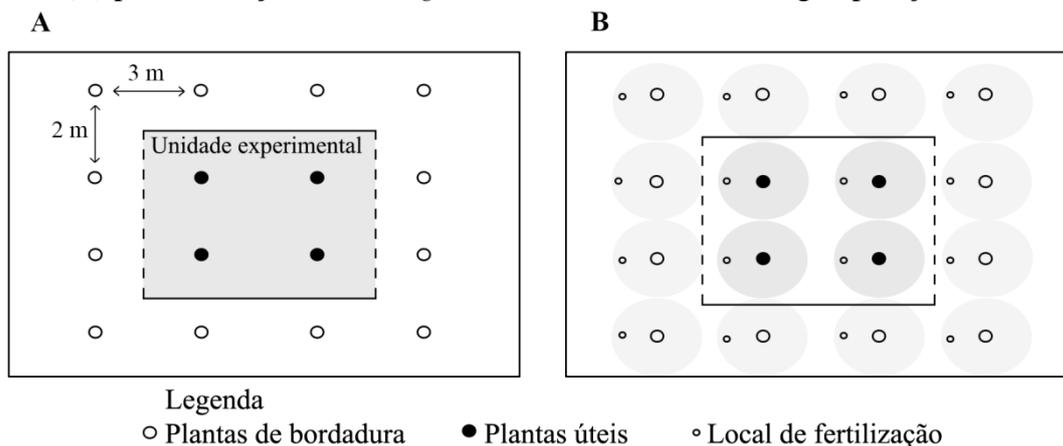
**Tabela 6** - Quantidades de nutrientes (entre parêntesis) e fertilizantes por tratamento, aplicados ao plantio de *T. vulgaris*, município de Igarapé-açu, Pará, Brasil.

Tratamentos	Nutrientes				Fertilizante	
	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Ca	K (K <sub>2</sub> O)	Cl	SFT	KCl
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----				----- kg ha <sup>-1</sup> -----	
Controle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K100	0,0	0,0	(39,1) 50,0	39,0	0,0	100,0
K200	0,0	0,0	(78,2) 100,0	78,0	0,0	200,0
P65,22	(16,6) 26,7	6,5	0,0	0,0	65,2	0,0
P65,22K100	(16,6) 26,7	6,5	(39,1) 50,0	39,0	65,2	100,0
P65,22K200	(16,6) 26,7	6,5	(78,2) 100,0	78,0	65,2	200,0
P130,44	(33,1) 53,5	13,0	0,0	0,0	130,4	0,0
P130,44K100	(33,1) 53,5	13,0	(39,1) 50,0	39,0	130,4	100,0
P130,44K200	(33,1) 53,5	13,0	(78,2) 100,0	78,0	130,4	200,0

SFT: Superfosfato triplo; KCl: Cloreto de potássio

Fonte: Autor (2021).

**Figura 6** - Representação esquemática das parcelas (A) e locais de adubação em coveta lateral (B) para avaliação do *T. vulgaris* fertilizado com P e K, Igarapé-açu, Pará, Brasil.



**Fonte:** Autor (2021).

### 5.2.3 Avaliação do estado nutricional

Foi realizada a diagnose nutricional para monitorar o estado nutricional da floresta e para correção de possíveis deficiências no experimento, combinada com a análise de solo. As coletas de folhas para a avaliação foram realizadas aos 12 meses pós-plantio. De cada uma das 4 árvores presentes nas unidades experimentais foram colhidas 16 folhas, sendo 4 folhas por quadrante (N, S, L e O), a partir da ponta dos ramos do terço superior da copa das árvores. Nesse material foram analisados teores de nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio, magnésio, cobre, manganês, zinco e ferro, segundo metodologias da Embrapa (2009).

### 5.2.4 Análise das trocas gasosas

Medições pontuais de trocas gasosas foram realizadas em abril e novembro de 2018, compreendendo os períodos de alta e baixa pluviosidade, entre 9:00 e 11:00 horas, em folhas totalmente expandidas e completamente maduras, no terço médio da copa das árvores, com um analisador de gás a infravermelho (*Infrared gas analyzer - IRGA*), modelo Li-6400 (Li-Cor, Biosciences Inc., Nebraska, EUA). A radiação fotossinteticamente ativa, o CO<sub>2</sub> atmosférico no interior da câmara foliar e a temperatura do bloco da câmara foram mantidos constantes durante as medições, com valores de 1000  $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 380 a 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e 26 a 27°C, respectivamente. Foi utilizada acoplada ao IRGA, uma fonte de radiação artificial (ADC BioScientific Ltd., Hoddesdon, UK), para manutenção constante da quantidade de f\u00f3tons.

A taxa fotossintética líquida por unidade de área foliar ( $A$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), a condutância estomática ao vapor d'água ( $g_s$ ,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), a taxa transpiratória ( $E$ ,  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e a concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), foram calculadas usando os valores das variações das concentrações de  $\text{CO}_2$  e de vapor de  $\text{H}_2\text{O}$  no interior da câmara, medidos pelo IRGA. Por meio dos valores de  $A$ ,  $E$ ,  $g_s$  e  $C_i$  foram calculadas as relações:  $EUA = A/E$ ,  $EiUA = A/g_s$  e  $\Phi_c = A/C_i$  (ZHANG et al., 2001), em que  $EUA$  significa eficiência do uso de água,  $EiUA$  significa eficiência intrínseca do uso da água e  $\Phi_c$  corresponde a eficiência instantânea de carboxilação. Após o período de dois minutos para aclimação da folha às condições microclimáticas existentes dentro da câmara, eram tomadas dez medidas com intervalo de 10 segundos entre cada medida. Antes de cada medição, considerou-se um período de dois minutos para aclimação da folha às condições microclimáticas dentro da câmara, baseado nas recomendações dispostas no manual do equipamento (ADC, 2006).

#### 5.2.5 Análises estatísticas

Os dados experimentais foram avaliados quanto à normalidade e homogeneidade de variâncias pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Posteriormente, para as variáveis paramétricas, as médias dos tratamentos foram submetidas à análise de variância e comparações de médias pelo teste de Tukey, utilizando o software estatístico SPSS versão 27.0 (IBM Corp., 2020). Todas as análises foram avaliadas ao nível de 1% de significância.

Utilizou-se a estatística multivariada por meio da análise fatorial (AF) e a análise de componentes principais (ACP), que foi realizada sobre a matriz de dados composta por 144 valores, correspondentes as 8 variáveis de trocas gasosas de indivíduos de *T. vulgaris* dos 9 tratamentos, referentes a combinações de três doses de adubação com fósforo e potássio, obtidas no ensaio experimental, para duas condições ambientais. O conjunto de dados foi normalizado para eliminar possíveis problemas devido à existência de medidas em diferentes escalas e unidades. Antes de realizar AF, elaboraram-se as análises do teste Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e teste de esfericidade de Bartlett para verificar se as características dos dados são adequadas para proceder a AF e a ACP, ou seja, para quantificar o grau de intercorrelações entre as variáveis (HAIR et al., 2009).

Foram utilizados dois critérios para a definição do número de fatores ou componentes principais: critério de Kaiser; e critério da porcentagem da variância

explicada. Esses critérios podem ser utilizados como pontos de partida para a obtenção de uma solução final na AF e ACP (MINGOTTI, 2007; CORRAR et al., 2009). Pelo critério de Kaiser, a seleção do número de fatores foi extraída a partir da matriz de correlações mantidas no sistema e apenas as componentes relacionadas aos autovalores ( $\lambda_i$ ) maiores e iguais a 1,00 foram consideradas adequadas para extração de fatores. Já no critério da percentagem da variância explicativa, determina-se o número de fatores que explique uma percentagem pré-definida da variabilidade global. É comum adotar um valor de explicação de 70% como mínimo, que pode variar de acordo com a área de estudo (BARROSO; ARTES, 2003). No caso da correlação dos fatores com as variáveis de trocas gasosas, consideraram-se as variáveis mais significativas, aquelas com os valores dos coeficientes de correlações superiores a 0,7 (HAIR et al., 2009).

### 5.3 Resultados

A fertilização com fósforo e potássio, bem como as suas respectivas interações, não afetaram significativamente ( $p > 0,05$ ) a maioria das concentrações de N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu e Mn foliares na diagnose nutricional, realizada aos 12 meses (Tabela 7), com exceção de K ( $p < 0,001$ ) e Mg ( $p < 0,01$ ), que foram afetados significativamente pelas doses de K.

**Tabela 7** - Análise de variância dos nutrientes (valores F e  $p$ ) da diagnose nutricional de folhas de *T. vulgaris* sob fertilização com fósforo e potássio, na área experimental da Universidade Federal Rural da Amazônia, Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

Variáveis	Fator P		Fator K		Fator P x Fator K	
	teste F	$p$ valor	teste F	$p$ valor	teste F	$p$ valor
N	1.145	0.340	0.810	0.460	0.338	0.849
P	2.201	0.140	1.725	0.206	0.430	0.785
K	0.949	0.406	11.050	0.001***	0.705	0.599
Na	0.040*	0.906	0.105	0.901	0.415	0.796
Ca	0.733	0.494	2.442	0.115	0.105	0.979
Mg	0.280	0.759	6.304	0.008**	0.638	0.642
Fe	2.609	0.101	1.378	0.278	0.942	0.462
Zn	0.781	0.473	0.718	0.501	0.880	0.496
Cu	0.665	0.527	0.954	0.404	2.655	0.067
Mn	0.423	0.661	1.377	0.278	0.434	0.782

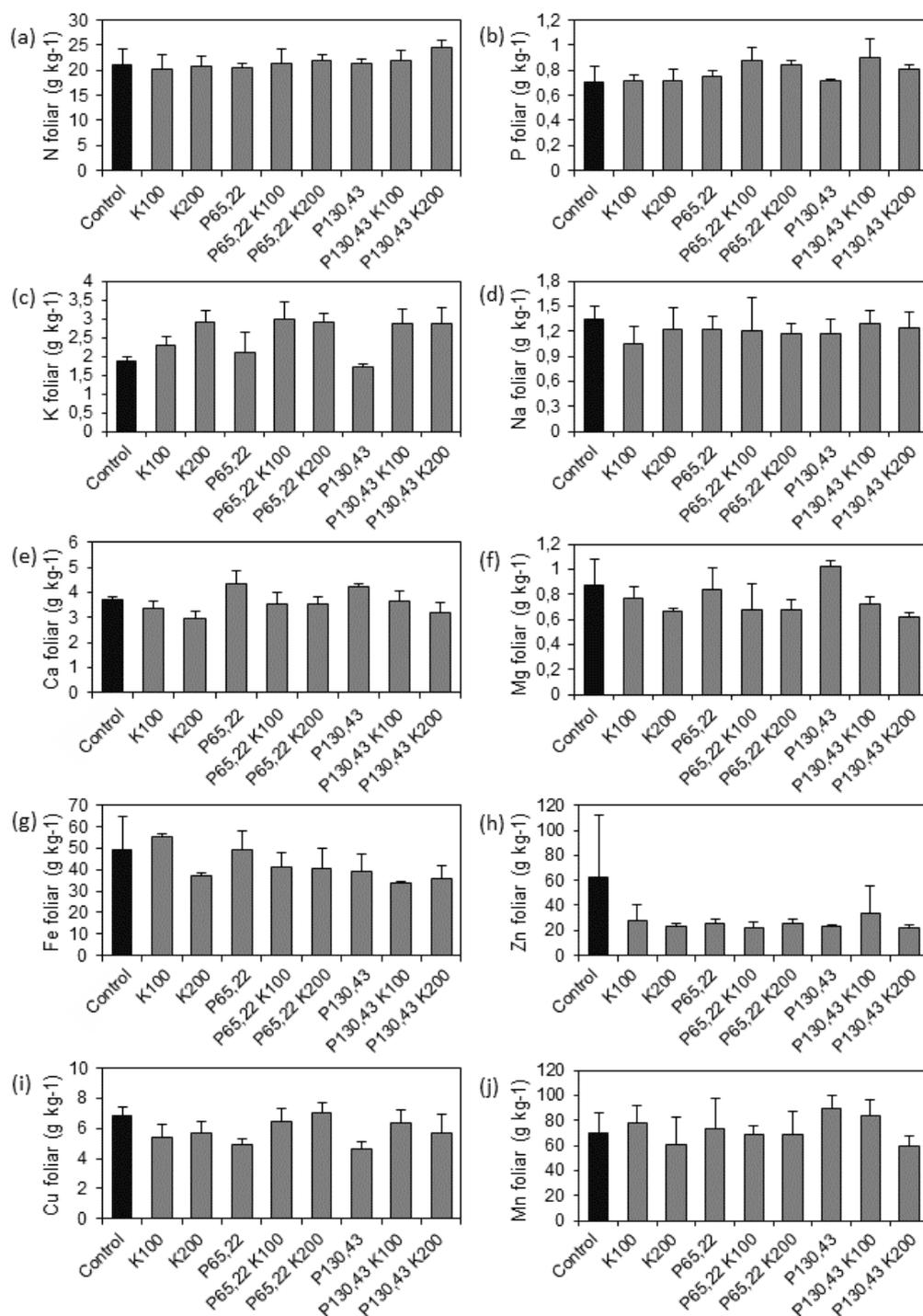
Nutrientes avaliados na diagnose nutricional: nitrogênio (N); fósforo (P); potássio (K); sódio (Na); cálcio (Ca); magnésio (Mg); ferro (Fe); zinco (Zn); cobre (Cu); e manganês (Mn). \*, \*\*, \*\*\* implicam em diferenças estatísticas com valores de  $p < .05$ ;  $p < .01$ ; e  $p < .001$ , respectivamente. Haviam 18 graus de liberdade residuais.

**Fonte:** Autor (2021).

Conforme apresentado na Figura 7a, a maior concentração de N foliar foi de 24,59 g kg<sup>-1</sup> no tratamento com as doses máximas de P e K. Em relação ao menor teor de N, a variação foi de aproximadamente 21%. A alta capacidade de fixação biológica do N atmosférico pelas espécies leguminosas resultou em valores elevados de N foliar.

As concentrações de P, nutriente de alta mobilidade na planta, apresentaram variação de 0,71 (controle) até 0,89 g kg<sup>-1</sup> (P130,43K100) como pode ser observado na Figura 7b. Outro tratamento com maiores doses de P (P130,43K200) resultou em concentração de 0,81 g kg<sup>-1</sup> de P.

**Figura 7** - Médias dos valores de diagnose nutricional para cada tratamento em plantio de *T. vulgaris* fertilizado com P e K. Os nutrientes analisados foram: N foliar (a); P foliar (b); K foliar (c); Na foliar (d); Ca foliar (e); Mg foliar (f); Fe foliar (g); Zn foliar (h); Cu foliar (i); e Mn foliar (j). Barras representam o desvio padrão em relação às médias dos tratamentos.



Fonte: Autor (2021).

As concentrações de K oscilaram entre os tratamentos, sendo observados indicativos de relação com as doses de fertilizantes aplicados. As maiores médias de K foliar foram de 2,99, 2,89 e 2,88 g kg<sup>-1</sup>, nos tratamentos P65,22K100, P65,22K200 e P130,43K200, respectivamente (Figura 7c). Em relação ao controle (1,87 g kg<sup>-1</sup>), houve um acréscimo de 59,9% referente à maior média. Altas concentrações externas de K tendem a promover o suprimento de contingência do nutriente, ocasionando amplas variações nas concentrações vacuolares, local onde é estocado.

As plantas de *T. vulgaris* fertilizadas com P e K foram afetadas significativamente nos parâmetros de trocas gasosas foliares ( $p < 0,05$ ) (Tabela 8), bem como apresentaram oscilação dessas variáveis em função das condições ambientais (Figura 8). No período de baixa pluviosidade, mais precisamente no mês de novembro de 2018, onde as chuvas acumuladas alcançaram somente 0,8 mm, os valores de *A*, *Ci*, *EUA*, *EiUA* e *TF* foram consideravelmente maiores que os valores obtidos no período de alta pluviosidade.

Com altos índices pluviométricos, observou-se uma grande redução da assimilação de CO<sub>2</sub> (*A*) e aumento da *gs*. Os maiores valores de *A* (20,35 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) foram observados nas plantas fertilizadas com o tratamento P130,43K100, no período de baixa pluviosidade, uma diferença de 20,34% em relação às plantas sem fertilização (Figura 6a). O mesmo padrão de *A* no período de baixa pluviosidade foi observado para *Ci*, *E* e *TF*, com as plantas fertilizadas exibindo valores de 0,56 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (K100), 5,54 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (P130,43) e 29,95°C (P130,43K200), respectivamente (Figuras 8b e 8c).

Embora o período de alta pluviosidade tenha causado aumento da *gs* para todos os tratamentos, não foi suficiente para estabelecer respostas fotossintéticas elevadas quando comparado com o período de baixa pluviosidade. A maior *gs* encontrada foi de 0,38 μmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> no tratamento P130,43K200, o que representa uma diferença de aproximadamente 137% em comparação à maior *gs* das plantas no período de baixa pluviosidade (0,16 μmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), observada no tratamento P130,43 (Figura 8b).

Os parâmetros  $\Phi_c$ , *EUA* e *EiUA* exibiram diferenças significativas em função dos tratamentos, nas duas condições climáticas ( $p < 0,01$ ) (Tabela 8; Figuras 8e, 8f e 8g). Observou-se que nas plantas fertilizadas, valores elevados de concentração interna de CO<sub>2</sub> estão associados ao aumento na *gs*. No período de alta pluviosidade, esse parâmetro foi superior no tratamento K200 (0,035 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>Pa<sup>-1</sup>) e no período de baixa pluviosidade, no tratamento K100 (0,56 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> Pa<sup>-1</sup>).

A *EUA* e *EiUA* no período de alta pluviosidade foram maiores no tratamento P65,22K200, atingindo os valores de 0,97  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$  e 15,2  $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ , respectivamente. Esses valores representam um acréscimo superior a 80% em comparação as plantas sem fertilização. Quando se considera a condição ambiental de alta pluviosidade, a fertilização não proporcionou plantas com maior eficiência no uso da água. As plantas-controle obtiveram os maiores valores de *EUA* (14,6  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ) e *EiUA* (479,9  $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ), não sendo possível estabelecer um padrão de resposta à fertilização para esses parâmetros (Figuras 8f e 8g). Fatores como a demanda evaporativa atmosférica, aumento do déficit de pressão de vapor d'água, da radiação solar, da temperatura e declínio na umidade relativa, em condições de baixa pluviosidade, tendem a contribuir no estresse sobre as plantas, ocasionando oscilações nos parâmetros supracitados.

**Tabela 8** - Análises de variância das trocas gasosas (valores *F* e *p*), obtidas nos períodos de alta e baixa pluviosidade de *T. vulgaris* sob fertilização com P e K, Igarapé-açu, Pará, Brasil.

Variáveis	Bloco		Fator P		Fator K		Fator P x Fator K	
	teste <i>F</i>	<i>p</i> valor	teste <i>F</i>	<i>p</i> valor	teste <i>F</i>	<i>p</i> valor	teste <i>F</i>	<i>p</i> valor
<b>Período de alta pluviosidade</b>								
A	0.085	0.771	19.11	<0.000***	790.24	<0.000***	98.96	<0.000***
Gs	3.22	0.075	13004.67	<0.000***	13114.15	<0.000***	674.07	<0.000***
CI	0.037	0.849	419.33	<0.000***	496.52	<0.000***	169.05	<0.000***
E	0.655	0.420	9455.05	<0.000***	6967.09	<0.000***	352.81	<0.000***
$\Phi_c$	0.018	0.894	29.50	<0.000***	890.26	<0.000***	95.37	<0.000***
EUA	0.096	0.758	181.06	<0.000***	454.79	<0.000***	106.36	<0.000***
EiUA	0.011	0.917	309.62	<0.000***	281.61	<0.000***	127.67	<0.000***
TF	80.81	<0.000***	123286.91	<0.000***	122087.95	<0.000***	34740.38	<0.000***
<b>Período de baixa pluviosidade</b>								
A	0.011	0.918	140.60	<0.000***	352.98	<0.000***	395.3	<0.000***
Gs	67.93	<0.000***	47243.18	<0.000***	1403.5	<0.000***	26015.59	<0.000***
CI	26.15	<0.000***	1.35	0.264	63.34	<0.000***	95.58	<0.000***
E	65.82	<0.000***	54513.41	<0.000***	1717.45	<0.000***	24511.88	<0.000***
$\Phi_c$	3.13	0.079	2.51	0.85	3.27	0.041*	2.84	0.027*
EUA	6.26	0.014*	326.37	<0.000***	270.42	<0.000***	234.76	<0.000***
EiUA	6.09	0.015*	313.06	<0.000***	264.10	<0.000***	238.75	<0.000***
TF	9.67	0.002*	276612.58	<0.000***	49602.70	<0.000***	5316.26	<0.000***

A = taxa fotossintética líquida por unidade de área foliar ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), *gs* = condutância estomática ao vapor d'água ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), *E* = taxa transpiratória ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), *Ci* = concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $\Phi_c$  = eficiência instantânea de carboxilação ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ), *EUA* = Eficiência do uso da água ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ), *EiUA* = Eficiência Intrínseca do uso da água ( $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ),

*TF* = Temperatura foliar (°C). \*, \*\*, \*\*\* implicam em diferenças estatísticas com valores de  $p < .05$ ;  $p < .01$ ; e  $p < .001$ , respectivamente. Haviam 134 graus de liberdade residuais.

**Fonte:** Autor (2021).

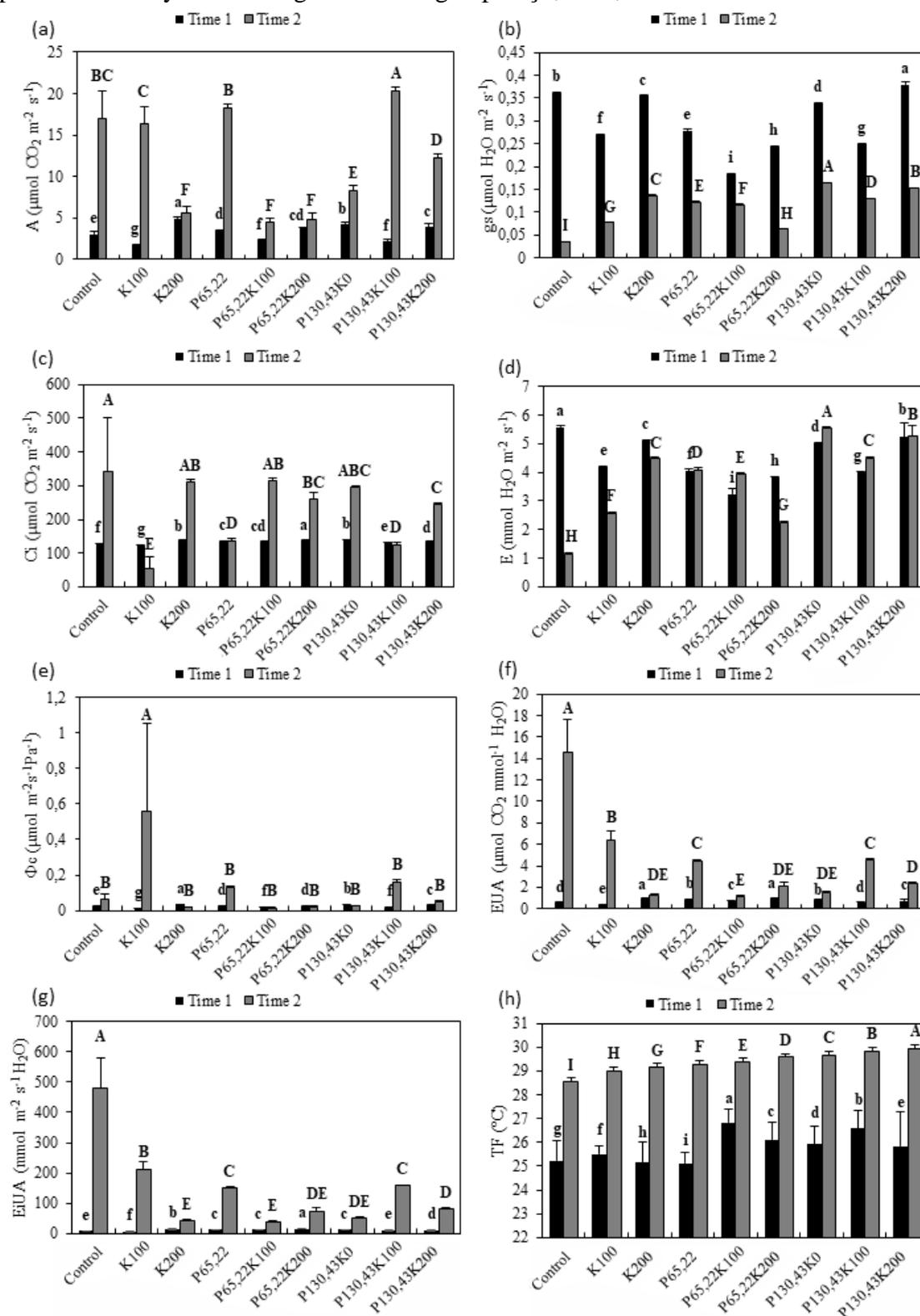
Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os componentes principais (CP) na AF por meio dos critérios de Kaiser (autovalores) e da variância total explicada (total variance explained) obtido pelo método da ACP, para as condições de alta e baixa pluviosidade, respectivamente. Foram selecionadas as CPs com autovalores superiores a 1 (Figuras 9a, c). Em ambas as condições ambientais, as CPs foram giradas por meio da rotação varimax, para facilitar a interpretação da contribuição das variáveis (pesos ou cargas fatoriais) em cada CP.

Na Tabela 9 são apresentados os pesos fatoriais das duas componentes principais (CP1 e CP2), dispostas em ordem de importância das variáveis originais na discriminação das trocas gasosas do plantio de *T. vulgaris* submetido à fertilização com P e K. Representam o comportamento fisiológico no período de inverno, com 408 mm de pluviosidade acumulada no mês de mensuração (outubro).

Verifica-se pela AF que os dois componentes extraídos (CP1 e CP2) explicaram, de forma cumulativa, 93,19% da variabilidade total do conjunto de dados. A CP1 explica 57,81% da variação total das oito variáveis analisadas de trocas gasosas de *T. vulgaris*, e está positiva e fortemente relacionada (altos coeficientes de correlação) com *A* (0,991), representando a mais importante variável na CP1. Não houve fatores correlacionados aos demais componentes (CP3 a CP8) já que os coeficientes determinados a essas componentes tiveram valores menores ( $\leq 0,50$ ) que os apresentados na CP1 e CP2. A comunalidade de *A* (0,992) foi próxima de um (1,0), indicando uma alta qualidade de explicação da variância de cada medição atribuída à componente.

A CP2 representa 35,39% da variação total explicada, estando fortemente relacionada com *E* (0,875) e *gs* (0,838), representando a primeira e a segunda mais importantes variáveis na CP2, respectivamente. As comunalidades foram de 0,935 (*E*) e 0,955 (*gs*), ambas com alta qualidade de explicação da variância.

**Figura 8** - Efeito da fertilização com P e K sobre as trocas gasosas do *T. vulgaris*, nos períodos de alta (tempo 1) e baixa (tempo 2) pluviosidade. Letras diferentes (minúsculas para alta e maiúsculas para baixa pluviosidade) indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de significância. Igarapé-açu, Pará, Brasil.



Fonte: Autor (2021).

**Tabela 9** - Extração de componentes principais para o conjunto de variáveis de trocas gasosas obtidas no período de alta pluviosidade, com seus coeficientes de correlação, ordem de importância das variáveis originais e as cumunalidades.

Variáveis	Componentes principais rotacionados				Cumunalidades
	CP1	CP2	Ordem de importância		
	Coeficientes de correlação $r(Y_i X_j)$		CP1	CP2	
A	0,991		1		0,992
G <sub>s</sub>		0,838		1	0,955
C <sub>i</sub>	0,834		3		0,992
E		0,875		2	0,935
Φ <sub>c</sub>	0,980		2		0,992
EUA	0,908		4		0,990
EiUA	0,789		5		0,982
TF		0,707		3	0,618
Autovalor	4,624	2,831			
% da Variância total	57,806	35,391			
% Variância acumulada	57,806	93,197			

**Fonte:** Autor (2021).

Em relação ao comportamento fisiológico dos indivíduos de *T. vulgaris* em baixa pluviosidade, com médias extremamente baixas, com 87,4 mm em julho, 37,2 mm em agosto, 16,2 mm em setembro, 15 mm em outubro e 0,8 mm em novembro, a análise de componentes principais demonstrou um comportamento distinto das variáveis de trocas gasosas em comparação ao período de alta pluviosidade, sendo indentificadas três CPs (Tabela 10).

Por meio da AF, foram extraídos três componentes principais (CP1, CP2 e CP3). A variância total das oito variáveis fisiológicas analisadas foi explicada por essas componentes, sendo pela CP1 (53,55%), CP2 (20,6%) e CP3 (12,65%). Juntos, explicaram de forma cumulativa 86,8% da variabilidade total das trocas gasosas. A CP1 apresentou altos coeficientes de correlação com E (0,953) e gs (0,941), além de agrupar as variáveis EUA, EiUA e TF. A CP2 esteve positiva e fortemente relacionada com a A (0,956) e a CP3 apresentou altos coeficientes de correlação nas variáveis Φ<sub>c</sub> (0,824) e C<sub>i</sub> (0,760). As cumunalidades de A (0,986), EiUA (0,968), EUA (0,967), E (0,917) e gs (0,896) indicaram alta qualidade na explicação da variância das medições atribuídas às componentes principais.

**Tabela 10** - Extração de componentes principais para o conjunto de variáveis de trocas gasosas obtidas no período de baixa pluviosidade, com seus coeficientes de correlação, ordem de importância das variáveis originais e as cumunalidades.

Variáveis	Componentes principais rotacionados					Cumunalidades
	CP1	CP2	CP3	Ordem de importância		
	Coeficientes de correlação r (Yi Xj)			CP1	CP2	
A		0,956		1		0,986
Gs	0,941			2		0,896
Ci			0,76		2	0,738
E	0,953			1		0,917
$\Phi c$			0,824		1	0,714
EUA	0,754			4		0,967
EiUA	0,747			5		0,968
TF	0,864			3		0,757
Autovalor	4,284	1,648	1,012			
% da Variância total	53,553	20,6	12,651			
% Variância acumulada	53,553	74,154	86,805			

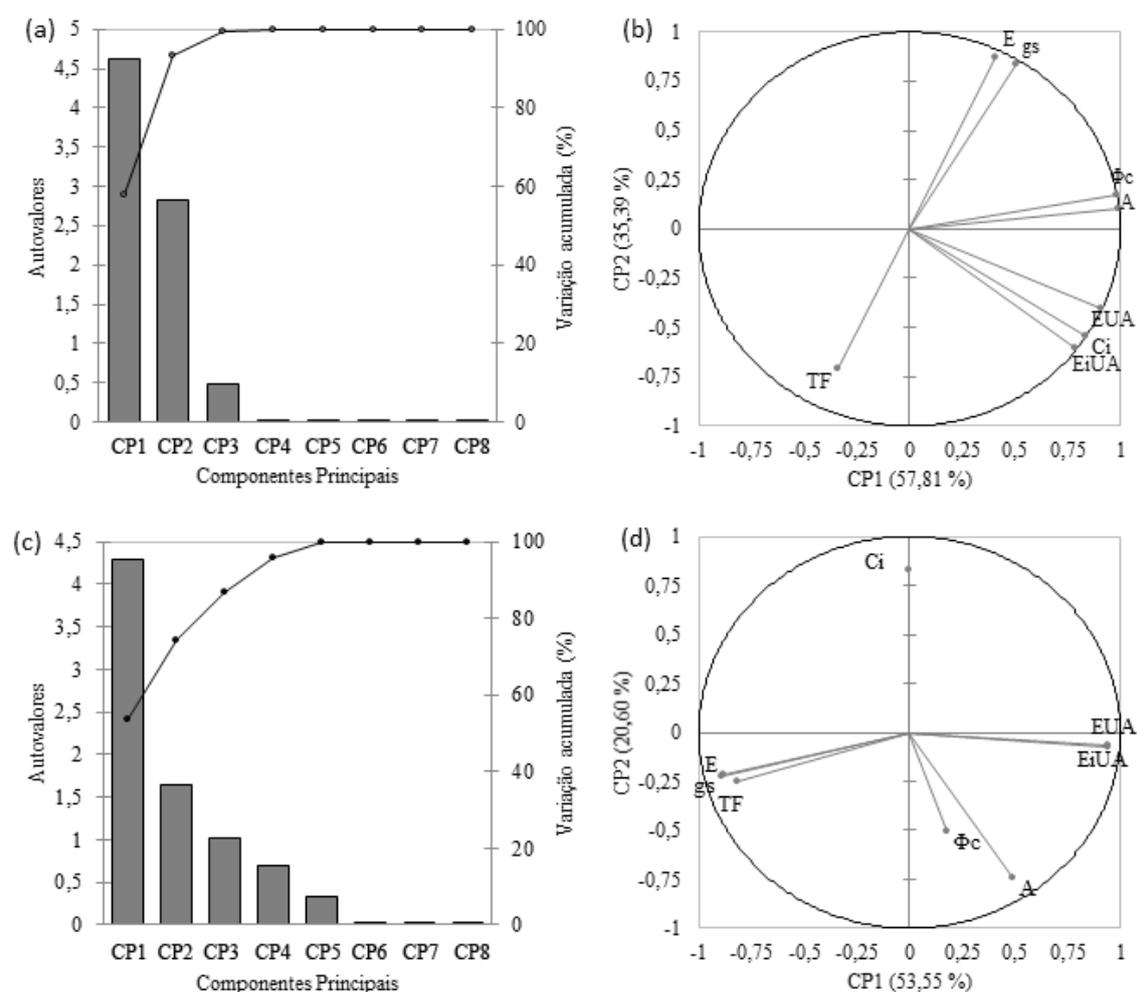
**Fonte:** Autor (2021).

Medidas globais de adequação dos dados originais pelo modelo da AF podem ser dadas pelas estatísticas de KMO e teste de Esfericidade de Bartlett, que permitem analisar o poder de explicação dos fatores ou das componentes principais em relação a cada variável. Os resultados estatísticos de KMO foram de 0,61 (alta pluviosidade) e 0,53 (baixa pluviosidade), o que indica que a solução do modelo fatorial é possível de ser aplicada para todas as variáveis de trocas gasosas em plantas de *T. vulgaris*, além de indicar que os CPs encontrados conseguem descrever satisfatoriamente as variações dos dados originais. O teste de esfericidade de Bartlett apresentou valores de 3792,23 (alta pluviosidade) e 3344,82 (baixa pluviosidade) com nível de significância alto ( $p < 0,01$ ) para ambas as condições ambientais. O valor de Sig. (teste de significância) do presente estudo foi de 0,0001 nas duas condições.

Observa-se que as variáveis analisadas formam grupos por similaridades de explicação, ou seja, estão agrupadas por CPs. No período de alta pluviosidade (Figura 9b), as variáveis que melhor representam a CP1 formam grupo distinto das demais, e são representadas por A, Ci,  $\Phi c$ , EUA e EiUA, estando localizadas distantes da origem dos eixos XY, denominado de plano fatorial, sendo estas que possuem uma maior representatividade na CP1. E as variáveis que melhor representam a CP2 formam o

segundo grupo distinto, e são representadas pelas variáveis  $gs$ ,  $E$  e  $TF$ , estando localizadas distantes da origem dos eixos. Na Figura 7d, que representa o período de baixa pluviosidade, algumas variáveis estão sobrepostas umas às outras, como é o caso da  $gs$  e  $E$ , além de  $EUA$  e  $EiUA$ . Isso demonstra que esses parâmetros possuem a mesma representatividade dentro da CP1. As demais variáveis não se sobrepuseram nas outras componentes. Outro fato importante é que a  $\Phi_c$  está bem próxima ao círculo unitário, indicando uma maior contribuição, em relação às variáveis que estão mais afastadas.

**Figura 9** - Componentes principais gerados (a, c) e Representação bidimensional “plano fatorial” da correlação das variáveis de trocas gasosas (b, d) obtidas em plantio de *T. vulgaris* fertilizado com P e K, nos períodos de alta e baixa pluviosidade, respectivamente. Igarapé-açu, Pará, Brasil.



Fonte: Autor (2021).

## 5.4 Discussão

### 5.4.1 Diagnose Nutricional

Na Figura 7 encontram-se os teores foliares de N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu e Mn para as plantas de *T. vulgaris*, a partir de coletas realizadas em novembro de 2017, mês em que a pluviosidade acumulada ficou em 0,6 mm e umidade relativa de 85,5%, dessa forma em condições propícias ao estresse hídrico. Houve pouca variação entre as plantas sem fertilização e aquelas com maior teor de N (24,59 g kg<sup>-1</sup>). Os teores são próximos daqueles encontrados por Campelo et al. (2018) em plantas adultas de gonçalo-alves (*Astronium fraxinifolium* Schott), guanandi (*Calophyllum brasiliense* Cambess.), ipê-amarelo (*Handroanthus serratifolius* Vahl.), ipê-rosa (*Handroanthus impetiginosa* (Mart.) Matos), marupá (*Simarouba amara* Aubl.) e mogno (*Swietenia macrophylla* King). Isso pode ser uma característica positiva da espécie para se adaptar às condições de restrição hídrica. Teores adequados de N conferem o aumento da sensibilidade estomática, possibilitando maior fechamento dos estômatos em condições de potencial hídrico elevado (VILLAR-SALVADOR et al., 2013) e contribuindo de forma significativa para a turgescência foliar (MAATHUIS, 2009).

Para os teores de P, a variação positiva de 25,3% entre a parcela-controle e as parcelas fertilizadas, chegando ao máximo de 0,89 g kg<sup>-1</sup>, é próximo aos valores encontrados por Zhao et al. (2015), de 0,99 e 1,74 g kg<sup>-1</sup> em folhas velhas e jovens, respectivamente, em plantas de *Erythrophleum fordii* Oliv. que é da mesma família do *T. vulgaris*. Campelo et al. (2018) também encontraram valores semelhantes em plantas adultas de guanandi (*Calophyllum brasiliense* Cambess.), marupá (*Simarouba amara* Aubl.) e mogno (*Swietenia macrophylla* King). Diversos autores ilustram a importância do P na fase inicial do crescimento de espécies florestais de rápido crescimento (MAEDA; BOGNOLA, 2012; STAHL et al. 2013; DIAS et al. 2014). A resposta à aplicação P era esperada devido à baixa disponibilidade deste nutriente em todo o perfil do solo, além da acidez contribuir para adsorção de P, favorecendo a disponibilidade do nutriente mediante a fertilização, conforme ocorreu no tratamento P130,43K100.

O K, por desempenhar funções importantes no estado hídrico das plantas, manutenção da turgescência celular e da homeostase da água na planta (TAIZ; ZEIGER, 2016), recebeu atenção especial no presente trabalho. Os teores foliares de K, que oscilaram de 2,99 a 1,87 g kg<sup>-1</sup>, foram considerados discrepantes em relação a outras

espécies florestais, como *H. serratifolius* ( $>10 \text{ g kg}^{-1}$ ), *H. impetiginosa* ( $>6 \text{ g kg}^{-1}$ ), *S. macrophylla* ( $>8 \text{ g kg}^{-1}$ ) (CAMPELO et al., 2018) e *E. fordii* ( $4,29 \text{ g kg}^{-1}$ ) (ZHAO et al., 2015). Entretanto, nas condições do presente estudo, não foram observados sintomas de estresse hídrico em todo período de avaliação, como perda de turgescência foliar, diminuição da longevidade das folhas e da área foliar, entre outros. Dessa forma, compreendem-se como uma condição da própria espécie os teores de K encontrados.

Os teores foliares mínimos e máximos dos nutrientes Na ( $1,05$  e  $1,35 \text{ g kg}^{-1}$ ), Ca ( $2,95$  à  $4,31 \text{ g kg}^{-1}$ ), Mg ( $0,61$  e  $1,02 \text{ g kg}^{-1}$ ), Fe ( $33,6$  e  $55,22 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Zn ( $22,58$  e  $62,32 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Cu ( $4,67$  e  $7,01 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e Mn ( $59,84$  e  $89,87 \text{ mg kg}^{-1}$ ) apresentaram valores próximos daqueles descritos para outras espécies florestais, dentro da amplitude entre teores mínimos e máximos (BARROSO et al., 2005; BRUN et al., 2012; BÜNDCHEN et al., 2013; BATTIE-LACLAU et al., 2014; ZHAO et al., 2015; CAMPELO et al., 2018; GAZOLA et al., 2019; MORAIS et al., 2019; SILVA et al., 2020). Os presentes resultados indicam que não houve ocorrência de deficiências nutricionais que pudessem influenciar nas trocas gasosas. No entanto, como se observa na ANOVA (Tabela 7), há grandes variações nas concentrações dos nutrientes, o que pode ser devido a diversos fatores, como a retranslocação de nutrientes, idade da folha, condições ambientais, material genético, entre outros.

#### 5.4.2 Trocas gasosas

Em ambas as condições ambientais, as maiores taxas fotossintéticas foram encontradas em plantas fertilizadas, porém no período de baixa pluviosidade e alta irradiância, as maiores médias foram mais de 4 vezes superiores, alcançando  $20,35 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (P130,43K100) (Figura 8a). A influência da fertilização também foi verificada por Gazola et al. (2019) em plantio de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, em que doses de  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  proporcionaram maiores valores totais de biomassa, com aumento de 18,2%, em relação ao controle (sem fertilização), o que se traduziu em taxas fotossintéticas elevadas. Estudos demonstram que espécies florestais de rápido crescimento respondem à fertilização com K no índice de área foliar (BATTIE-LACLAU et al., 2013; CHRISTINA et al., 2015), aumentando a eficiência do uso da luz em plantações florestais. Nesse sentido, a fertilização com K pode favorecer uma maior intensidade de interceptação da luz solar e os processos fotossintéticos, que por sua vez resultam em maior produção de biomassa.

A exposição direta ao sol elevou a temperatura das folhas, com valores até 15,9% maiores que no período de alta pluviosidade, chegando a 29,9°C, intensificando a taxa respiratória, o que induziu ao fechamento dos estômatos (Figuras 8b e 8h). De acordo com Kozlowski et al. (1991), essa condição tende a reduzir a fixação de carbono e causar o aumento no consumo de fotoassimilados. Entretanto, a maioria das plantas desenvolve capacidade para aclimatar-se às variações de temperatura e luminosidade (SEARLE et al., 2011), regulando a condutância estomática (AASAMAA; SÖBER, 2011) e ajustando o aparato fotossintético para absorção adequada, transferência e utilização da energia eletromagnética disponível (GONÇALVES et al., 2010). Schock et al. (2014) verificaram em plantas de *Jatropha curcas* L., cultivadas em pleno sol, maiores valores de taxa assimilatória líquida e eficiência de carboxilação, em comparação a plantas submetidas à baixa disponibilidade de irradiância, corroborando com os resultados do presente estudo (Figura 6e).

Os valores transpiratórios mais elevados no período de baixa pluviosidade podem estar associados à menor variação da umidade relativa do ar, característica comum a ambientes nessas condições (SOUZA et al., 2011; SCHOCK et al. 2014). Por outro lado, maior transpiração pode aumentar a espessura da camada limítrofe de vapor de água existente na interface folha-ar, aumentando a resistência à entrada de CO<sub>2</sub> através dos estômatos, influenciando na relação entre taxa assimilatória líquida e eficiência de carboxilação, parâmetros que foram menores em alta pluviosidade (Figuras 8d e 8e). A elevação da temperatura devida à maior radiação incidida sobre as folhas aumenta a diferença de pressão de vapor entre o ar e a folha, facilitando a transpiração e elevando a taxa transpiratória (LUTTGE, 1997). Este fato fez com que a taxa transpiratória também acompanhasse a variação de temperatura pela sazonalidade.

Durante as trocas gasosas, a absorção de dióxido de carbono do meio externo promove a perda de água e a diminuição dessa perda também restringe a entrada de CO<sub>2</sub> (SHIMAZAKI et al., 2007). Essa interdependência expressa pela relação entre a fotossíntese e a transpiração indica a *EUA*, em que os valores observados relacionam a quantidade de carbono que a planta fixa por cada unidade de água evapotranspirada (JAIMEZ et al., 2005; TAIZ; ZEIGER, 2016). Esse processo é influenciado pelas condições climáticas, entretanto o suprimento nutricional adequado tende a promover maiores taxas fotossintéticas, implicando em rendimentos superiores (MELO et al., 2009).

Em geral, plantas que são bem supridas com K apresentam maior eficiência no uso da água, o que resulta no aumento na vida útil das folhas (SILVA et al., 2002; LACLAU et al., 2009), e conseqüentemente pode aumentar a produção de biomassa. É um processo influenciado pelas condições climáticas (MELO et al., 2009). A suplementação de fósforo pode estar relacionada com uma acumulação de prolina, que é um ajustador osmótico (AL-KARAKI et al., 1996), o que poderia influenciar a regulação osmótica das células-guarda estomáticas. Entretanto, no presente estudo, os maiores valores de EUA e EiUA foram observados no controle, em condição de baixa pluviosidade, não ocorrendo influência da fertilização para esses parâmetros (Figuras 8f e 8g)

As condições climáticas no período de alta pluviosidade favoreceram o aumento do conteúdo de água armazenada no solo, não havendo limitação hídrica para o crescimento das árvores. Os resultados evidenciam que a dose intermediária de P em conjunto com 39,1 g kg<sup>-1</sup> e 78,2 g kg<sup>-1</sup> de K apresentaram os melhores resultados para *EUA*, assim como para *EiUA*. Esses tratamentos também apresentaram taxas de *E* reduzidas. Durante as trocas gasosas, a absorção de dióxido de carbono do meio externo promove a perda de água e a diminuição dessa perda também restringe a entrada de CO<sub>2</sub> (SHIMAZAKI et al., 2007).

Diversos trabalhos evidenciam que a fertilização potássica permite aumentar consideravelmente (até 100%) a *EUA*, como relatado por Stape et al. (2004), Binkley et al. (2004), Almeida et al. (2007) e Teixeira et al. (2008), trabalhando com *Eucalyptus grandis* W.Mill ex Maiden. Ferreira et al. (2012), avaliando plantas jovens de *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl. submetidas à adubação verde, encontraram valores de *EUA* próximos de 3,5 μmol CO<sub>2</sub> mmol<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O. O mecanismo de fechamento estomático no intuito de restringir a perda de água por transpiração pode ser considerado uma estratégia adaptativa utilizada por diferentes espécies visando limitar a perda de água e para exceder a deficiência hídrica, conforme foi verificado para as espécies lenhosas *Tabebuia aurea* Benth. (CABRAL et al., 2004) e *Miquartia guianensis* Aubl. (LIBERATO et al., 2006) submetidas à deficiência hídrica. As informações na literatura sugerem que a maior produtividade em resposta ao K está diretamente relacionada ao fato desse elemento ativar numerosas enzimas e também participar como soluto intracelular no processo de abertura e fechamento dos estômatos regulando o processo de assimilação de C e perda

de água, aumentando a turgescência e a expansão foliar, propiciando maior aproveitamento da radiação solar.

#### 5.4.3 Análise de Componentes Principais

As análises multivariadas permitem a amplificação da informação obtida a partir de testes clássicos, destacando as ligações entre as variáveis de trocas gasosas e as condições ambientais, de uma forma mais conveniente, e confirmando os resultados obtidos pelos testes ANOVAs e Tukey HSD. Além disso, o ACP ajudou na interpretação do comportamento ecofisiológico do plantio de *T. vulgaris* devido à sua capacidade de reduzir as variáveis em menos componentes (MOURA et al., 2010; GRANDA et al., 2014). A característica-chave do ACP é o fato de permitir visualizar as diferentes estratégias seguidas pelas plantas em cada regime pluviométrico.

Neste sentido, no período de alta pluviosidade, um modelo composto de duas componentes foi adequado para representar 93,2% da variância acumulada no presente estudo, sendo que a primeira componente explicou 57,8%, estando positiva e fortemente relacionada com as variáveis A,  $C_i$ ,  $\Phi_c$ , EUA e EiUA (Tabela 9). A natureza das variáveis que se relacionaram com CP1, pode ser interpretada como responsável pela contribuição da assimilação e fixação de carbono em biomassa, com destaque para os maiores pesos positivos dentro da componente para as variáveis A e  $\Phi_c$ . A localização da EUA e EiUA, na CP juntamente com a A, reafirma a relação desses parâmetros com o desempenho de crescimento como indicado em estudos anteriores (MONCLUS et al. 2006, MA et al. 2010). A EUA relaciona a quantidade de carbono fixado pela planta por cada unidade de água evapotranspirada (JAIMEZ et al., 2005; TAIZ; ZEIGER, 2016), sendo um processo influenciado pelas condições climáticas (MELO et al., 2009).

Diferentemente, no período de baixa pluviosidade, os parâmetros de trocas gasosas foram agrupados em 3 componentes principais (CP1, CP2 e CP3), com 86,8% da variabilidade total explicada (Tabela 10). A CP1 apresentou altos coeficientes de correlação com  $g_s$ , E, EUA, EiUA e TF, se relacionando com variáveis do movimento estomático e balanço hídrico das plantas. Em destaque, a  $g_s$  e TF apresentaram os maiores pesos positivos da CP1. Vários estudos demonstram a efetividade do uso da ACP para reduzir o número de variáveis para predição de fatores específicos como, por exemplo, a qualidade da água em função do uso e ocupação do solo (GIRÃO et al., 2007; LOPES et al., 2009; GARDIMAN JÚNIOR et al., 2018). Entretanto, no caso específico das trocas

gasosas em plantio de *T. vulgaris*, nas duas condições ambientais, todas as variáveis apresentaram cumunalidades superiores a 0,4, portanto com poder explicativo suficiente na identificação das variáveis originais com maior importância na combinação linear de cada componente. Dessa forma, não foi possível reduzir o número de variáveis, apesar de cada CP possuir aquelas mais representativas.

A componente CP2 possui pesos positivos, no período de alta pluviosidade, e relacionados com as variáveis gs, E e Tf, que expressam as relações com aspectos relacionados ao movimento estomático das plantas no processo fotossintético, com destaque para E e gs com as maiores cargas fatoriais. Portanto, essa componente principal pode ser interpretada como responsável pela contribuição para troca de gases com a atmosfera, transpiração e manutenção da temperatura foliar. Não houve fatores correlacionados aos demais componentes (CP3 a CP11) já que os coeficientes “cargas fatoriais” determinados a essas componentes tiveram valores menores ( $\leq 0,50$ ) que aqueles apresentados em relação a CP1 e CP2. No período de baixa pluviosidade, a CP2 apresentou alto coeficiente de correlação somente com A, com alta carga fatorial, dessa forma, a componente explica exclusivamente as taxas fotossintéticas líquidas das plantas de *T. vulgaris*. Observa-se o efeito da sazonalidade no comportamento distinto das variáveis dentro da ACP. Em adição, houve mais uma componente (CP3), a qual agrupou as variáveis Ci e  $\Phi_c$ , que se relacionam com a concentração de substrato (CO<sub>2</sub>), o que influencia na atividade de carboxilação da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), refletindo nas taxas de fotossíntese (SOUZA et al., 2013).

Ainda analisando as Tabelas 9 e 10, para ambas as condições ambientais, verifica-se que as cumunalidades próximas de 1,00 representam alta qualidade de explicação da variância de cada medição atribuída às componentes. Para definir a qualidade de representação das componentes principais pelas assertivas que a compõem, é recomendado o teste de cumunalidades, que representa a percentagem da variância da variável original explicada pelas componentes principais (REIS, 1997). Desse modo, Hair et al. (2009) afirmam que as variáveis com comunalidade inferiores a 0,40 não têm poder explicativo suficiente na identificação das variáveis originais com maior importância na combinação linear de cada componente e, para isso, os autores propõem avaliar cada uma das variáveis para possível extração do conjunto de dados.

Sob esta ótica, no período de alta pluviosidade, a ACP demonstrou que para a CP1, a variável A obteve a maior cumunalidade de valor igual a 0,992, indicando que a

solução da CP1 denominada de variáveis relacionadas à “assimilação e fixação de carbono em biomassa pelas plantas”, respondeu por mais variância nesta variável do que para as variáveis  $\Phi C$  e EUA. A AF para CP2, que confere características relacionadas a “troca de gases com a atmosfera, transpiração e manutenção da temperatura foliar” destacou a variável  $gs$  como a de maior cumunalidade, sendo esta de 0,955, indicando que a solução da CP2 respondeu por mais variância na referida variável ( $gs$ ) do que para a variável  $E$ , que teve cumunalidade inferior (0,935). No período de baixa pluviosidade, as variáveis de maior cumunalidade foram  $E$  com 0,943 na CP1,  $A$  com 0,956 na CP2 e  $\Phi c$  com 0,824 na CP3.

Considerando o objetivo da sumarização de variáveis pelas AF e da ACP, pode-se finalmente determinar que as componentes (CP1 e CP2 no período de alta pluviosidade e CP1, CP2 e CP3 no período de baixa pluviosidade) podem explicar as 8 variáveis de trocas gasosas em plantio de *T. vulgaris* fertilizado com P e K, nas duas condições ambientais. A natureza das variáveis agrupadas em cada componente principal explica o conjunto original das 8 variáveis ecofisiológicas, sem que haja a perda da confiabilidade dos resultados encontrados, pois todas as demais variáveis estão proximamente correlacionadas a esses Componentes Principais resultantes. Portanto, a redução do número de variáveis neste estudo se justifica pela facilitação na análise e manuseio dos dados, além de propiciar uma melhor compreensão do método de AF, nas duas condições ambientais. Além disso, o método permite usar variáveis que conferem assimilação e fixação de carbono em biomassa pelas plantas de cada CP para explicar as demais variáveis de trocas gasosas no plantio de *T. vulgaris*. Isso quer dizer que, a utilização dessa variável principal de cada componente se torna suficiente para explicar o que o conjunto delas representa. Porém, cabe salientar que as condições ambientais influenciaram no comportamento das variáveis de trocas gasosas dentro de cada CP.

Na Figura 9 observa-se o resultado da correlação das 8 variáveis de trocas gasosas em plantio de *T. vulgaris*, nas duas condições ambientais, com os escores das CPs geradas pela AF, que respondem por 93,19% da variabilidade acumulada, no período de alta pluviosidade (CP1 e CP2) e 86,8% no período de baixa pluviosidade (CP1, CP2 e CP3). Pode-se observar ainda na Figura 5, como as variáveis agrupam-se e como são suas relações com os eixos (OXY), com as cargas fatoriais e com as componentes principais por meio das técnicas da AF e ACP. A combinação de indicadores ambientais, como a pluviosidade, com indicadores multivariados de comportamento fisiológico pode ser

utilizada para avaliação de plantios florestais com a espécie *T. vulgaris*. O método descrito no presente trabalho serve como um estudo preliminar na medida em que identifica prontamente variação no comportamento das variáveis em função da pluviosidade, porém sempre com alta confiabilidade na explicação do conjunto de dados. Em adição, recomendam-se análises adicionais da hereditariedade e variação genotípica nos plantios de *T. vulgaris* nos próximos estudos sobre a espécie.

## 5.5 Conclusão

Em ambas as condições ambientais, as maiores taxas fotossintéticas foram encontradas em plantas fertilizadas, com destaque para o tratamento P130,43K100 com taxas fotossintéticas até 4 vezes superiores no período de baixa pluviosidade e alta irradiância, em relação ao período de alta pluviosidade. As doses de 130,43 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato triplo e 100 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio foram viáveis para aumentar as taxas fotossintéticas de plantas jovens de *T. vulgaris* em períodos de baixa pluviosidade.

Foi possível realizar a redução inicial de 8 variáveis de trocas gasosas para 2 e 3 componentes principais, nos períodos de alta e baixa pluviosidade, respectivamente. A sazonalidade influenciou no agrupamento das variáveis dentro de cada componente principal. O método multivariado utilizado no presente trabalho identificou prontamente variação no comportamento das variáveis em função da pluviosidade, com alta confiabilidade na explicação do conjunto de dados.

## REFERÊNCIAS

- AASAMAA, K.; SÖBER, A. Stomatal sensitivities to changes in leaf water potential, air humidity, CO<sub>2</sub> concentration and light intensity, and the effect of abscisic acid on the sensitivities in six temperate deciduous tree species. **Environmental and Experimental Botany**, v.71, p.72-78, 2011.
- ADC. 2006. LCPro+ portable system instrution manual. ADC BioScientific Limited, Hertforshire, pp.1-101.
- AL-KARAKI G.N. et al. Phosphorus nutrition and water effects on proline accumulation in sorghum and bean. **Journal of Plant Physiology**, Leipzig, v.148, p.745-751, 1996.
- ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V.; LANDSBERG, J.J.; REZENDE, G.D. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**: Amsterdam, v. 251, p. 10-21, 2007.
- ANDRADE, A. R. S.; CRUZ, A. F. S.; BEZERRA, T. M. E.; LIMA, J. R. S. Aplicação da estatística multivariada na identificação das características biométricas de produção e qualidade de frutos do melão. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v.10, n.1, p.25-40, 2017.
- ANDRADE, L. R. M. Corretivos e fertilizantes para culturas perenes e semiperenes. In: SOUSA, D. M. & LOBATO, E. Cerrado: Correção do solo e adubação. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. cap. 13, p. 317-366.
- ARCO-VERDE, M. F.; TONINI, H.; MOURÃO Jr., M. A silvicultura nas savanas de Roraima. In: BARBOSA, R. I.; XAUD, H. A. M.; SOUZA, J. M. C. (Ed.) Savanas de Roraima: Etnoecologia, Biodiversidade e Potencialidades Agrossilvipastoris. Boa Vista: FEMACT, 2005. cap. 13, p. 195-200.
- BARROSO, D.G.; FIGUEIREDO, F.A.M.M. de A.; PEREIRA, R. de C.; MENDONÇA, A.V.R.; SILVA, L. da C. Diagnóstico de deficiências de macronutrientes em mudas de teca. **Revista Árvore**, v.29, n.5, p.671-679, 2005.
- BARROSO, L. P., ARTES, R. Análise Multivariada. Lavras: **Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria**, v.1, p.150, 2003.
- BASSACO, M. V. M.; MOTTA, A. C. V.; PAULETTI, V.; PRIOR, S. A.; NISGOSKI, S.; FERREIRA, C. F. Nitrogen, phosphorus, and potassium requirements for *Eucalyptus urograndis* plantations in southern Brazil. **New Forests**, v.49, p. 681–697, 2018.
- BASTOS, T. X.; PACHECO, N. A. Características agroclimáticas de Igarapé Açu, PA e suas implicações para as culturas anuais: feijão caupi, milho, arroz e mandioca. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999.
- BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J. P.; BERI, C.; MIETTON, L.; MUNIZ, M. R. A.; ARENQUE, B. C.; PICCOLO, M. de C.; JORDAN-MEILLE, L.; BOUILLET, J. P.;

NOUVELLON, Y. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. **Plant, Cell and Environment**, v.37, pp. 70-81, 2014.

BATTIE-LACLAU, P.; PICCOLO, M. de C.; ARENQUE, B. C.; BERI, C.; MIETTON, L.; MUNIZ, M. R. A.; JORDAN-MEILLE, L.; BUCKERIDGE, M. S.; NOUVELLON, Y.; RANGER, J.; BOUILLET, J. P. Influence of potassium and sodium nutrition on leaf area components in *Eucalyptus grandis* trees. **Plant and soil**, The Hague, v. 371, n. 1-2, p. 19-35, out. 2013.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, I.; STAPE, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v.405, n.1, pp.271–283, 2017.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**: Amsterdam, v. 193, p. 5-16. 2004.

BRUN, E. J.; ROSA, S.F. da; ROPPA, C.; SCHUMACHER, M. V.; BRUN, F. G. K. Avaliação nutricional de espécies nativas utilizadas na arborização do campus da universidade federal de Santa Maria-RS. **REVSBAU**, v.7, n.1, p. 89-111, 2012.

BUENO, C. R. P.; ARRAES, C. L.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Análise multivariada na determinação do risco de erosão em solos sob irrigação. **Irriga**, v.15, n.1, p.23-25, 2010.

BÜNDCHEN, M.; BOEGER, M. R. T.; REISSMANN, C. B.; SILVA, S. L. C. da. Status nutricional e eficiência no uso de nutrientes em espécies arbóreas da floresta subtropical no sul do Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 227-236, 2013.

CABRAL, E. L.; BARBOSA, D. C. A.; SIMABUKURO, E. A. Crescimento de plantas jovens de *Tabebuia aurea* (Manso) Benth. & Hook. f. ex S. Moore submetidas a estresse hídrico. **Acta botânica brasílica**, v.18, n.2, p.241-251, 2004.

CAMPELO, D. de H.; LACERDA, C.F. de; SOUSA, J.A. de; BEZERRA, A.M.E.; ARAÚJO, J.D.M.; NEVES, A.L.R.; SOUSA, C.H.C. Características morfofisiológicas foliares e estado nutricional de seis espécies lenhosas em função da disponibilidade de água no solo. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 924-936, 2018.

CAMPELO, D. de H.; LACERDA, C.F.; SOUSA, J.A.; CORREIA, D.; BEZERRA, A.M.E.; ARAÚJO, J.D.M.; NEVES, A.L.R. Trocas gasosas e eficiência do fotossistema ii em plantas adultas de seis espécies florestais em função do suprimento de água no solo. **Revista Árvore**, v.39, n.5, pp.973-983, 2015.

CAMPOE, O. C.; MUNHOZ, J. S. B.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; MATTOS, E. M. de; FERREZ, A. P. C.; STAPE, J. L. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p. 149-160, 2016.

CHAUDHARY, M. I.; ADU-GYAMFI, J.; SANEOKA, H. NGUYEN, T. N.; The effect of phosphorus deficiency on nutrient uptake, nitrogen fixation and photosynthetic rate in mashbean, mungbean and soybean. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.30, n.4, pp.537-544, 2008.

CHRISTINA M.; LE MAIRE, G.; BATTIE-LACLAU, P.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J-P.; JOURDAN, C.; GONÇALVES, J. L. M.; LACLAU, J-P. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Global Changes Biology**, v. 21, p. 2022-2039, 2015.

CIAIS, P.; DOLMAN, A. J.; BOMBELLI, A.; DUREN, R.; PEREGON, A.; RAYNER, P. J.; MILLER, C.; GOBRON, N.; KINDERMAN, G.; MARLAND, G.; GRUBER, N.; CHEVALLIER, F.; ANDRES, R. J.; BALSAMO, G.; BOPP, L.; BRÉON, F.-M.; BROQUET, G.; R. DARGAVILLE, R.; BATTIN, T. J.; BORGES, A.; BOVENSMANN, H.; BUCHWITZ, M.; BUTLER, J.; CANADELL, J. G.; COOK, R. B.; DEFRIES, R.; ENGELEN, R.; GURNEY, K. R.; HEINZE, C.; HEIMANN, M.; HELD, A.; HENRY, M.; LAW, B.; LUYSSAERT, S.; MILLER, J.; MORIYAMA, T.; MOULIN, C.; MYNENI, R. B.; NUSSLI, C.; OBERSTEINER, M.; OJIMA, D.; PAN, Y.; PARIS, J.-D.; PIAO, S. L.; POULTER, B.; PLUMMER, S.; QUEGAN, S.; RAYMOND, P.; REICHSTEIN, M.; RIVIER, L.; SABINE, C.; SCHIMEL, D.; TARASOVA, O.; VALENTINI, R.; WANG, R.; WERF, G.; WICKLAND, D.; WILLIAMS, M.; ZEHNER, C. Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system. **Biogeosciences**, v.11, pp.3547–3602, 2014.

CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. **Análise multivariada: para cursos de administração, ciências contábeis e economia**. FIPECAFI – Fundação Instituto de Pesquisas Contábeis, Atuariais e Financeiras; São Paulo: Atlas, 2009. 541 p.

COSTA, C.F.G. da; FIGUEIREDO, R. de O.; OLIVEIRA, F. de A.; SANTOS, I. P. de O. Escoamento superficial em Latossolo Amarelo distrofico típico sob diferentes agroecossistemas no nordeste paraense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, pp.162-169, 2013.

DIAS, L. P. R.; GATIBONI, L. C.; ERNANI, P. R.; MIQUELLUTI, D. J.; CHAVES, D. M.; BRUNETTO, G. Partial substitution of soluble phosphate by rock phosphate in the planting of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus dunnii* in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.2, pp.516–523, 2014.

EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes / editor técnico, Fábio Cesar da Silva. - 2. ed. rev. ampl. - Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

FARIAS, J. de; MARIMON, B.S.; SILVA, L. de C.R.; PETTER, F.A.; ANDRADE, F.R.; MORANDI, P.S.; MARIMON-JUNIOR, B.H. Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v.368, pp.173–182, 2016.

FELFILI, J. M.; SILVA JÚNIOR, M. C. Distribuição dos diâmetros numa faixa de Cerrado na fazenda Água Limpa (FAL) em Brasília - DF. **Acta Botânica**, v. 2, n. 1 - 2, p. 85 - 104, 1999.

FERNANDEZ, J.Q.P.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; MORAES, E.J. Productivity of *Eucalyptus camaldulensis* affected by rate and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian oxisol. **Forest Ecology and Management**, v.127, pp. 93–102, 2000.

FERREIRA, M. J.; GONÇALVES, J. F. de C.; FERRAZ, J. B. S. Crescimento e eficiência do uso da água de plantas jovens de castanheira-da-amazônia em área degradada e submetidas à adubação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 393-401, 2012.

FREITAS, G. A.; VAZ-DE-MELO, A.; PEREIRA, M. A. B.; ANDRADE, C. A. O.; LUCENA, G. N.; SILVA, R. R. Influência do sombreamento na qualidade de mudas de *Sclerolobium paniculatum* Vogel para recuperação de área degradada. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 2, p. 5-12, 2012.

GARDIMAN JUNIOR, B.S.; GARCIA, G. de O.; CECÍLIO, R.A.; LOOS, R.A.; MAFIA, R.G.; ABAD, J.I.M.; SIMÃO, J.B.P.; BARBOSA, V.H.B. Variáveis-chave para determinação da qualidade da água em microbacias com plantios de eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 127-140, 2018.

GAZOLA, R. de N.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, R. C. M.; GAZOLA, R. P. D.; CELESTRINO, T. de S.; SILVA, A. C. da; SILVA, P. H. M. da. Potassium Fertilization of *Eucalyptus* in an Entisol in Low-Elevation Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.43, pp.1-17, 2019.

GERARDEAUX, E.; SAUR, E.; CONSTANTIN, J.; PORTÉ, A.; JORDAN-MEILLE, L. Effect of carbon assimilation on dry weight production and partitioning during vegetative growth. **Plant Soil**, v.324, pp. 329-343, 2009.

GIRÃO, E. G.; ANDRADE, E. M. de; ROSA, M. de F.; ARAÚJO, L. de F. P. de; MEIRELES, A. C. M. Seleção dos indicadores da qualidade de água no Rio Jaibaras pelo emprego da análise da componente principal. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 1, p. 17-24, 2007.

GONÇALVES, J. F. C.; SILVA, C. E.; GUIMARÃES, D. G.; BERNARDES, R. S. Análise dos Transientes da Fluorescência da Clorofila a de Plantas Jovens de *Carapa guianensis* e de *Dipteryx odorata* submetidas a dois ambientes de luz. **Acta Amazônica**, v.40, p.89-98, 2010.

GONÇALVES, J. L. M., 2011. Fertilização de Plantações de Eucalipto. In: GONÇALVES, J. L. M., PULITO, A. P., ARTHUR JUNIOR, J. C., SILVA, L. D. (Eds.), II Encontro Brasileiro de Silvicultura. IPEF, Campinas, pp. 85–114.

GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; GONÇALVES, T. D.; MOREIRA, R. M. e; MENDES, J. C. T.; GAVA, J. L. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*, com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 94, p. 187-201, 2012.

GRANDA, V.; DELATORRE, C.; CUESTA, C.; CENTENO, M.L.; FERNÁNDEZ, B.; RODRÍGUEZ, A.; FEITO, I. Physiological and biochemical responses to severe drought stress of nine *Eucalyptus globulus* clones: a multivariate approach. **Tree Physiology**, v.34, pp.778–786, 2014.

HABERMAN, A., DAG, A., SHTERN, N., ZIPORI, I., EREL, R., BEN-GAL, A., YERMIYAHU, U. Long-term impact of potassium fertilization on soil and productivity in intensive olive cultivation. **Agronomy**, v.9, pp.1–14, 2019.

HAIR, J.; ANDERSON, R.; TATHAM R. **Análise multivariada de dados**. 6ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.600 p.

HOHNWALD, H.; KATO, O. R.; WALENTOWSKI, H. Accelerating Capoeira Regeneration on Degraded Pastures in the Northeastern Amazon by the Use of Pigs or Cattle. **Sustainability**, v.11, pp.1-16, 2009.

HUBBARD, R.M.; RYAN, M.G.; GIARDINA, C.P.; BARNARD, H. The effect of fertilization on sap flux and canopy conductance in a *Eucalyptus saligna* experimental Forest. **Global Change Biology**, v. 10, p. 427–436, 2004.

IBM Corp. Released 2020. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 27.0. Armonk, NY: IBM Corp.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA [INMET]. 2019. Climate. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/clima>. [Acesso em 15 de nov. 2020].

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Core Writing Team, Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014; pp. 1–151.

JAIMEZ, R. E.; RADA, F.; GARCÍA-NÚÑEZ, AZÓCAR, A. Seasonal variations in leaf gas exchange of plantain cv. Hartón (*Musa AAB*) under different soil water conditions in a humid tropical region. **Scientia Horticulturae**, v. 104, n. 1, p. 79-89, 2005.

KÖRNER, C.; ASSHOFF, R.; BIGNUCOLO, O.; HÄTTENSCHWILER, S.; KEEL, S.G.; PELÁEZ-RIEDL, S.; PEPIN, S.; SIEGWOLF, R.T.; ZOTZ, G. Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO<sub>2</sub>. **Science**, v.309, pp.1360-1362, 2005.

KOZLOWSKI, T. T.; KRAMER, P. J.; PALLARDY, S. G. The physiological ecology of woody plants. San Diego: Academic Press, 1991. 657p.

LACLAU, J-P.; ALMEIDA, J. C. R.; GONÇALVES, J. L. M; SAINT-ANDRÉ, L.; VENTURA, M.; RANGER, J.; MOREIRA, R. M.; NOUVELLON, Y. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. **Tree Physiology**, v. 29, p.111-24, 2009.

LEITE, H. G.; SILVA, M.L.M. da; BINOTI, D.H.B.; FARDIN, L.; TAKIZAWA, F.H. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. **European Journal of Forest Research**, v.130, n.2, pp.263-269, 2010.

LEUZINGER, S.; KÖRNER, C. Water savings in mature deciduous forest trees under elevated CO<sub>2</sub>. **Global Changes Biology**, v.13, pp. 2498–2508, 2007.

LIBERATO, M. A. R.; GONÇALVES, J. F. de C.; CHEVREUIL, L. R.; NINA JUNIOR, A. da R. FERNANDES, A. V.; SANTOS JUNIOR, U. M. dos. Leaf water potential, gas Exchange and chlorophyll a fluorescence in acariquara seedlings (*Miquartia guianensis* Aubl.) under swater stress and recovery. **Brasilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 18, n. 2, p. 315-323, 2006.

LIU, J., HU, T., FENG, P., WANG, L., YANG, S. Tomato yield and water use efficiency change with various soil moisture and potassium levels during different growth stages. **PLoS One**, v.14, pp.1–14, 2019.

LOPES, F. B.; ANDRADE, E. M. de; AQUINO, D. do N.; LOPES, J. F. B. Proposta de um índice de sustentabilidade do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 2, p. 185-193, 2009.

LUTTGE, U. Interaction of stress factors and the midday depression in plants with C3: photosynthesis. **Physiological Ecology of Tropical Plants**, v.35, p.122-124, 1997.

MA, X.; MA, F.; LI, C.; MI, Y.; BAI, T.; SHU, H. Biomass accumulation, allocation, and water-use efficiency in 10 *Malus* rootstocks under two watering regimes. **Agroforest Systems**, v.80, pp.283–294, 2010.

MAATHUIS, F. J. Physiological functions of mineral macronutrients. **Current Opinion in Plant Biology**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 250-258, 2009.

MACHADO, A. F. L.; FERREIRA, L. R.; SANTOS, L. D. T.; FERREIRA, F. A.; VIANA, R. G.; MACHADO, M. S.; FREITAS, F. C. L. Eficiência fotossintética e uso da água em plantas de eucalipto pulverizadas com glyphosate. **Planta Daninha**, v. 28, n. 2, p.319-327, 2010.

MAEDA, S.; BOGNOLA, I. A. Influence of lime and phosphorus in initial growth of eucalyptus and in P critical level. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.32, n.72, pp.401–407, 2012.

MANLY, B. J. F. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. Porto Alegre: Bookman, 2008. 229p.

MARTINOTO, F.; MARTINOTTO, C.; COELHO, M. de F. B.; AZEVEDO, R. A. L.; ALBUQUERQUE, M. C. de F. Sobrevivência e crescimento inicial de espécies nativas do cerrado em consórcio com a mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 1, pp. 22-29, 2012.

MELO, A. S. de; SILVA JÚNIOR, C. D. da; FERNANDES, P. D.; SOBRAL, L. F.; BRITO, M. E. B.; DANTAS J. D. M. Alterações das características fisiológicas da bananeira sob condições de fertirrigação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 3, p.733-741, 2009.

MELO, E. A. S. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ROCHA, J. H. T.; HAKAMADA, R. E.; BAZANI, J. H.; WENZEL, A. V. A.; ARTHUR, J. C., JR.; BORGES, J. S.; MALHEIROS, R.; LEMOS, C. C. Z.; FERREIRA, E. V. O.; FERRAZ, A. D. V. Responses of Clonal Eucalypt Plantations to N, P and K Fertilizer Application in Different Edaphoclimatic Conditions. **Forests**, v.7, n.2, pp.1-15, 2016.

MELO, E. N. de; SOUTO, A. G. de L.; CAVALCANTE, L. F.; DINIZ, B. L. M. T.; CAVALCANTE, I. H. L.; FERREIRA FILHO, R. M.; SILVA, M. R. M. da; OLIVEIRA, C. J. A.; MELO, P. A. F. R. de. Leaf mineral composition and noni fruit production under vegetal mulching and potassium fertilization. **Scientia Horticulturae**, v.281, pp. 109990, 2021.

MINGOTTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. p. 295.

MOCHIUTTI, S.; QUEIROZ, J. A. L.; MELÉM JÚNIOR, M. J. Produção de serrapilheira e retorno de nutrientes de um povoamento de tachi-branco e de uma floresta secundária no Amapá. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 52, p. 3-20, 2006.

MONCLUS, R.; DREYER, E.; VILLAR M.; DELMONTE, F. M.; DELAY, D.; PETIT, J. M.; BARBAROUX, C.; LE THIEC, D.; BRÉCHET, C.; BRIGNOLAS, F. Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* × *Populus nigra*. **New Phytologist**, v.169, pp.765–777, 2006.

MORAIS, T. C. B. de; PRADO, R. de M.; TRASPADINI, E. I. F.; WADT, P. G. S.; PAULA, R. C. de; ROCHA, A. M. S. Efficiency of the CL, DRIS and CND Methods in Assessing the Nutritional Status of *Eucalyptus spp.* Rooted Cuttings. **Forests**, v.10, n.9, pp.786, 2019.

MOSTAGHIMI, F.; SEYEDI, N.; SHAFIEI, A. B.; CORREIA, O. How do leaf carbon and nitrogen contents of oak hosts affect the heterotrophic level of *Loranthus europaeus*?

Insights from stable isotope ecophysiology assays. **Ecological Indicators**, v.125, pp.107583, 2021.

MOURA, L. H. A.; BOAVENTURA, G. R.; PINELLI, M. P. A qualidade de água como indicador de uso e ocupação do solo: bacia do Gama – Distrito Federal. **Química Nova**, n. 33, n. 1, p. 97-103, 2010.

OFORI-AMANFO, K.K.; KLEM, K.; VESELÁ, B.; HOLUB, P.; AGYEI, T.; MAREK, M.V.; GRACE, J.; URBAN, O. Interactive Effect of Elevated CO<sub>2</sub> and Reduced Summer Precipitation on Photosynthesis is Species-Specific: The Case Study with Soil-Planted Norway Spruce and Sessile Oak in a Mountainous Forest Plot. **Forests**, v.12, n.1, pp.42, 2021.

OTTO, M. S. G.; VERGANI, A. R.; GONÇALVES, A. N.; VRECHI, A.; SILVA, S. R.; STAPE, J. L. Fotossíntese, condutância estomática e produtividade de clones de *Eucalyptus* sob diferentes condições edafoclimáticas. **Revista Árvore**, vol.37 n.3, 2013.

PARRY, M. M.; KATO, M. D. S. A.; CARVALHO, J. G. Macronutrientes em caupi cultivado sob duas doses de fosforo em diferentes épocas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.3, pp. 236-242, 2008.

POUR, A.P.; FARAHBAKHS, H.; TOHIDINEJAD, E. Nitrogen, phosphorous and potassium levels affected growth indices, leaf gas exchange parameters and biomass production of henna (*Lawsonia inermis* L.) ecotypes. **Industrial Crops and Products**, v.163, pp.113297, 2021.

RAGEL, P.; RADDATZ, N.; LEIDI, E. O.; QUINTERO, F. J.; PARDO, J. M. Regulation of K<sup>+</sup> nutrition in plants. **Frontiers in Plant Science**, v.10, pp.1–21, 2019.

RAWAL, D. S.; KASEL, S.; KEATLEY, M. R.; APONTE, C.; NITSCHKE, C. R. Environmental effects on growth phenology of co-occurring *Eucalyptus* species. **International Journal of Biometeorology**, v. 58, n. 4, p. 427-442, 2014.

REIS, E. Estatística multivariada aplicada. Lisboa, Edições Silabo 1997, 120 p.

RICKEN, P.; HESS, A.F.; BORSOI, G.A. Relações biométricas e ambientais no incremento diamétrico de *Araucaria angustifolia* no planalto serrano catarinense. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1592-1603, 2018.

SAPORETTI JUNIOR, A. W.; MEIRA NETO, J. A. A.; ALMADO, R. de P. Fitossociologia de Cerrado *sensu stricto* no Município de Abaeté-MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 413-419, 2003.

SCHOCK, A. A.; RAMM, A.; MARTINAZZO, E. G.; SILVA, D. M.; BACARIN, M. A. Crescimento e fotossíntese de plantas de pinhão-mansão cultivadas em diferentes condições de luminosidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.1, p.3–9, 2014.

SCHWERZ, F., ELOY, E.; ELLI, E. F.; CARON, B. O. Reduced planting spacing increase radiation use efficiency and biomass for energy in black wattle plantations: towards sustainable production systems. **Biomass & Bioenergy**, v.120, pp.229–239, 2019.

SEARLE, S. Y.; THOMAS, S.; GRIFFIN, K. L.; HORTON, T.; KORNFELD, A.; YAKIR, D.; HURRY, V.; TURNBULL, M. H. Leaf respiration and alternative oxidase in field-grown alpine grasses respond to natural changes in temperature and light. **New Phytologist**, v.189, p.1027-1039, 2011.

SHIMAZAKI, K. I.; DOI, M.; ASSMANN, S. M.; KINOSHITA, T. Light regulation of stomatal movement. **Annual Review of Plant Biology**, v. 58, p.219-247, 2007.

SILVA, M. O. dos S.; SILVA, M. G. da; BUFALINO, L.; ASSIS, M. R. de; GONÇALVES, D. de A.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. de P. Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v.32, n.1, pp.211–224, 2021.

SILVA, N. F. da; BARROS, N. F. de; NEVES, J. C. L.; SCHULTHAIS, F.; NOVAIS, R. F. de; MATTIELO, E. M. Yield and Nutrient Demand and Efficiency of *Eucalyptus* under Coppicing Regime. **Forests**, v.11, n.8, pp.852, 2020.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; PEREIRA, P. R. G. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. **Rev Bras Cienc Solo**, v. 26, p.1001-1010, 2002.

SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E. N.; SGARBI, F.; MUNIZ, M. R. A. **Seja doutor do seu eucalipto**. Informações Agronômicas, Piracicaba, n. 93, 2001. 23 p.

SOUZA, C. D. de; FERNANDES, D. P.; BARROSO, M. R.; PORTES, T. A. Transpiração de espécies típicas do cerrado medida por transpirômetro de equilíbrio e porômetro. **Cerne**, v.17, p.509-515, 2011.

SOUZA, T. C.; SOUZA, T. C. de; CASTRO, E. M. de; MAGALHAES, P. C.; LINO, L. de O.; ALVES, E. T.; ALBUQUERQUE, P. E. P. de. Morphophysiology, morphoanatomy, and grain yield under field conditions for two maize hybrids with contrasting response to drought stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 11, p. 3201-3211, 2013.

STAHL, J.; ERNANI, P. R.; GATIBONI, L. C.; CHAVES, D. M.; NEVES, C. U. Dry matter yield and nutritional efficiency of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus dunnii* clones due to addition of phosphorus rates to the soil. **Ciência Florestal**, v.23, n.2, pp.287–295, 2013.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 17-31, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2016. 888 p.

TAVARES, L. de S.; VALADÃO, F. C. de A.; WEBER, O. L. dos S.; ESPINOSA, M. M. Análise multivariada de espécies florestais nativas em relação aos atributos químicos e texturais do solo na região de Cotriguaçu-MT. **Ciência Florestal**, v.29 n.1, pp.281-297, 2019.

TEIXEIRA, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; ARTHUR JÚNIOR, J.C.; DEZORDI, C. *Eucalyptus* sp seedling response to potassium fertilization and soil water. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 1, p. 47-63, 2008.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F.; SCHWENGBER, D.; MOURÃO JUNIOR, M. Avaliação de espécies florestais em área de mata no estado de Roraima. **Cerne**, v. 12, n.1, p. 8-18, 2006.

TONINI, H.; SCHWENGBER, D. R.; MORALES, M. M.; OLIVEIRA, J. M. F. de. Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* sob diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, e201801569, p. 1-8, 2018.

URBAN, O.; KLEM, K.; HOLIŠOVÁ, P.; ŠIGUT, L.; ŠPRTOVÁ, M.; TESLOVÁ-NAVRÁTILOVÁ, P.; ZITOVÁ, M.; ŠPUNDA, V.; MAREK, M.V.; GRACE, J. Impact of elevated CO<sub>2</sub> concentration on dynamics of leaf photosynthesis in *Fagus sylvatica* is modulated by sky conditions. **Environmental Pollution**, v.185, pp.271–280, 2014.

UZUN, H.; YILDIZ, Z.; GOLDFARB, J. L.; CEYLAN, S. Improved prediction of higher heating value of biomass using an artificial neural network model based on proximate analysis. **Bioresource Technology**, v.234, pp.122–130, 2017.

VILLAR-SALVADOR, P.; PEÑUELAS, J. L.; JACOBS, D. F. Nitrogen nutrition and drought hardening exert opposite effects on the stress tolerance of *Pinus pinea* L. seedlings. **Tree physiology**, v. 33, n. 2, p. 221-232, 2013.

WARREN, C. R.; ARANDA, I.; CANO, F. J. Responses to water stress of gas exchange and metabolites in *Eucalyptus* and *Acacia spp.* **Plant, Cell and Environment**, v.34, p.1609–1629, 2011.

WENG, X. Y.; ZHENG, C. J.; XU, H. X.; SUN, J. Y. Characteristics of photosynthesis and functions of the water-water cycle in rice (*Oryza sativa* L.) leaves in response to potassium deficiency. **Physiologia Plantarum**, v.131, pp. 614-621, 2007.

YIN GUANG-CAI, ZHOU GUO-YI, MORRIS JIM, HUANG ZHI-HONG, CHU GUO WEI, ZHOU GUANG-YI. Sap flow response of *Eucalyptus (Eucalyptus urophylla)* to environmental stress in south china. **Journal of Zhejiang University Science**, v. 5, p. 1218-1225, 2004.

ZHANG, S.; LI, Q.; MA, K.; CHEN, L. Temperaturedependent gas exchange and stomatal/non-stomatal limitation to CO<sub>2</sub> assimilation of *Quercus liaotungensis* under midday higher irradiance. **Photosynthetica**, v.39, n. 3, p. 383-388, 2001.

ZHAO, Z.G.; LIN, K.Q.; GUO, J.J.; ZENG, J. Diagnosis of macronutrient deficiency in *Erythrophleum fordii*, a nitrogen-fixing rosewood species. **Annals of Forest Research**, v.58, n.1, pp.15-26, 2015.

ZORB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture - Status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, v.171, pp.656–669, 2014.

## 6. CRESCIMENTO E EFICIÊNCIA DO USO DE NUTRIENTES EM PLANTIO DE *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima FERTILIZADO COM FÓSFORO E POTÁSSIO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

### RESUMO

Estudos que tratam do comportamento, desenvolvimento inicial, absorção e eficiência do uso de nutrientes de árvores nativas da Amazônia em função da fertilização são de extrema importância para subsidiar ações de recuperação e manejo de áreas degradadas. Objetivou-se avaliar a influência da fertilização com diferentes níveis de fósforo e potássio no crescimento e eficiência do uso de nutrientes em plantio de *Tachigali vulgaris*. O experimento foi instalado em 2016 na estação experimental da Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Igarapé-Açu/PA. Foram aplicadas três doses de P (0, 65,22; e 130,4 kg ha<sup>-1</sup>) e três doses de K (0, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>), em esquema fatorial 3x3 e delineamento em blocos casualizados. Foram avaliados os parâmetros de crescimento, concentração de nutrientes na biomassa, eficiência do uso de nutrientes (EUN) e coeficiente de uso biológico (CUB). *T. vulgaris* respondeu expressivamente à fertilização com P e K nos parâmetros avaliados, podendo dobrar a produtividade de madeira na idade de três anos. Nas folhas, o N foi o nutriente em maior concentração, seguido de Ca, K, S, Mg e P. O tratamento P130,43K100 se destacou com as maiores concentrações de P para os compartimentos galhos e fuste+casca. O Mg é o nutriente mais eficientemente utilizado nos componentes da biomassa, seguido por P, S, K, Ca e N. A fertilização potássica com 100 kg ha<sup>-1</sup> permite aumentar a EUN<sub>P</sub>, EUN<sub>K</sub> e EUN<sub>Ca</sub> em até 40% ao segundo ano pós-plantio. O aumento das doses de K no povoamento de *T. vulgaris* até 100 kg ha<sup>-1</sup> reduz a EUN<sub>P</sub> até o segundo ano pós-plantio. Os compartimentos lenhosos (galhos e fuste+casca) apresentaram os maiores valores de CUB, algo desejável e de grande interesse para a silvicultura. Resguardando-se as condições de variabilidade genética natural dentro do povoamento, não foi possível constatar uma tendência de crescimento dos valores do CUB em função da fertilização ou ausência dela. Esses resultados sugerem a necessidade de considerar o fator idade do plantio, para que seja possível avaliar a exportação relativa de nutrientes nas colheitas realizadas.

**Palavras-chave:** Coeficiente de uso biológico; Biomassa de parte aérea; Recuperação de áreas degradadas; Florestas energéticas.

## ABSTRACT

Studies dealing with behavior, initial development, absorption and efficiency of nutrient use of Amazonian native trees as a function of fertilization are extremely important to support actions for the recovery and management of degraded areas. The objective of this study was to evaluate the influence of fertilization with different levels of phosphorus and potassium on growth and nutrient use efficiency in *Tachigali vulgaris* L.G.Silva & H.C.Lima plantations. The experiment was installed in 2016 at the experimental station of the Federal Rural University of the Amazon, in the municipality of Igarapé-Açu, Pará state, Brazil. Three doses of P (0.0, 26.7 and 53.5 kg ha<sup>-1</sup>) and three doses of K (0.0, 50.0 and 100.0 kg ha<sup>-1</sup>) were applied in a 3x3 factorial scheme and randomized blocks design. Growth parameters, nutrient concentration in biomass, nutrient use efficiency (EUN) and biological use coefficient (CUB) for the aboveground biomass compartments were evaluated. *T. vulgaris* responded significantly to fertilization with P and K in morphological variables of growth, nutrient concentration in biomass, EUN and CUB, being able to double the wood productivity at the age of three years. In leaves, N was the nutrient in highest concentration, followed by Ca, K, S, Mg and P. The treatment P130.43K100 stood out with the highest concentrations of P for the twigs and stem+bark compartments. The response to P application occurred due to the low availability of this nutrient throughout the soil profile, besides the acidity contributing to P adsorption. Mg is the nutrient most efficiently used in the biomass components, followed by P, S, K, Ca and N. Potassium fertilization with 100 kg ha<sup>-1</sup> allows *T. vulgaris* to increase EUN<sub>P</sub>, EUN<sub>K</sub> and EUN<sub>Ca</sub> by up to 40% in the second year post-planting. Increasing potassium fertilizer doses applied to the *T. vulgaris* stand up to 100 kg ha<sup>-1</sup> reduces EUN<sub>P</sub> by the second year post-planting. The woody compartments of *T. vulgaris* (branches and stem + bark) showed the highest CUB values, something very desirable and of great interest for forestry. Keeping in mind the conditions of natural genetic variability within the stand, it was not possible to observe a tendency of growth of the CUB values as a function of fertilization or lack of it. These results suggest the need to consider the planting age factor, in order to evaluate the relative export of nutrients in the harvests performed.

**Keywords:** Biological use coefficient; Aboveground biomass; Recuperation of degraded areas; Energy forests.

## 6.1 Introdução

Apesar da expansão das áreas desmatadas no Bioma Amazônia, chegando a cerca de 729 mil km<sup>2</sup>, o que corresponde a 17% do seu território, apenas uma pequena porção (0,42%) da área desmatada foi destinada a programas de reflorestamento (GUIMARÃES et al., 2018; INPE, 2018). Entre os fatores que dificultam a implementação de plantios na região amazônica, destaca-se o conhecimento limitado da silvicultura de espécies nativas (WALTERS et al., 2005).

O emprego da flora nativa em reflorestamentos deveria ser implementado, pois aumentaria a diversidade de espécies utilizadas, reduzindo riscos biológicos e econômicos (ERSKINE et al., 2005). Além disso, a maior utilização de espécies nativas em reflorestamentos proporcionaria a reposição da madeira de alto valor comercial oriunda de florestas naturais, maior diversificação biológica e do uso do solo (TONINI et al., 2018), diminuindo assim a pressão sob o ecossistema nativo remanescente (FARIAS et al., 2016). Dessa forma, há a urgência em criar uma lista de espécies potenciais que combinem alta sobrevivência e rápido crescimento para plantações em áreas alteradas na Amazônia (SALOMÃO et al., 2014).

O suprimento adequado de nutrientes pode favorecer diferentes mecanismos de crescimento das plantas, como o desempenho fotossintético, contribuindo efetivamente para o estabelecimento do plantio no campo (SILVA et al., 2006; FERREIRA et al., 2009). A tolerância das plantas a condições limitadas de recursos primários (água, luz e nutrientes), assim como o sucesso no estabelecimento inicial das mesmas sobre áreas degradadas são, em grande parte, determinados pela eficiência no uso destes recursos (FUNK; VITOUSEK, 2007). A melhoria nas condições edáficas pode favorecer as plantas em diversos aspectos, inclusive, no processo fotossintético, melhorando desempenhos de parâmetros fisiológicos ligados à tolerância das plantas com potencial para restauração florestal e, contribuindo para incorporar áreas degradadas aos processos produtivos (FERREIRA et al., 2009).

O fósforo (P) é um dos elementos mais importantes envolvidos na fotossíntese e no crescimento das plantas (POUR et al., 2021), sendo as culturas leguminosas altamente responsivas à adubação fosfatada (CHAUDHARY et al., 2008). Estudos têm relatado que a fertilização com P melhora as taxas fotossintéticas e a produção de biomassa de plantas, principalmente no estágio inicial de crescimento (FERNANDEZ et al., 2000; MELO et

al., 2016; POUR et al., 2021). O potássio (K) atua no metabolismo das plantas promovendo a síntese de lípidos, hidratos de carbono e proteínas (HABERMAN et al., 2019; LIU et al., 2019; MELO et al., 2021), além de regular o movimento estomático (ZORB et al., 2014; RAGEL et al., 2019). Estudos sugerem que as capacidades fotossintéticas das plantas superiores mudam drasticamente em resposta a diferentes fornecimentos de K (WENG et al., 2007; GERARDEAUX et al., 2009).

Há grande evidência de que a eficiência do uso de nutrientes (EUN) pelas plantas varia entre as espécies no mesmo ambiente, entre diferentes condições climáticas numa mesma cultura, entre sítios e estação do ano (TAYLOR; WILLATT, 1983). Neste sentido, estudos que objetivem analisar o comportamento, desenvolvimento inicial, absorção e EUN de árvores nativas em função da fertilização, são de extrema importância para subsidiar ações de recuperação e manejo de áreas degradadas (VALADÃO et al., 2014; REIS et al., 2015), além de que os experimentos poderiam ser replicados para diversas outras espécies florestais nativas da Amazônia.

A influência da EUN no desenvolvimento de plantios florestais foi investigada em estudos recentes que agregaram informações acerca do comportamento ecofisiológico de espécies vegetais nativas (LIMA JR. et al., 2006; LENHARD et al., 2013; VALADÃO et al., 2014; REIS et al., 2015). Entretanto, apesar da concentração foliar de nutrientes e a EUN serem funções vitais para o estabelecimento de uma planta, há pouca informação disponível sobre espécies nativas da Amazônia, principalmente em relação às respostas de desenvolvimento em função da fertilização com P e K.

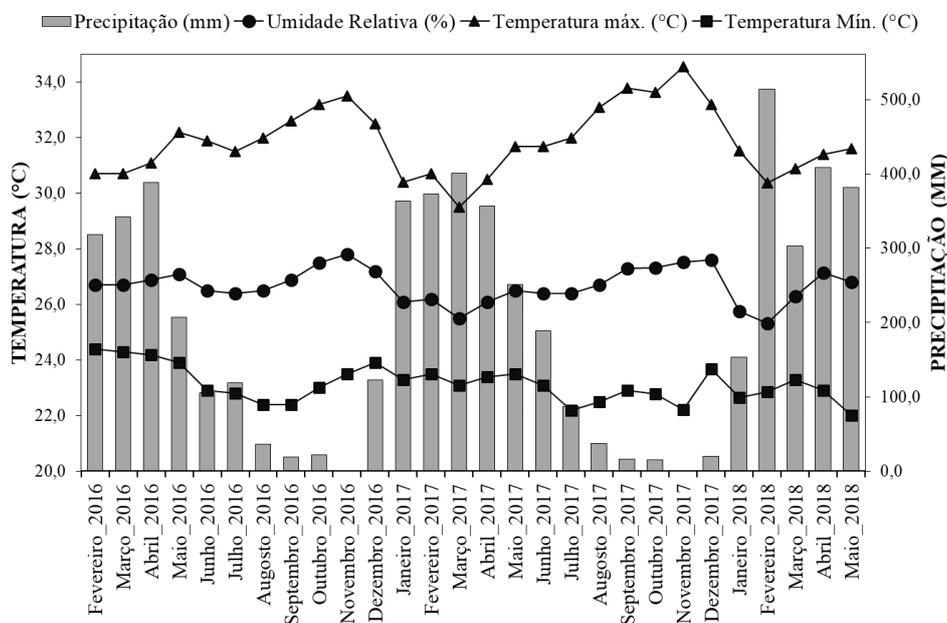
Diante do cenário de desflorestamento na Amazônia e da necessidade de selecionar espécies arbóreas de rápido crescimento, que apresentem bom desempenho em áreas degradadas e iniciem a sucessão secundária, investigou-se a espécie *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima – Fabaceae, que ocorre na região amazônica e em ampla faixa de condições climáticas e edáficas, possuindo importância econômica e ambiental (SILVA et al. 2002; SAPORETTI JUNIOR et al. 2003). É uma espécie pioneira que frequentemente inicia a sucessão secundária em áreas abertas, sendo considerada ideal para o reflorestamento devido à sua alta capacidade de produção de biomassa (FELFILI et al., 1999; FARIAS et al., 2016). De acordo com Freitas et al. (2012), o *T. vulgaris* pode ser indicado para projetos de recuperação de áreas degradadas, tanto para as condições de pleno sol, quanto para 50% de sombreamento das mudas. Silva et al. (2021) indentificaram densidade básica moderada e poder calorífico acima de 7,95

MJ/kg, parâmetros adequados para bioenergia, além de indicarem um grande potencial para melhoramento genético da espécie.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência da fertilização com diferentes níveis de fósforo e potássio no crescimento e eficiência do uso de nutrientes em plantio de *T. vulgaris*.



**Figura 11** - Pluviosidade mensal (mm), umidade relativa do ar (%) e temperaturas (°C) máximas e mínimas mensais, no local do experimento, durante os 12 meses de avaliação.



**Fonte:** Autor (2021).

A área experimental possui relevo plano e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de textura média (266 g kg<sup>-1</sup> de argila) (BASTOS; PACHECO, 1999). Foi realizada a caracterização dos atributos químicos e físicos do solo até 1,2 metro de profundidade (Tabela 11), no Laboratório de Análises de Solos da Embrapa Amazônia Oriental, em Belém-PA.

**Tabela 11** - Atributos químicos e físicos do solo da área experimental (valores médios de cinco locais de coleta).

Profundidade	pH	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup>	H <sup>+</sup> Al <sup>+3</sup>	SB	CTC	P	V	M.O.	Granulometria		
												Areia	Silte	Argila
(cm)	(CaCl <sub>2</sub> )								(mg/dm <sup>3</sup> )	%	%	(g/kg)		
0-20	4,1	0,041	0,2	0,1	0,4	2	5,9	2,34	3	15	1,2	170	140	690
20-40	4	0,021	0,2	0,1	0,6	2,2	4,2	2,52	2	13	0,5	230	80	690
40-60	4	0,01	0,2	0,1	0,6	2,2	4,2	2,51	2	12	0,5	270	130	600
60-80	4,1	0,01	0,2	0,1	0,5	2	4,6	2,31	1	13	0,5	270	150	580
80-100	4,1	0,01	0,2	0,1	0,4	2	5,8	2,31	4	13	0,5	290	150	560
100-120	4,1	0,031	0,2	0,1	0,4	1,8	5,3	2,13	1	16	0,5	370	120	510

$pH$  = potencial hidrogeniônico;  $K^+$  = potássio;  $Ca^{+2}$  = cálcio;  $Mg^+$  = magnésio;  $Al^{+3}$  = alumínio;  $H^+Al^{+3}$  = hidrogênio e alumínio;  $SB$  = soma de bases de porcentagem de saturação por bases;  $CTC$  = capacidade de troca de cátions;  $P$  = fósforo;  $V$  = saturação por bases;  $M.O.$  = matéria orgânica. Os teores de  $K$ ,  $Na$ ,  $Ca$  e  $Mg$ , trocáveis no solo foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e espectrofotometria de chama (RAIJ et al., 2000).

**Fonte:** Autor (2021).

## 6.2.2 Instalação do experimento e delineamento experimental

As sementes de *T. vulgaris* utilizadas para produção das mudas foram obtidas de produtor certificado, colhidas de matrizes localizadas no município de Santarém-PA ( $2^{\circ} 26' 22''S$ ;  $54^{\circ} 11' 55''W$ ) e colocadas para germinar em sementeiras, com areia lavada como substrato.

A espécie apresenta dormência tegumentar, dessa forma, foi realizada a remoção de uma pequena porção do tegumento na extremidade oposta ao eixo embrionário (desponte), para facilitar o processo de embebição da semente e assim dar início a germinação. Após 30 dias do início da germinação, as plântulas foram transplantadas para sacos de mudas de tamanho 15x25cm, com volume de 1,9 dm<sup>3</sup> de solo. Decorridos 8 meses, as mudas atingiram 40 cm de altura, estando aptas ao plantio na área experimental.

Foram aplicadas três doses de P (0, 65,22 e 130,44 kg ha<sup>-1</sup>, com superfosfato triplo) e três doses de K (0, 100 e 200 kg<sup>-1</sup> ha, com cloreto de potássio), bem como suas combinações, em esquema fatorial 3x3 (Tabela 12). As doses dos fertilizantes foram definidas, previamente, de acordo com recomendações para espécies florestais de rápido crescimento em solos argilosos de textura média (ANDRADE, 2004; ARCO-VERDE et al., 2005), sendo realizadas em duas aplicações no decorrer do primeiro ano de cultivo, aos 60 dias e aos 12 meses pós-plantio. As adubações ocorreram nos meses de abril e fevereiro do ano subsequente, períodos favorecidos pelo conteúdo de água no solo em função das chuvas.

A área do plantio foi dividida em 4 blocos, distanciados 5 metros entre si, com objetivo de potencializar o efeito dos tratamentos em cada parcela. Cada bloco foi dividido em 9 parcelas (tratamentos) de 10 m de largura por 8 m de comprimento, contendo 16 plantas no espaçamento de 2 m entre plantas e 3 m entre faixas, totalizando 36 parcelas (Figura 12). A linha externa de cada parcela serviu como bordadura, sendo assim, cada unidade experimental foi formada pelas 4 árvores centrais de cada parcela.

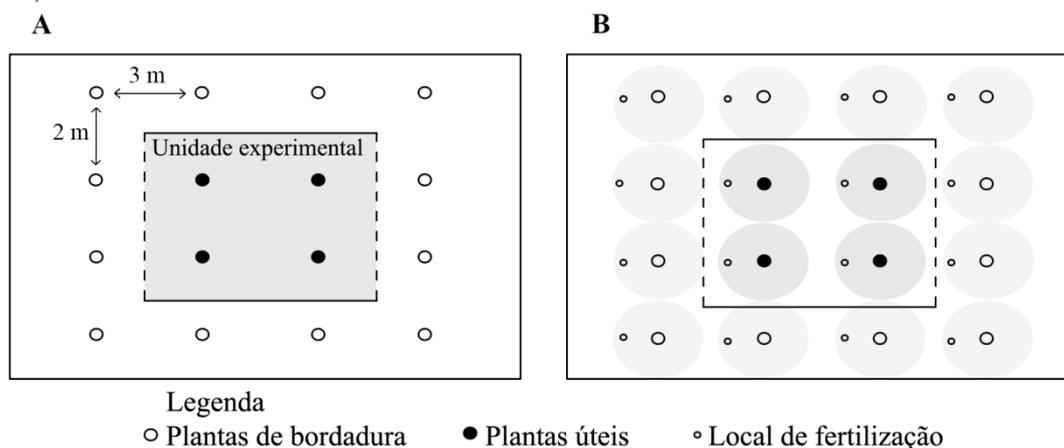
**Tabela 12** - Quantidades de nutrientes (entre parêntesis) e fertilizantes por tratamento, aplicados ao plantio de *T. vulgaris*, município de Igarapé-açu, Pará, Brasil.

Tratamentos	Nutrientes				Fertilizante	
	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Ca	K (K <sub>2</sub> O)	Cl	SFT	KCl
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----				----- kg ha <sup>-1</sup> -----	
Controle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K100	0,0	0,0	(39,1) 50,0	39,0	0,0	100,0
K200	0,0	0,0	(78,2) 100,0	78,0	0,0	200,0
P65,22	(16,6) 26,7	6,5	0,0	0,0	65,2	0,0
P65,22K100	(16,6) 26,7	6,5	(39,1) 50,0	39,0	65,2	100,0
P65,22K200	(16,6) 26,7	6,5	(78,2) 100,0	78,0	65,2	200,0
P130,44	(33,1) 53,5	13,0	0,0	0,0	130,4	0,0
P130,44K100	(33,1) 53,5	13,0	(39,1) 50,0	39,0	130,4	100,0
P130,44K200	(33,1) 53,5	13,0	(78,2) 100,0	78,0	130,4	200,0

SFT: Superfosfato triplo; KCl: Cloreto de potássio

Fonte: Autor (2021).

**Figura 12** - Representação esquemática das parcelas (A) e locais de adubação em coveta lateral (B) para avaliação da resposta de *T. vulgaris* à fertilização com P e K, Igarapé-açu, Pará, Brasil.



Fonte: Autor (2021).

### 6.2.3 Avaliação do crescimento

A avaliação do crescimento em diâmetro e da altura total foi realizada semestralmente aos 6, 12, 18 e 24 meses pós-plantio. Para tal, o diâmetro das plantas foi medido de duas maneiras: no primeiro ano foi mensurado o diâmetro à altura do colo (DAC), no nível do solo, com auxílio de paquímetro digital, em função dos indivíduos não apresentarem altura mínima para medição de DAP; no segundo ano, realizou-se a

mensuração do DAP – diâmetro à altura do peito (à 1,3 m do solo), utilizando fita diamétrica graduada em centímetros. Para obtenção da altura total, utilizou-se régua graduada em centímetros, considerando a inserção do último ramo de folhas.

#### 6.2.4 Análises químicas de tecido vegetal

As amostragens para a determinação da biomassa de parte aérea foram realizadas em todos os tratamentos aos 24 meses pós-plantio, colhendo-se 3 árvores de cada tratamento, preferencialmente localizadas na bordadura interna. A massa fresca total da parte aérea foi subdividida em lenho+casca, galhos (vivos e mortos) e folhas. A massa fresca de cada compartimento foi mensurada em balança com capacidade para 60 kg. Amostras foram acondicionadas em sacos de papel, pesadas em balança semi-analítica e posteriormente levadas à estufa com circulação forçada de ar a 65° C até obtenção de massa constante. Logo, foram pesadas novamente para determinação da umidade (%), com a qual se estimou a massa seca de cada compartimento.

As amostras de tecido vegetal após secagem em estufa foram processadas em moinho e analisadas quimicamente, para determinação das concentrações de N, Ca, Mg, K, Na e P. As análises foram realizadas no Laboratório de Tecido Vegetal da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq/USP). As digestões realizadas foram: Sulfúrica (N) e nitroperclórica (P, K, Ca, Mg e S). Para determinação dos nutrientes em cada compartimento da planta (folhas, galhos e fuste+casca), utilizou-se a colorimetria (P), fotometria de emissão de chama (K), turbidimetria (S), espectrofotometria de absorção atômica (Ca e Mg) e o N total foi determinado pelo método Kjeldhal após digestão sulfúrica, de acordo com metodologia do Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes (EMBRAPA, 2009).

#### 6.2.5 Eficiência do uso de nutrientes (EUN) e coeficiente de uso biológico (CUB)

Diversos índices para estimar a eficiência de uso de recursos (nutrientes, água, luz) já foram propostos, havendo também adaptações na forma de cálculo para um mesmo índice (FAGERIA, 2000). Diante de inúmeras alternativas, foi estimada a EUN,

dividindo-se a biomassa seca da parte aérea (kg) pela quantidade de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) acumulados na parte aérea (kg), conforme Equação 1 (CHAPIN, 1980).

$$EUN = \frac{\text{Biomassa seca da parte aérea (Kg)}}{\text{Nutriente acumulado (Kg)}} \quad (1)$$

A fim de avaliar a taxa de conversão de nutrientes em biomassa ao longo do desenvolvimento do plantio e, conseqüentemente, a exportação relativa de nutrientes por unidade de biomassa em cada compartimento da planta, foi estimado CUB da biomassa de parte aérea (folhas, galhos e fuste+casca), obtido pelo quociente entre a biomassa e o estoque de nutriente no respectivo compartimento, ambos com a mesma unidade (Equação 2), conforme decrito por Barros et al. (1986).

$$CUB = \frac{\text{Biomassa seca do compartimento (Kg)}}{\text{Recurso acumulado (Kg)}} \quad (2)$$

#### 6.2.6 Análises estatísticas

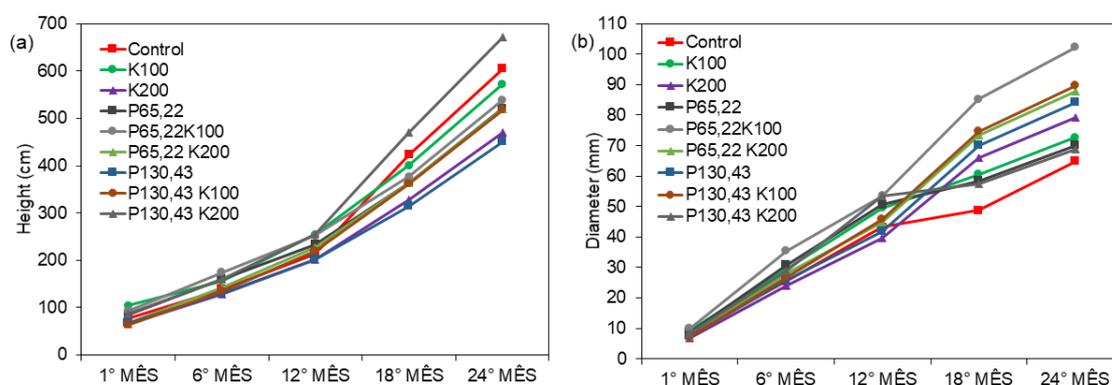
Os dados experimentais foram avaliados quanto à normalidade e homogeneidade de variâncias pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Posteriormente, para as variáveis paramétricas, as médias dos tratamentos foram submetidas a análise de variância e comparações de médias pelo teste de Tukey, utilizando o software estatístico SPSS versão 27.0 (IBM Corp., 2020). Todas as análises foram avaliadas ao nível de 1% de significância.

### 6.3 Resultados

*T. vulgaris* respondeu às fertilizações com doses de P e K ( $p < 0,05$ ), apresentando incremento no crescimento em altura e diâmetro, até os 24 meses pós-plantio (Figuras 13a e 13b). As avaliações permitiram identificar o efeito da fertilização de forma mais evidente a partir dos 12 meses pós-plantio, passada a fase de estabelecimento das plantas.

Após a primeira estação de crescimento, 12 meses pós-plantio, os tratamentos fertilizados propiciaram árvores até 0,41 m (19,2%) mais altas (K100) e cerca de 41,9 mm (97,1%) mais grossas (P65,22K100) em relação ao tratamento-controle. Durante o segundo ano de cultivo, considerando duas estações de crescimento, mesmo aumentando a competição por luz, água e nutrientes entre as árvores após o fechamento do dossel, o incremento em altura e diâmetro das árvores de *T. vulgaris* fertilizadas com o tratamento P130,43K200 foi cerca de 10,6 % maior que o controle, além do diâmetro até 57,5% maior (P65,22K100), elevando a produtividade do plantio em volume de madeira. A fertilização isolada com P ou K não se mostrou vantajosa, apresentando crescimento em altura inferior quando comparada ao tratamento sem fertilização.

**Figura 13** - Crescimento em altura (m) (a) e diâmetro (mm) (b) de *T. vulgaris*, em resposta à fertilização com P e K.



Fonte: Autor (2021).

Pelos resultados obtidos na análise de variância (Tabela 13), foi possível verificar interação significativa ( $p < 0,05$ ) para as concentrações da maioria dos nutrientes entre os componentes da parte aérea, com excessão do compartimento folha, no qual apenas as concentrações de Mg, K e Ca foram significativas para a interação dos fatores. Tais resultados indicam a necessidade de estudar os comportamentos das variáveis considerando-se os fatores em conjunto.

**Tabela 13** - Análise de variância das concentrações dos nutrientes na biomassa de parte aérea (valores F e p), obtidas em plantio de *T. vulgaris* sob fertilização com P e K.

Variáveis	Bloco		Fósforo		Potássio		Fósforo x Potássio	
	F	P (>F)	F	P (>F)	F	P (>F)	F	P (>F)
<b>Folhas</b>								
N	2,207	0,149	1,812	0,183	0,399	0,674	0,588	0,674
P	1,544	0,225	5,174	0,013*	0,982	0,388	2,174	0,1
K	2,073	0,162	9,054	0,001**	3,763	0,037*	2,465	0,005**
Ca	1,632	0,213	12,369	<0,000***	6,054	0,007*	2,636	0,004**
Mg	0,965	0,335	8,74	0,001**	1,894	0,171	4,724	0,005**
S	2,174	0,152	5,792	0,008	0,638	0,536	0,272	0,893
<b>Galhos</b>								
N	0,022	0,885	75,403	<0,000***	142,608	<0,000***	19,23	<0,000***
P	8,936	0,006	84,669	<0,000***	18,973	<0,000***	145,108	<0,000***
K	2,836	0,104	181,726	<0,000***	46,876	<0,000***	82,32	<0,000***
Ca	0,611	0,441	1206,4	<0,000***	42,202	<0,000***	570,134	<0,000***
Mg	0,954	0,338	18,649	<0,000***	29,229	<0,000***	21,13	<0,000***
S	2,146	0,155	28,522	<0,000***	158,671	<0,000***	56,727	<0,000***
<b>Fuste + casca</b>								
N	0,45	0,508	0,241	0,788	2,931	0,071	5,631	0,002**
P	0,36	0,554	0,435	0,652	0,9	0,419	16,127	<0,000***
K	0,057	0,813	5,378	0,011*	24,209	<0,000***	1,987	0,126
Ca	0,564	0,473	1,417	0,261	0,305	0,739	3,996	0,012*
Mg	0,599	0,446	6,941	0,004**	0,313	0,734	5,414	0,003**
S	0,465	0,501	23,343	<0,000***	34,225	<0,000***	11,976	<0,000***

Nutrientes avaliados na biomassa de parte aérea: nitrogênio (N); fósforo (P); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); e enxofre (S). \*, \*\*, \*\*\* implicam em diferenças estatísticas com valores de  $p < .05$ ;  $p < .01$ ; e  $p < .001$ , respectivamente.

**Fonte:** Autor (2021).

Para o compartimento folha, N foi o nutriente em maior concentração, seguido de Ca, K, S, Mg e P (Figura 14). O tratamento controle apresentou a maior média de concentração de N no compartimento galho, chegando a  $6,3 \text{ g kg}^{-1}$ . As plantas submetidas ao tratamento P62,22 obtiveram no compartimento fuste+casca  $6,64 \text{ g kg}^{-1}$  de N, uma diferença de 18,1% para as plantas não fertilizadas.

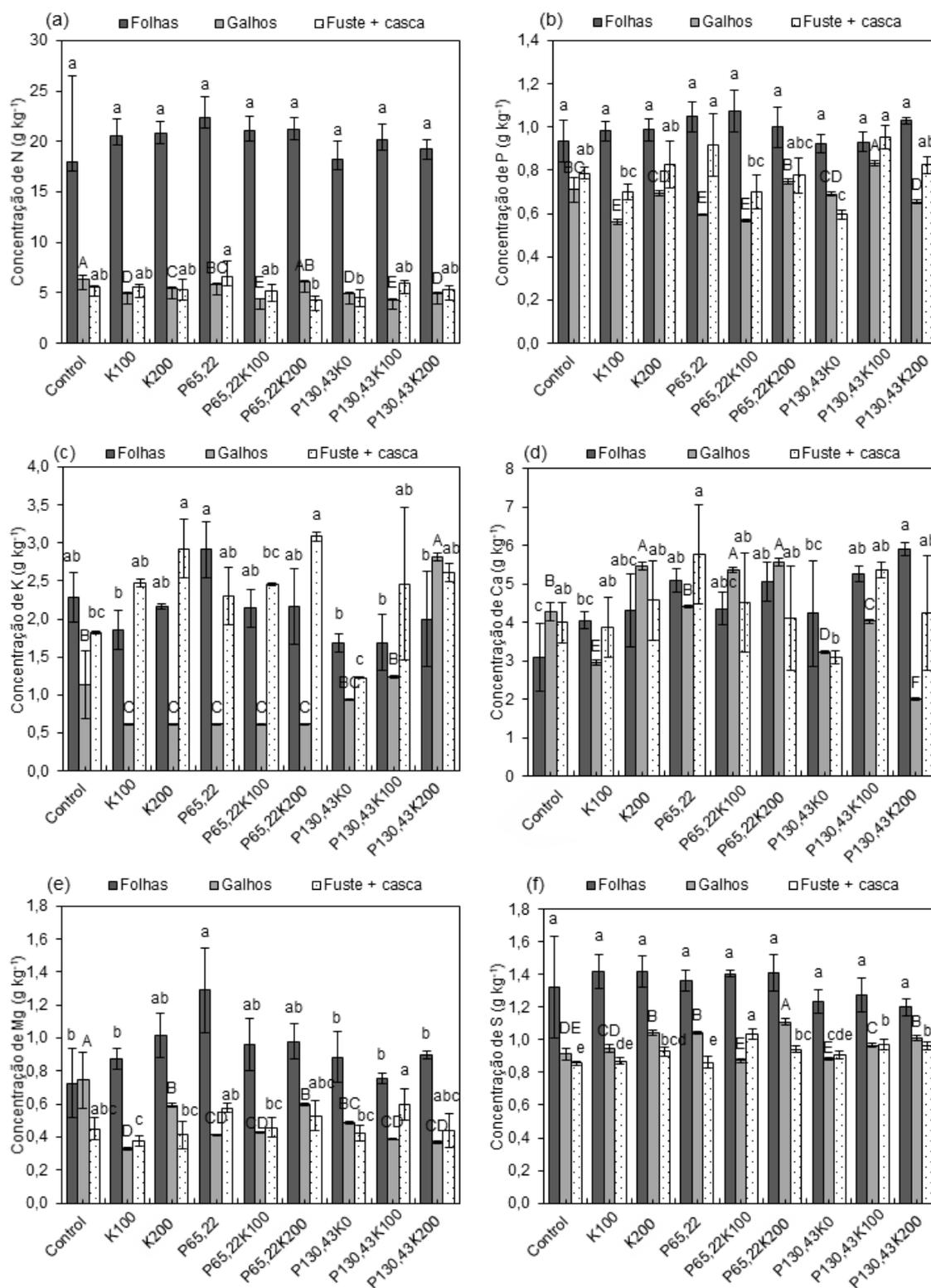
As plantas sob o tratamento P130,43K100 apresentaram as maiores concentrações de P para os compartimentos galhos com  $0,83 \text{ g kg}^{-1}$  e fuste+casca com  $0,95 \text{ g kg}^{-1}$ , representando acréscimos de 17% e 20% em relação ao tratamento controle, respectivamente. Em relação às concentrações de K, foi observado um comportamento

variável dentro dos compartimentos de parte aérea, com destaque nos tratamentos P65,22 para folha ( $2,91 \text{ g kg}^{-1}$ ), P130,44K200 para galhos ( $2,61 \text{ g kg}^{-1}$ ) e P65,22K100 ( $3,08 \text{ g kg}^{-1}$ ) para fuste+casca. As concentrações de Ca nas folhas de plantas fertilizadas foram até 91,5% maiores que o controle, sendo encontrado o valor de  $5,9 \text{ g kg}^{-1}$  no tratamento com as maiores doses de fertilização. As concentrações de Mg e S também foram superiores dentre os compartimentos de parte aérea em plantas fertilizadas. Destacam-se os tratamentos P65,22 com  $1,29 \text{ g kg}^{-1}$  de Mg em folhas, P130,43K100 com  $0,60 \text{ g kg}^{-1}$  de Mg em fuste+casca, P65,22K200 com  $1,11 \text{ g kg}^{-1}$  de S em galhos e P65,22K100 com  $1,06 \text{ g kg}^{-1}$  de S em fuste+casca. Dentre os componentes estudados, os galhos apresentaram para todos os nutrientes os maiores conteúdos. Esse maior conteúdo pode ser atribuído à alta produção da biomassa de galhos em relação à biomassa total, que foi de aproximadamente 44,4 % do total produzido.

Esses resultados demonstram a importância de se deixar na área do plantio os galhos menores que não têm valor comercial, contribuindo para a manutenção da fertilidade do solo, por meio da ciclagem de nutrientes e menor exportação desses elementos. Os componentes lenhosos foram os que mais acumularam nutrientes e, conseqüentemente, a exploração desses componentes provoca grande remoção de nutrientes do solo.

Por meio da análise de variância (Tabela 14), foi possível verificar interação significativa ( $p < 0,05$ ) para a EUN da maioria dos nutrientes avaliados. De modo geral, sob os tratamentos com aplicação de doses de P e K, as plantas apresentaram maiores valores da EUN, quando comparadas com as plantas sem fertilização (Figura 15). Os indivíduos de *T. vulgaris*, sob o tratamento K100, utilizaram de modo mais eficiente a maioria dos nutrientes analisados, apresentando os maiores valores para  $EUN_P$ ,  $EUN_K$  e  $EUN_{Ca}$ , diferindo estatisticamente entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade de erro. A maior eficiência na utilização de Mg e S foi obtida em plantas fertilizadas com os tratamentos P130,43K100 e P130,43, respectivamente. Não houve diferença estatística entre as médias dos tratamentos para  $EUN_N$ , entretanto as plantas fertilizadas com P130,43 apresentaram média 5,4% superior às plantas do tratamento controle.

**Figura 14** - Efeito da fertilização com P e K sobre as concentrações de nutrientes do *T. vulgaris*, nos compartimentos de biomassa da parte aérea. Letras diferentes indicam diferença estatística entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5%.



Fonte: Autor (2021).

**Tabela 14** - Análise de variância da EUN na biomassa de parte aérea (valores F e p), em plantio de *T. vulgaris* sob fertilização com fósforo e potássio.

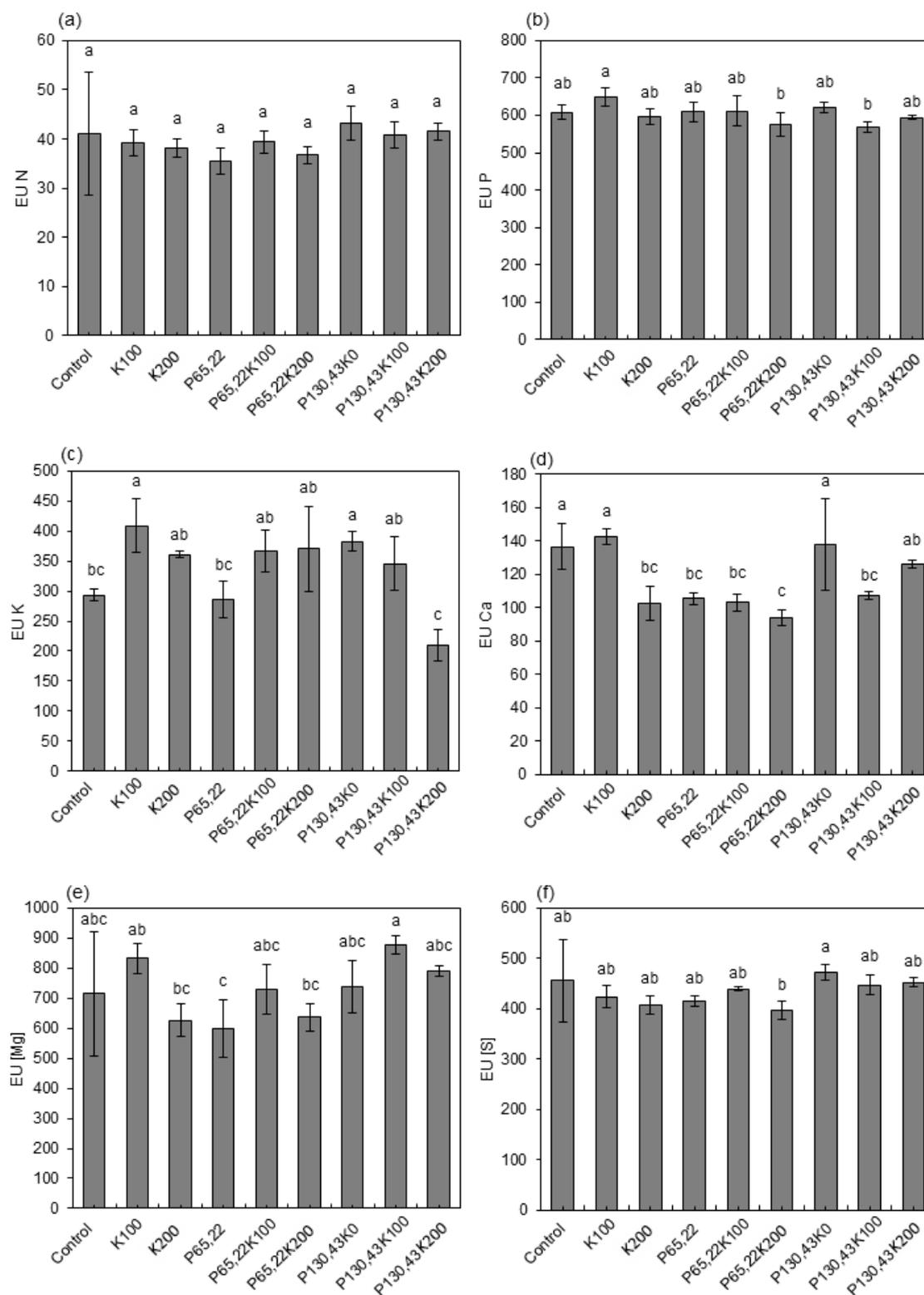
Variáveis	Bloco		Fósforo		Potássio		Fósforo x Potássio	
	F	P (>F)	F	P (>F)	F	P (>F)	F	P (>F)
EU <sub>N</sub>	1,815	0,19	1,043	0,367	0,508	0,608	0,638	0,64
EU <sub>P</sub>	0,102	0,752	3,428	0,048	3,797	0,036	4,812	0,005
EU <sub>K</sub>	0,133	0,718	3,809	0,035	9,028	0,001	14,983	<0,000***
EU <sub>Ca</sub>	3,061	0,092	21,132	<0,000***	8,984	0,001**	7,878	<0,000***
EU <sub>Mg</sub>	0,165	0,688	7,505	0,003**	7,661	0,002**	0,829	0,004**
EU <sub>S</sub>	1,394	0,248	5,427	0,011*	2,72	0,085	1,238	0,003**

EU dos seguintes nutrientes: nitrogênio (N); fósforo (P); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); e enxofre (S). \*, \*\*, \*\*\* implicam em diferenças estatísticas com valores de  $p < .05$ ;  $p < .01$ ; e  $p < .001$ , respectivamente.

**Fonte:** Autor (2021).

Com relação à análise da variância do CUB nos componentes da parte aérea de *T. vulgaris* fertilizado com P e K (Tabela 15), verificou-se interação significativa dos fatores ( $P < 0,05$ ) para todos os nutrientes dos compartimentos galho e fuste+casca, proporcionando um uso diferenciado de nutrientes absorvidos pelo *T. vulgaris*. Os coeficientes de variação foram baixos para alguns nutrientes como N, P, Mg e S, evidenciando precisão experimental. Na figura 16 pode ser observado que, no componente folha, o nutriente que apresentou os maiores valores de CUB foi Mg, no tratamento K100, com 1467,1 seguido do K com 595,9 (P130,43) e Ca com 348,8 (controle). Dentre todos os compartimentos avaliados, o tratamento K100 foi o que apresentou maior CUB entre todos os nutrientes, sendo o CUB<sub>Mg</sub> com 3029,3 (galhos) e 2688,5 (fuste+casca). Entre os nutrientes avaliados, o N foi utilizado com menor eficiência pelas plantas, com o valor máximo de CUB<sub>N</sub> alcançado no tratamento P65,22K200, com 233,4 no componente fuste+casca. No que diz respeito ao CUB<sub>P</sub>, dentre os tratamentos estudados, os maiores valores ocorreram nos tratamentos K100 com 1785,1 e 1677,4 para os componentes galho e fuste+casca, respectivamente. Já o Ca foi o nutriente que, depois do N, as plantas também apresentaram uma baixa eficiência, notadamente no fuste+casca, atingindo 253,8 no tratamento controle. O elevado teor de Ca na casca e a imobilização deste elemento no floema, no qual se encontra na forma de oxalato de cálcio, podem ter contribuído neste resultado.

**Figura 15** - Efeito da fertilização com P e K sobre a EUN do *T. vulgaris* na biomassa da parte aérea. Letras diferentes indicam diferença estatística entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5%.



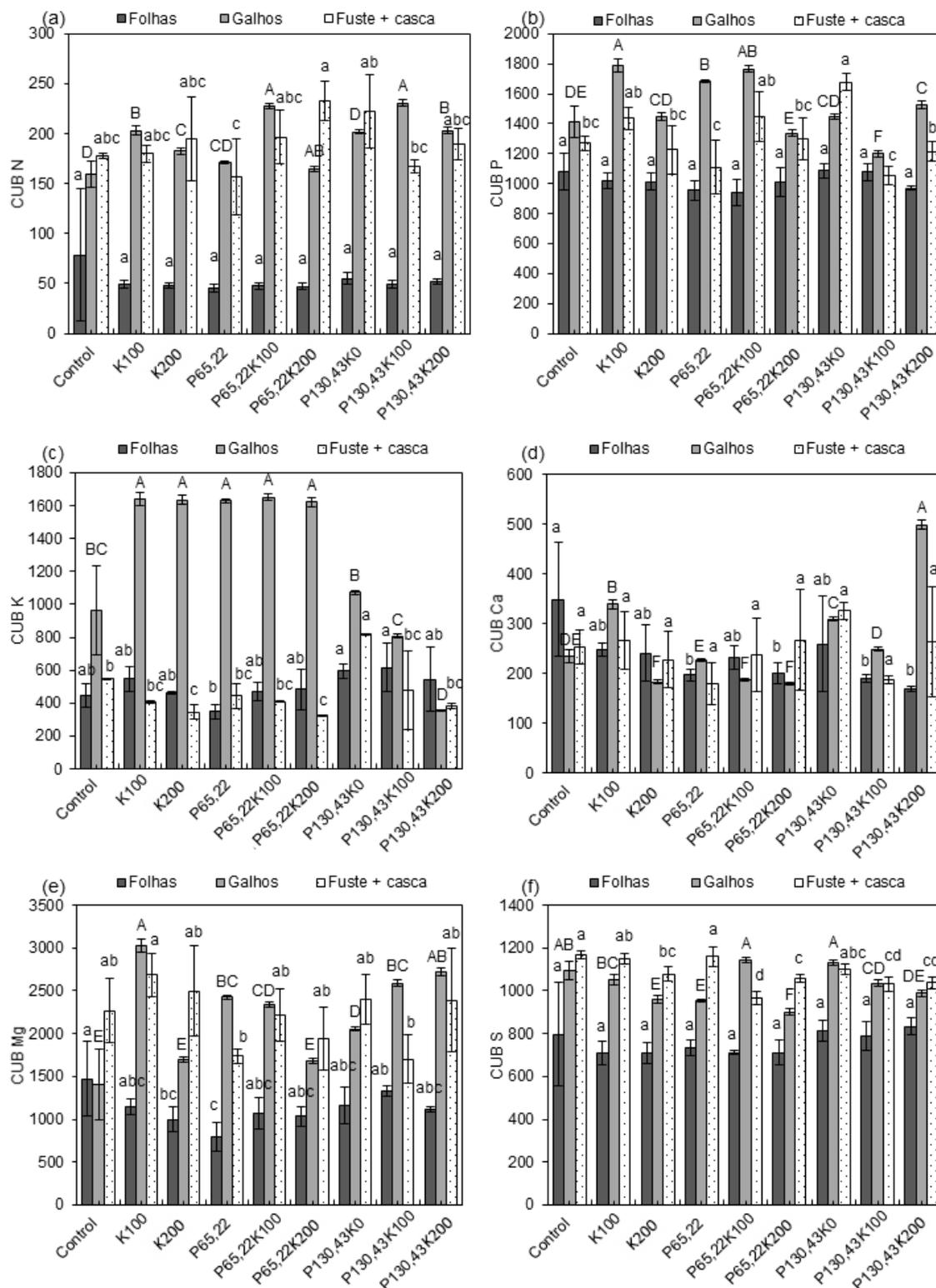
Fonte: Autor (2021).

**Tabela 15** - Análise de variância do CUB da biomassa de parte aérea (valores F e p), para os compartimentos folhas, galhos e fuste+casca, obtidas em plantio de *T. vulgaris* sob fertilização com fósforo e potássio.

Variáveis	Bloco		Fósforo		Potássio		Fósforo x Potássio	
	F	P (>F)	F	P (>F)	F	P (>F)	F	P (>F)
Folhas								
CUB <sub>N</sub>	1,906	0,179	0,869	0,431	0,93	0,407	0,817	0,526
CUB <sub>P</sub>	1,317	0,262	4,304	0,024*	1,147	0,333	2,046	0,117
CUB <sub>K</sub>	0,444	0,511	6,737	0,004**	1,989	0,17	0,921	0,003**
CUB <sub>Ca</sub>	3,903	0,059	7,475	0,003**	4,931	0,015*	2,115	0,004**
CUB <sub>Mg</sub>	0,487	0,491	5,76	0,008**	1,426	0,259	3,934	0,013*
CUB <sub>S</sub>	2,027	0,166	3,569	0,043*	0,754	0,481	0,417	0,795
Galhos								
CUB <sub>N</sub>	0,385	0,54	110,371	<0,000***	234,839	<0,000***	22,551	<0,000***
CUB <sub>P</sub>	9,824	0,004**	104,091	<0,000***	48,718	<0,000***	163,727	<0,000***
CUB <sub>K</sub>	4,128	0,053	331,958	<0,000***	12,01	<0,000***	66,798	<0,000***
CUB <sub>Ca</sub>	1,137	0,296	1771,83	<0,000***	85,593	<0,000***	1117,64	<0,000***
CUB <sub>Mg</sub>	0,29	0,595	25,726	<0,000***	82,644	<0,000***	57,432	<0,000***
CUB <sub>S</sub>	1,738	0,199	20,169	<0,000***	139,225	<0,000***	57,598	<0,000***
Fuste + casca								
CUB <sub>N</sub>	0,016	0,901	0,621	0,545	3,052	0,064	5,216	0,003**
CUB <sub>P</sub>	0,148	0,703	0,223	0,801	2,371	0,113	18,779	<0,000***
CUB <sub>K</sub>	0,033*	0,857	12,123	<0,000***	26,646	<0,000***	4,557	0,006**
CUB <sub>Ca</sub>	0,045	0,834	0,665	0,523	0,475	0,627	3,054	0,034*
CUB <sub>Mg</sub>	0,014*	0,906	5,757	0,009**	0,413	0,666	3,468	0,021*
CUB <sub>S</sub>	0,481	0,494	22,449	<0,000***	34,475	<0,000***	10,904	<0,000***

CUB dos seguintes nutrientes: nitrogênio (N); fósforo (P); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); e enxofre (S). Foram avaliados os compartimentos folha, galhos e fuste+casca. \*, \*\*, \*\*\* implicam em diferenças estatísticas com valores de  $p < .05$ ;  $p < .01$ ; e  $p < .001$ , respectivamente.

**Figura 16** - Efeito da fertilização com P e K sobre o CUB do *T. vulgaris*, nos compartimentos de biomassa da parte aérea (folhas, galhos e fuste+casca). Letras diferentes indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5%.



Fonte: Autor (2021).

## 6.4 Discussão

### 6.4.1 Crescimento

Os incrementos médios anuais observados nos primeiros 12 meses (3,8 cm de diâmetro e 1,5 m de altura) e posteriormente na segunda estação de crescimento, até os 24 meses (3,3 cm de diâmetro e 3,1 m de altura), estão dentro da amplitude dos resultados de outros trabalhos com *T. vulgaris* em diferentes regiões do Brasil, em que foram observadas variações de 1,1 m a 3,1 m (altura) e 1,2 a 3,4 cm (diâmetro) (TONINI et al., 2006; MARTINOTO et al., 2012; TONINI et al., 2018). O maior incremento médio anual observado a partir dos 12 meses pós-plantio é justificado pela maior eficiência das árvores na captura e utilização de recursos primários, tais como água, CO<sub>2</sub>, luz e nutrientes (BINKLEY et al. 2017). Schwerz et al. (2019) relataram melhor eficiência de crescimento de *Acacia mearnsii* De Wild. relacionada ao adensamento das copas e consequente maior quantidade de radiação interceptada, o que permite uma taxa fotossintética mais elevada e, conseqüentemente, maior eficiência de utilização da radiação para aumentar a biomassa florestal.

Apesar da variabilidade observada nas variáveis dendrométricas dentro dos tratamentos, o que é atribuído em parte ao fator não-clonal dos indivíduos de *T. vulgaris* que foram estabelecidos por sementes nativas, é possível verificar a influência da fertilização no crescimento em altura e diâmetro, notadamente nos tratamentos K100 e P65,22K100 (Figura 13). Tal variação também foi observada em investigações realizadas por Farias et al. (2016) e Silva et al. (2021), em plantios de *T. vulgaris* provenientes de sementes sem seleção. Diversos estudos com aplicação de doses de K em plantios florestais verificaram incrementos nos valores totais de biomassa e crescimento superior em comparação a plantas sem fertilização (CHRISTINA et al., 2015; BASSACO et al., 2018; GAZOLA et al., 2019).

### 6.4.2 Concentração de nutrientes na biomassa da parte aérea

Nas folhas, o N foi o nutriente em maior concentração, seguido de Ca, K, S, Mg e P (Figura 14). Resultados semelhantes também foram encontrados por Alves et al. (2017), em que o N foi o nutriente mais acumulado nas folhas, seguindo de K, Ca, Mg, P e S, avaliando as espécies *Poincianella bracteosa* (TUL.) L.P. Queiroz, *Mimosa*

*ophthalmocentra* Mart. ex Benth., *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill., *Pityrocarpa moniliformis* (Benth.) Luckow & R.W. Jobson e *Thiloa glaucocarpa* (Mart.) Eichler. Em função da alta variabilidade das concentrações de N nesse compartimento, não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos. Entretanto, a maior média foi encontrada no tratamento P65,22 com 22,36 g kg<sup>-1</sup> de N. No compartimento fuste+casca, houve um acréscimo de 18,1% da concentração de N no tratamento P65,22 em comparação ao controle. Em geral, as espécies leguminosas são altamente responsivas à adubação fosfatada, particularmente em solos onde há baixa disponibilidade do nutriente, sendo que a complementação nutricional com P favorece a produção de folhas e nódulos, otimizando a eficiência fotossintética e a fixação biológica do N atmosférico (CHUADHARY et al., 2008).

A concentração de nutrientes em valores absolutos nos galhos foi grande, considerando-se a biomassa relativa desse componente. Em média, esse compartimento representou 52% da biomassa aérea total de *T. vulgaris*. No entanto, foi o segundo principal componente em concentração de nutrientes, principalmente, devido ao elevado conteúdo de Ca, que representa aproximadamente 20% do seu conteúdo nutricional, ficando atrás somente do N. O tratamento P130,43K100 se destacou com as maiores concentrações de P para os compartimentos galhos e fuste+casca. Os resultados do presente trabalho são semelhantes aos encontrados por Zhao et al. (2015), de 0,99 e 1,74 g kg<sup>-1</sup> de P em plantas de *Erythrophleum fordii* Oliv., que é da mesma família do *T. vulgaris* e por Campelo et al. (2018) em plantas adultas de *Swietenia macrophylla* King. Diversos autores ressaltam a importância do P na fase inicial do crescimento de espécies florestais de rápido crescimento (MAEDA; BOGNOLA, 2012; STAHL et al. 2013; DIAS et al. 2014). A resposta à aplicação P era esperada devido à baixa disponibilidade deste nutriente em todo o perfil do solo, além da acidez contribuir para adsorção de P, favorecendo a disponibilidade do nutriente mediante a fertilização, conforme ocorreu no tratamento em questão

As concentrações de K, que atingiram o valor máximo de 3,08 g kg<sup>-1</sup> no compartimento fuste+casca com o tratamento P65,22K200, foram consideradas baixas em relação a outras espécies florestais, como *Handroanthus serratifolius* Vahl. (>10 g kg<sup>-1</sup>), *Handroanthus impetiginosa* (Mart.) Matos (>6 g kg<sup>-1</sup>), *S. macrophylla* (>8 g kg<sup>-1</sup>) (CAMPELO et al., 2018) e *E. fordii* (4,29 g kg<sup>-1</sup>) (ZHAO et al., 2015). Compreende-se como uma condição da própria espécie as baixas concentrações de K encontrados, pois

não foram observados sintomas de estresse hídrico em todo período de avaliação que precedeu o abate das árvores, além do K não formar compostos orgânicos na planta, tornando-o um nutriente de alta mobilidade nos tecidos.

Os tratamentos P130,43K200 e P65,22 resultaram em concentrações de Ca e Mg nas folhas até 91,5% e 76% maiores que o tratamento controle, respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Rangel-Vasconcelos et al. (2016), em que o estoque de Ca foi aproximadamente 132% superior na biomassa aérea do *T. vulgaris* fertilizado com P em detrimento às plantas sem adubação, além do estoque de Mg, que foi até 94% superior. A faixa de resultados das concentrações de nutrientes encontradas neste estudo é comparável aos verificados na literatura para outras espécies leguminosas arbóreas (QUEIROZ et al., 2007).

A quantidade de nutrientes nos diferentes compartimentos das árvores, em regra, não acompanha a distribuição de biomassa devido à diferença na concentração de nutrientes dentro dos compartimentos da árvore. Segundo Bellote e Silva (2004), a concentração de nutrientes nos componentes da biomassa está relacionada com suas funções, apresentando, geralmente, o seguinte gradiente: folha > casca > ramo > tronco (alburno > cerne). A folha é o grande centro metabólico da planta, o que fica evidente pelo predomínio dos teores mais elevados de nutrientes (MARSCHNER, 1995). Por outro lado, os teores mais baixos estão associados a componentes que têm função mais estrutural ou de condução, como é o caso da madeira e dos galhos (BINKLEY, 1986). A partição de biomassa sofre forte controle genético, entretanto, pode variar nas diferentes fases de crescimento das árvores, além da influência das condições de desenvolvimento, como a densidade de plantio (SCHUMACHER et al., 2019).

#### 6.4.3 Eficiência do uso de nutrientes - EUN

Em relação à EUN, o Mg é o nutriente mais eficientemente utilizado nos componentes da biomassa, seguido pelo P, S, K, Ca e N. A variação na EUN pode estar vinculada às características de cada espécie; a não obtenção do equilíbrio nutricional ótimo ou crítico entre solo - planta e todos os demais nutrientes, podendo ocorrer limitação ou excesso de um ou mais nutrientes disponíveis; e às relações hídricas (SANTANA et al., 2002; VIERA et al., 2015). A alta eficiência apresentada por uma espécie na utilização de nutrientes implica que ela tenha menor exigência nutricional,

sendo, portanto, um parâmetro de grande utilidade na seleção de espécies a serem utilizadas nos plantios, principalmente em solos de baixa fertilidade natural (SILVA et al., 1983; VIERA et al., 2015). Dessa forma, a utilização de técnicas de manejo que optem por plantas mais eficientes em utilizar nutrientes é importante para manter a capacidade produtiva do sítio florestal (SANTANA et al., 2002).

O tratamento K100 promoveu os maiores valores de  $EUN_P$ ,  $EUN_K$  e  $EUN_{Ca}$ , e a maior eficiência na utilização de Mg e S foi obtida em plantas fertilizadas com os tratamentos P130,43K100 e P130,43, respectivamente. Apesar de terem sido observados maiores teores foliares de P no tratamento com aplicação de fosfato (P130,43K100), *T. vulgaris* utilizou de forma mais eficiente este elemento no tratamento K100, o que evidencia, de certa forma, que o P não é limitante para o bom desempenho desta espécie em áreas de baixa fertilidade. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2006), avaliando a aplicação de fosfato em espécies pioneiras (*Vismia japurensis* Reichardt, *Bellucia grossularioides* (L.) Triana e *Laetia procera* (Poepp.) Eichler) crescidas em pastagens degradadas na Amazônia central. Avaliando plantas jovens de *Euterpe edulis* Mart., Illenseer e Paulilo (2002) verificaram que a eficiência na utilização do fósforo foi maior com o aumento da irradiância, mas não foi influenciada pelos níveis de fósforo aplicados. Safou-Matondo et al. (2005) observaram baixa eficiência de utilização de P por híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* como resultado da disponibilidade relativamente elevada de P no solo no local de cultivo, demonstrado pela falta de resposta das árvores à entrada de P.

A elevada EUN das árvores amostradas demonstra que a espécie é particularmente eficiente para produzir grandes quantidades de madeira, apesar da baixa disponibilidade de nutrientes no sítio. Assim, a EUN pode ser um índice relevante para integrar as estratégias de seleção de espécies, uma vez que este parâmetro fornece uma indicação das quantidades de nutrientes exportados na colheita. Consequentemente, o produtor passa a ter subsídios para planejar as entradas de fertilizantes necessárias para assegurar um rendimento satisfatório do plantio. Estes resultados sugerem que o *T. vulgaris* apresenta estratégias diferenciadas quanto ao acúmulo e utilização dos nutrientes, e que nem sempre o maior acúmulo de determinado nutriente significa uma maior EUN.

#### 6.4.4 Coeficiente de uso biológico - CUB

Os compartimentos lenhosos (galhos e fuste+casca) apresentaram os maiores valores de CUB, algo bastante desejável e de grande interesse para a silvicultura (VIERA et al., 2015). Nas folhas, estão os menores valores do CUB, com exceção do  $CUB_{Ca}$ , em que os valores foram equivalentes aos demais componentes da biomassa aérea, indicando a importância da manutenção destes componentes no solo após a colheita.

Não obstante, resguardando-se as condições de variabilidade genética natural dentro do povoamento, não foi possível constatar uma tendência de crescimento dos valores do CUB em função da fertilização ou ausência dela. Esses resultados sugerem a necessidade de uma maior amostragem, considerando o fator idade do plantio, para que seja possível avaliar a exportação relativa de nutrientes nas colheitas realizadas. Schumacher et al. (2019) constataram uma tendência crescente dos valores do CUB em função da idade em povoamentos de *Eucalyptus* spp., indicando maior exportação de nutrientes em povoamentos jovens.

O estoque de nutrientes na biomassa florestal tende a apresentar um comportamento assintótico em idades avançadas, alcançando um estado de equilíbrio (WARING; SCHLESINGER, 1985; SCHUMACHER et al., 2019). A ciclagem bioquímica desloca nutrientes de tecidos senescentes para regiões com maior atividade metabólica (PALLARDY, 2008), o que é especialmente importante nos tecidos lenhosos, na transformação de alburno em cerne (SCHUMACHER et al., 2019). Dentre todos os compartimentos de biomassa da parte aérea, o tratamento K100 foi o que apresentou maior CUB entre todos os nutrientes, sendo o  $CUB_{Mg}$  com 3029,3 (galhos), 2688,5 (fuste+casca) e 1467,1 (folhas).

Entre os nutrientes avaliados, o N foi utilizado com menor eficiência pelas plantas, com o valor máximo de  $CUB_N$  alcançado no tratamento P65,22K200, com 233,4 no componente fuste+casca. Alves et al. (2017) também encontraram menor  $CUB_N$  dentre todos os nutrientes, avaliando as espécies *Poincianella bracteosa*, *Mimosa ophthalmocentra*, *Aspidosperma pyriformis*, *Cnidocolus quercifolius* e *Anadenanthera colubrina*.

No que diz respeito ao  $CUB_P$ , os maiores valores ocorreram nos tratamentos K100 com 1785,1 e 1677,4 para os componentes galho e fuste+casca, respectivamente. Para

fins de comparação, os valores críticos de CUB definidos para produção de biomassa do tronco de eucalipto são: P = 12000, K = 1000, Ca = 600 e Mg = 3000 kg de biomassa de tronco por kg de nutriente (BARROS et al., 1995; NOVAIS et al., 2007). Lafetá et al. (2021), avaliando *Eucalyptus grandis* × *E. camaldulensis* em diferentes espaçamentos de plantio, obtiveram amplitude de variação do CUB<sub>P</sub> de 7573 a 10450, CUB<sub>K</sub> de 948 a 1089, CUB<sub>Ca</sub> de 657 a 894 e o CUB<sub>Mg</sub> de 4807 a 6118.

Na análise de todos os componentes de maneira geral, verificou-se uma ampla variação nos resultados dos CUBs entre os tratamentos de fertilização, sendo essa variação resultante de diversos fatores, como as características genéticas da espécie; a não obtenção do equilíbrio nutricional ótimo ou crítico entre solo, planta e todos os nutrientes, ou seja, pode ter ocorrido limitação de um ou mais nutrientes disponíveis e as relações hídricas. A retranslocação dos nutrientes de tecidos em senescência para regiões da planta com maior atividade metabólica é uma importante estratégia para aumentar a eficiência de utilização dos nutrientes com alta mobilidade no tecido vegetal, e reduzir as saídas no processo de deposição de serapilheira (POGGIANI; SCHUMACHER, 2004).

## 6.5 Conclusão

A fertilização com 65,22 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato triplo e 200 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio foi eficiente para aumentar em 11,1% o incremento em altura considerando os 24 meses de avaliação, em comparação às plantas não fertilizadas.

O Mg é o nutriente mais eficientemente utilizado nos componentes da biomassa do *T. vulgaris*, seguido pelo P, S, K, Ca e N.

Os compartimentos lenhosos do *T. vulgaris* apresentaram os maiores valores de CUB, algo bastante desejável e de grande interesse para a silvicultura.

## REFERÊNCIAS

ALVES, A. R.; FERREIRA, R. L. C.; SILVA, J. A. A. da; DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; OSAJIMA, J. A. HOLANDA, A. C. de. Conteúdo de nutrientes na biomassa e eficiência nutricional em espécies da caatinga. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 377-390, 2017.

ANDRADE, L. R. M. Corretivos e fertilizantes para culturas perenes e semiperenes. In: SOUSA, D. M. & LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, cap. 13, p. 317-366, 2004.

ARCO-VERDE, M. F.; TONINI, H.; MOURÃO Jr., M. A silvicultura nas savanas de Roraima. In: BARBOSA, R. I.; XAUD, H. A. M.; SOUZA, J. M. C. (Ed.) **Savanas de Roraima: Etnoecologia, Biodiversidade e Potencialidades Agrossilvipastoris**. Boa Vista: FEMACT, cap. 13, p. 195-200, 2005.

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. de; TEIXEIRA, J. L.; FERNANDES FILHO, E. I. NUTRICALC 2.0: sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. **Bosque (Valdivia)**, v. 16, n. 1, p. 129-131, 1995.

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; CARMO, D. N.; NEVES, J. C. L. Classificação nutricional de sítios florestais: descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, v. 10, n. 2, p. 112-120, 1986.

BASSACO, M. V. M.; MOTTA, A. C. V.; PAULETTI, V.; PRIOR, S. A.; NISGOSKI, S.; FERREIRA, C. F. Nitrogen, phosphorus, and potassium requirements for *Eucalyptus urograndis* plantations in southern Brazil. **New Forests**, v. 49, p. 681–697, 2018.

BASTOS, T. X.; PACHECO, N. A. **Características agroclimáticas de Igarapé Açu, PA e suas implicações para as culturas anuais: feijão caupi, milho, arroz e mandioca**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. Sampling techniques and nutritional evaluations in eucalypt plantations. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Forest nutrition and fertilization**. 2nd ed. Translation: Ken McNabb; Piracicaba: IPEF, p. 113-139, 2004.

BINKLEY, D. **Forest nutrition management**. New York: John Wiley & Sons, 290p, 1986.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, I.; STAPE, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. 1, p. 271–283, 2017.

CAMPELO, D. de H.; LACERDA, C.F. de; SOUSA, J. A. de; BEZERRA, A. M. E.; ARAÚJO, J. D. M.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C. Características morfofisiológicas foliares e estado nutricional de seis espécies lenhosas em função da disponibilidade de água no solo. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 924-936, 2018.

CHAPIN, F. S. The mineral nutrition of wild plants. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v.11, p.233-60,1980.

CHAUDHARY, M. I.; ADU-GYAMFI, J.; SANEOKA, H. NGUYEN, T. N.; The effect of phosphorus deficiency on nutrient uptake, nitrogen fixation and photosynthetic rate in mashbean, mungbean and soybean. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 30, n. 4, p. 537-544, 2008.

CHRISTINA M.; LE MAIRE, G.; BATTIE-LACLAU, P.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J-P.; JOURDAN, C.; GONÇALVES, J. L. M.; LACLAU, J-P. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Global Changes Biology**, v. 21, p. 2022-2039, 2015.

COSTA, C.F.G. da; FIGUEIREDO, R. de O.; OLIVEIRA, F. de A.; SANTOS, I. P. de O. Escoamento superficial em Latossolo Amarelo distrofico tipico sob diferentes agroecossistemas no nordeste paraense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, pp.162-169, 2013.

DIAS, L. P. R.; GATIBONI, L. C.; ERNANI, P. R.; MIQUELLUTI, D. J.; CHAVES, D. M.; BRUNETTO, G. Partial substitution of soluble phosphate by rock phosphate in the planting of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus dunnii* in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 516–523, 2014.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes** / editor técnico, Fábio Cesar da Silva. - 2. ed. rev. ampl. - Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 627p, 2009.

ERSKINE, P. D.; LAMB, D.; BORSCHMANN, G. Growth performance and management of a mixed rainforest tree plantation. **New Forests**, v. 9, p. 117-234, 2005.

FARIAS, J. de; MARIMON, B.S.; SILVA, L. de C.R.; PETTER, F.A.; ANDRADE, F.R.; MORANDI, P.S.; MARIMON-JUNIOR, B.H. Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 368, p.173–182, 2016.

FELFILI, J. M.; SILVA JÚNIOR, M. C. Distribuição dos diâmetros numa faixa de Cerrado na fazenda Água Limpa (FAL) em Brasília - DF. **Acta Botânica**, v. 2, n. 1-2, p. 85-104, 1999.

FERNANDEZ, J. Q. P.; DIAS, L. E.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; MORAES, E. J. Productivity of *Eucalyptus camaldulensis* affected by rate and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian oxisol. **Forest Ecology and Management**, v. 127, p. 93–102, 2000.

FERREIRA, M. J.; GONÇALVES, J. F.; FERRAZ, J. B. S. Photosynthetic parameters of young Brazil nut (*Bertholletia excelsa* H. B.) plants subjected to fertilization in a degraded area in Central Amazonia. **Photosynthetica**, v. 47, n. 4, p. 616-620, 2009.

FREITAS, G. A.; VAZ-DE-MELO, A.; PEREIRA, M. A. B.; ANDRADE, C. A. O.; LUCENA, G. N.; SILVA, R. R. Influência do sombreamento na qualidade de mudas de *Sclerolobium paniculatum* Vogel para recuperação de área degradada. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 2, p. 5-12, 2012.

FUNK, J. L.; VITOUSEK, P. M. Resource-use efficiency and plant invasion in low-resource systems. **Nature**, v. 446, n. 7139, p. 1079- 1081, 2007.

GAZOLA, R. de N.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, R. C. M.; GAZOLA, R. P. D.; CELESTRINO, T. de S.; SILVA, A. C. da; SILVA, P. H. M. da. Potassium Fertilization of *Eucalyptus* in an Entisol in Low-Elevation Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. 1-17, 2019.

GERARDEAUX, E.; SAUR, E.; CONSTANTIN, J.; PORTÉ, A.; JORDAN-MEILLE, L. Effect of carbon assimilation on dry weight production and partitioning during vegetative growth. **Plant Soil**, v. 324, p. 329-343, 2009.

GUIMARÃES, Z. T. M.; SANTOS, V. A. H. F. DOS; NOGUEIRA, V. L. P.; MARTINS, N. O. DE A.; FERREIRA, M. J. Leaf traits explaining the growth of tree species planted in a Central Amazonian disturbed área. **Forest Ecology and Management**, v. 430, p. 618–628, 2018.

HABERMAN, A., DAG, A., SHTERN, N., ZIPORI, I., EREL, R., BEN-GAL, A., YERMIYAHU, U. Long-term impact of potassium fertilization on soil and productivity in intensive olive cultivation. **Agronomy**, v. 9, p. 1–14, 2019.

HOHNWALD, H.; KATO, O. R.; WALENTOWSKI, H. Accelerating Capoeira Regeneration on Degraded Pastures in the Northeastern Amazon by the Use of Pigs or Cattle. **Sustainability**, v. 11, p. 1-16, 2009.

ILLENSEER, R.; PAULILO, M. T. S. Crescimento e eficiência na utilização de nutrientes em plantas jovens de *Euterpe edulis* Mart. sob dois níveis de irradiância, nitrogênio e fósforo. **Acta Botânica Brasileira**, v. 16, n. 4, p. 385-394, 2002.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2018. Monitoramento da floresta amazônica por satélite, Projeto PRODES. <http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes/> (acesso em 05 fev. 2021).

LAFETÁ, B. O.; SANTANA, R. C.; NOGUEIRA, G. S.; PENIDO, T. M. A.; OLIVEIRA, L. F. R. de; VIEIRA, D. dos S. Biomassa e coeficiente de utilização biológico de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* × *E. camaldulensis* em diferentes espaçamentos de plantio. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, e3378, 2021.

LENHARD, N. R.; PAIVA NETO, V. B.; SCALON, S. D. P. Q.; ALVARENGA, A. A. Crescimento de mudas de pau-ferro sob diferentes níveis de sombreamento. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 2, p. 178-186, 2013.

LIMA JR., É. C.; ALVARENGA, A. A.; CASTRO, E. M.; VIEIRA, C. V.; BARBOSA, J. P. R. A. D. Aspectos fisiológicos de plantas jovens de *Cupania vernalis* Camb. submetidas a diferentes níveis de sombreamento. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 33-41, 2006.

LIU, J., HU, T., FENG, P., WANG, L., YANG, S. Tomato yield and water use efficiency change with various soil moisture and potassium levels during different growth stages. **PLoS One**, v. 14, p. 1–14, 2019.

MAEDA, S.; BOGNOLA, I. A. Influence of lime and phosphorus in initial growth of eucalyptus and in P critical level. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 72, p.401–407, 2012.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 889p, 1995.

MARTINOTO, F.; MARTINOTTO, C.; COELHO, M. de F. B.; AZEVEDO, R. A. L.; ALBUQUERQUE, M. C. de F. Sobrevivência e crescimento inicial de espécies nativas do cerrado em consórcio com a mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 1, pp. 22-29, 2012.

MELO, E. A. S. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ROCHA, J. H. T.; HAKAMADA, R. E.; BAZANI, J. H.; WENZEL, A. V. A.; ARTHUR, J. C., JR.; BORGES, J. S.; MALHEIROS, R.; LEMOS, C. C. Z.; FERREIRA, E. V. O.; FERRAZ, A. D. V. Responses of Clonal Eucalypt Plantations to N, P and K Fertilizer Application in Different Edaphoclimatic Conditions. **Forests**, v. 7, n. 2, p. 1-15, 2016.

MELO, E. N. de; SOUTO, A. G. de L.; CAVALCANTE, L. F.; DINIZ, B. L. M. T.; CAVALCANTE, I. H. L.; FERREIRA FILHO, R. M.; SILVA, M. R. M. da; OLIVEIRA, C. J. A.; MELO, P. A. F. R. de. Leaf mineral composition and noni fruit production under vegetal mulching and potassium fertilization. **Scientia Horticulturae**, v. 281, p. 109990, 2021.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo (1. ed.)**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1017p, 2007.

PALLARDY, S. **Physiology of woody plants**. San Diego: Academic Press, 454p, 2008. POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M. V. Nutrient cycling in native forests. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Forest nutrition and fertilization**. 2nd ed. Translation: Ken McNabb; Piracicaba: IPEF, p. 287-305, 2004.

POUR, A. P.; FARAHBAKHS, H.; TOHIDINEJAD, E. Nitrogen, phosphorous and potassium levels affected growth indices, leaf gas exchange parameters and biomass production of henna (*Lawsonia inermis* L.) ecotypes. **Industrial Crops and Products**, v. 163, p. 113297, 2021.

QUEIROZ, L. R.; COELHO, F. C.; BARROSO, D. G.; QUEIROZ, V. A. V. Avaliação da produtividade de fitomassa e acúmulo de N P e K em leguminosas arbóreas no sistema em aléias, em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Árvore**, v. 31, p. 383-390, 2007.

RAGEL, P.; RADDATZ, N.; LEIDI, E. O.; QUINTERO, F. J.; PARDO, J. M. Regulation of K<sup>+</sup> nutrition in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1–21, 2019.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 285p, 2000.

RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; KATO, O. R.; VASCONCELOS, S. S.; OLIVEIRA, F. DE A. Acúmulo de biomassa e nutrientes de duas leguminosas arbóreas introduzidas em sistema de pousio na Amazônia. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 3, p. 735-746, 2016.

REIS, S. M.; MARIMON JR., B. H.; MORANDI, P. S.; OLIVEIRA-SANTOS, C.; OLIVEIRA, B.; MARIMON, B. S. Desenvolvimento inicial e qualidade de mudas de *Copaifera langsdorffii* Desf. sob diferentes níveis de sombreamento. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 11-20, 2016.

REIS, S. M.; MORANDI, P. S.; OLIVEIRA, B.; OLIVEIRA, E. A. de; VALADÃO, M. B. X.; MARIMON, B. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H. Influência do sombreamento no desenvolvimento inicial e eficiência no uso de nutrientes de *Dilodendron bipinnatum* Radkl (Sapindaceae). **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 581-590, 2015.

SAFOU-MATONDO, R.; DELEPORTE, P.; LACLAU, J. P.; BOUILLET, J. P. Hybrid and clonal variability of nutrient content and nutrient use efficiency in *Eucalyptus* stands in Congo. **Forest Ecology and Management**, v. 210, p. 193–204, 2005.

SALOMÃO, R. P.; BRIENZA JUNIOR, S.; ROSA, N. A. Dinâmica de reflorestamento em áreas de restauração após mineração em unidade de conservação na Amazônia. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 1–24, 2014.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F. de; NEVES, J. C. L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 447-457, 2002.

SAPORETTI JUNIOR, A. W.; MEIRA NETO, J. A. A.; ALMADO, R. de P. Fitossociologia de Cerrado *sensu stricto* no Município de Abaeté-MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 413-419, 2003.

SCHUMACHER, M. V.; BRUN, E. J.; HERNANDES, J. I.; KÖNIG, F. G. Produção de serapilheira em uma floresta de *Araucaria angustifolia* (Aertol.) Kuntze no município de Pinhal Grande-RS. **Revista Árvore**, v. 28, n. 1, p. 29-37, 2004.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V. G. Manejo da biomassa e sustentabilidade nutricional em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em pequenas propriedades rurais. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 144-156, 2019.

SCHWERZ, F.; ELOY, E.; ELLI, E. F.; CARON, B. O. Reduced planting spacing increase radiation use efficiency and biomass for energy in black wattle plantations: towards sustainable production systems. **Biomass & Bioenergy**, v. 120, p. 229–239, 2019.

SILVA, C. E. M.; GONÇALVES, J. F. de C.; FELDPAUSCH, T. R.; LUIZÃO, F. J.; MORAIS, R. R.; RIBEIRO, G. O. Eficiência no uso dos nutrientes por espécies pioneiras crescidas em pastagens degradadas na Amazônia central. **Acta Amazonica**, v. 36, n.4, pp. 503-512, 2006.

SILVA, H. D.; POGGIANI, F.; COELHO, L. C. Biomassa, concentração e conteúdo de nutrientes em cinco espécies de *Eucalyptus* plantadas em solos de baixa fertilidade. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 6/7, p. 9-25, 1983.

SILVA, M. O. dos S.; SILVA, M. G. da; BUFALINO, L.; ASSIS, M. R. de; GONÇALVES, D. de A.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. de P. Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 1, p. 211–224, 2021.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; PEREIRA, P. R. G. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1001-1010, 2002.

STAHL, J.; ERNANI, P. R.; GATIBONI, L. C.; CHAVES, D. M.; NEVES, C. U. Dry matter yield and nutritional efficiency of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus dunnii* clones due to addition of phosphorus rates to the soil. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 287–295, 2013.

TAYLOR, H. M.; WILLATT, S. T. Shrinkage of soybean roots. **Agronomy Journal**, v. 75, p. 818-820, 1983.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F.; SCHWENGBER, D.; MOURÃO JUNIOR, M. Avaliação de espécies florestais em área de mata no estado de Roraima. **Cerne**, v. 12, n.1, p. 8-18, 2006.

TONINI, H.; SCHWENGBER, D. R.; MORALES, M. M.; OLIVEIRA, J. M. F. de. Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* sob diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, e201801569, p. 1-8, 2018.

VALADÃO, M. B. X.; MARIMON JR., B. H.; MORANDI, P. S.; REIS, S. M. OLIVEIRA, B.; OLIVEIRA, E. A.; MARIMON, B. S. Initial development and biomass partitioning of *Physocalymma scaberrimum* Pohl (Lythraceae) under different shading levels. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 129-139, 2014.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P.; ARAÚJO, E. F. Implicações nutricionais com base em diferentes intensidades de colheita da biomassa de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*. **Ciência Rural**, v. 45, n. 3, p. 432-439, 2015.

WALTERS, B.B.; SABOGAL, C.; SNOOK, L.K.; ALMEIDA, E. Constraints and opportunities for better silvicultural practice in tropical forestry: an interdisciplinary approach. **Forest Ecology and Management**, v.209, p. 3–18, 2005.

WARING, R. H.; SCHLESINGER, W. H. **Forest ecosystems: concepts and management**. San Diego: Academic Press, 1985. 340 p.

WENG, X. Y.; ZHENG, C. J.; XU, H. X.; SUN, J. Y. Characteristics of photosynthesis and functions of the water-water cycle in rice (*Oryza sativa* L.) leaves in response to potassium deficiency. **Physiologia Plantarum**, v. 131, p. 614-621, 2007.

ZHAO, Z. G.; LIN, K. Q.; GUO, J. J.; ZENG, J. Diagnosis of macronutrient deficiency in *Erythrophleum fordii*, a nitrogen-fixing rosewood species. **Annals of Forest Research**, v. 58, n. 1, p. 15-26, 2015.

ZORB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture - Status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, p. 656–669, 2014.

## 7. CONCLUSÕES GERAIS

As plantas jovens de *T. vulgaris* responderam positivamente à fertilização com P e K nas variáveis morfológicas de crescimento em diâmetro e altura, trocas gasosas, concentração de nutrientes na biomassa de parte aérea, EUN e CUB, podendo dobrar a produtividade de biomassa de parte aérea na idade de três anos, considerando a manutenção do ritmo de crescimento observado.

Os maiores  $CUB_P$ ,  $CUB_K$  e  $CUB_{Mg}$  encontrados representam valores compatíveis com os níveis críticos de CUB definidos para produção de biomassa do tronco de eucalipto. Os compartimentos lenhosos do *T. vulgaris* apresentaram os maiores valores de CUB, algo bastante desejável e de grande interesse para a silvicultura.

As doses de superfosfato triplo entre 65,22 e 130,44 kg ha<sup>-1</sup> e de cloreto de potássio entre 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup> foram eficazes para aumentar o incremento médio anual e otimizar as taxas fotossintéticas em período de restrição hídrica.

Em função da variabilidade genética natural dentro do povoamento de *T. vulgaris* proveniente de sementes nativas, recomenda-se para os próximos estudos considerar o fator idade do plantio para avaliar a exportação relativa de nutrientes nas colheitas futuras.

Espera-se que mais estudos sejam realizados com a espécie, devido ao seu enorme potencial silvicultural, de modo a fomentar o uso do *T. vulgaris* em programas de recuperação de áreas degradadas e em plantios energéticos na Amazônia.