

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS  
AGRÁRIAS – AGRONOMIA

**DOSES DE UREIA, SUPERFOSFATO TRIPLO E  
CLORETO DE POTÁSSIO NA PRODUÇÃO DE MUDAS E  
NO ESTABELECIMENTO DE PLANTAS DE *Hymenaea  
stigonocarpa* Mart. ex Hayne SOB RESTRIÇÃO HÍDRICA**

Autora: Andréia Mendes da Costa  
Orientador: Prof. DSc. Leandro Carlos

Rio Verde - GO  
Dezembro – 2020

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS  
AGRÁRIAS – AGRONOMIA

**DOSES DE UREIA, SUPERFOSFATO TRIPLO E  
CLORETO DE POTÁSSIO NA PRODUÇÃO DE MUDAS E  
NO ESTABELECIMENTO DE PLANTAS DE *Hymenaea  
stigonocarpa* Mart. ex Hayne SOB RESTRIÇÃO HÍDRICA**

Autora: Andréia Mendes da Costa  
Orientador: Prof. DSc. Leandro Carlos

Tese apresentada, como parte das exigências para a obtenção do título de DOUTORA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Área de concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

Rio Verde - GO  
Dezembro – 2020

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

CC837d Costa, Andréia Mendes da  
Doses de ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio na produção de mudas e no estabelecimento de plantas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne sob restrição hídrica / Andréia Mendes da Costa; orientador Leandro Carlos; co-orientador José Milton Alves . -- Rio Verde, 2020.  
88 p.

Tese (Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2020.

1. jatobá-do-Cerrado. 2. nutrição florestal. 3. restrição hídrica. 4. mecanismos adaptativos. I. Carlos, Leandro, orient. II. Alves, José Milton, co-orient. III. Título.

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |  |   |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Tese                             | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input type="checkbox"/> Dissertação                                 | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                             | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |   |

Nome Completo do Autor: Andréia Mendes da Costa

Matrícula: 2017102320140033

Título do Trabalho: Doses de ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio na produção de mudas e no estabelecimento de plantas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne sob restrição hídrica.

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 03/02/2021

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

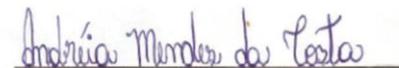
O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, Goiás, 22/01/2021.

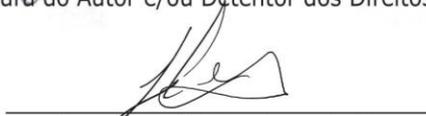
Local

Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO –  
CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA

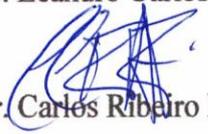
DOSES DE UREIA, SUPERFOSFATO TRIPLO E CLORETO  
DE PÓTASSIO NA PRODUÇÃO DE MUDAS E NO  
ESTABELECIMENTO DE PLANTAS DE *Hymenaea stigonocarpa*  
MART. EX HAYNE SOB RESTRIÇÃO HÍDRICA

Autora: Andréia Mendes da Costa  
Orientador: Dr. Leandro Carlos

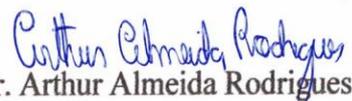
TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de  
Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 07 de dezembro de 2020.

  
Prof. Dr. Leandro Carlos (Presidente)

  
Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues (Membro interno)

  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Tatiana Michlovská (Membro externo)

  
Prof. Dr. Arthur Almeida Rodrigues (Membro externo)

  
Prof. Dr. Adinan Alves da Silva (Membro interno)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela sabedoria concedida para conseguir finalizar o doutorado, em Ciências Agrárias – Agronomia.

A minha família, meus pais Antônia Aparecida Mendes da Costa e Genessi José da Costa, pelo incentivo para superar todas as dificuldades. Em especial minha irmã, Gessica Mendes da Costa, pelo apoio em todos os momentos.

Ao Instituto Federal Goiano (IF Goiano) – Campus Rio Verde e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, pela oportunidade de cursar em uma rede de ensino público ofertada aos vários estudantes de pós-graduação. Como também, todos os professores e coordenadores (Dr. Marconi Batista Teixeira e Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares), pela qualificação profissional e acadêmica. E também a secretaria do PPGCA-AGRO, Vanilda Maria Campos, por ser sempre solícita na orientação de entregas de documentos exigidos pelo programa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pela concessão da bolsa.

Ao meu orientador, professor Dr. Leandro Carlos, pela oportunidade, paciência, ensinamentos e contribuições desde meu ingresso no mestrado até mesmo no doutorado.

Aos meus coorientadores, que contribuíram ao longo da minha trajetória acadêmica, os professores: Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues, Dr. José Milton Alves e Dr. Paulo Eduardo Menezes Silva, pelas valiosas contribuições.

Em especial, a minha colega e amiga de pós-graduação, Patrícia Oliveira da Silva, pela ajuda e por compartilhar seus conhecimentos nos manuscritos que foi

essencial para a conclusão não só da presente pesquisa, mais também de vários outros trabalhos nossos publicados em periódicos especializados.

Agradeço aos Laboratórios de Cultura de Tecidos Vegetais, Laboratório de Anatomia Vegetal, Laboratório de Química Agrícola, Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal e o Laboratório de Análise de Solo e Tecido Foliar, pelo suporte e parceria durante à execução do experimento.

Agradeço os integrantes do grupo de pesquisa, Patrícia Oliveira da Silva, Jorciane Souza Dias, Giselle Santos de Faria, Octavio Barbosa Plaster e Igor Olacir Fernandes Silva. Os colegas de pós-graduação Lucas Loram Lourenço e Vítor Martins Veneziano. Os pós-doutados Arthur Almeida Rodrigues, Adinan Alves da Silva e todos professores que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente, para minha formação acadêmica, profissional, pessoal e, ainda, pelo apoio na montagem do experimento e execução das análises, que não seria possível sem ajuda dos mesmos, permitindo assim concluir a presente pesquisa.

## BIOGRAFIA DA AUTORA

ANDRÉIA MENDES DA COSTA, filha de Antônia Aparecida Mendes da Costa e Genessi José da Costa, nasceu no dia 06 de setembro de 1992, na cidade de Santa Helena de Goiás, Goiás.

Em fevereiro de 2010, ingressou no curso de Bacharelado em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Goiás - Campus Santa Helena de Goiás - Goiás, graduando-se em dezembro de 2014.

Em março de 2015, iniciou no curso de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, concluído em janeiro de 2017.

Em março de 2017, ingressou no Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, sob a orientação do professor Leandro Carlos, concluindo com a defesa da tese em 2020.

## ÍNDICE GERAL

	Página
ÍNDICE DE TABELAS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	XV
RESUMO GERAL .....	XVII
ABSTRACT .....	XIXX
1.INTRODUÇÃO GERAL.....	XXI
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	XXIV
2.OBJETIVOS.....	XXIX
CAPÍTULO I: Respostas morfoanatômica e eficiência fotossintética de mudas de <i>hymenaea stigonocarpa</i> Mart. ex Hayne produzidas com substrato orgânico submetidas às adubações nitrogenada, fosfatada e potássica .....	
	1
RESUMO.....	1
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUÇÃO.....	3
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	5
2.1. Condições de cultivo e delineamento experimental .....	5
2.2. Análise morfofisiológica .....	7
2.3. Índice de pigmentos pelo clorofilômetro e Dualex .....	7
2.4. Análise de biomassa de folha, caule e raiz .....	8
2.5. Teor e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio .....	8
2.6. Caracterização morfoanatômica da folha .....	8
2.7. Análise estatística .....	9
3. RESULTADOS .....	9
3.1. Resposta morfofisiológica .....	9
3.2. Partição e alocação de biomassa.....	13

3.3. Índices de pigmentos .....	13
3.4. Eficiência nutricional.....	16
3.5. Micromorfometria foliar.....	16
3.6. Descrição morfoanatômica das mudas de <i>Hymenaea stigonocarpa</i> .....	18
4. DISCUSSÃO .....	19
5. CONCLUSÕES .....	22
6. AGRADECIMENTOS .....	23
7. REFERÊNCIA.....	23
Capítulo II: NPK nas relações hídricas em mudas de <i>Hymenaea stigonocarpa</i> Mart. ex Hayne (Fabaceae) .....	27
RESUMO.....	27
ABSTRACT .....	28
1. INTRODUÇÃO.....	29
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
2.1. Obtenção das sementes, condições de cultivo e delineamento experimental.....	31
2.2. Análise morfológica e taxa de crescimento relativo .....	32
2.3. Trocas gasosas, fluorescência da clorofila a e eficiência do uso da água .....	33
2.4. Análise dos índices de clorofila a e b .....	33
2.5. Biomassa, razões alométricas e área foliar .....	33
2.6. Potencial hídrico e condutividade hidráulica foliar .....	34
2.7. Taxa de extravasamento de eletrólitos .....	34
2.8. Análise estatística .....	34
3. RESULTADOS .....	35
3.1. Performance morfológica e taxa de crescimento relativo .....	35
3.2. Eficiência fotoquímica e bioquímica da fotossíntese .....	37
3.3. Eficiência instantânea e intrínseca do uso da água .....	39
3.4. Partição de biomassa e razões alométricas .....	40
3.5. Índices de clorofila, área foliar e área foliar específica.....	42
3.6. Relações hídricas e taxa de liberação de eletrólitos.....	43
3.7. Experimento de nitrogênio: correlação de Pearson e multivariada.....	44
3.7. Experimento de fósforo: correlação de Pearson e multivariada .....	46
3.7. Experimento de potássio: correlação de Pearson e multivariada .....	48
4. DISCUSSÃO .....	50
5. CONCLUSÕES .....	54
6. AGRADECIMENTOS .....	54
7. REFERÊNCIAS .....	54
CONCLUSÃO GERAL .....	59

## ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Capítulo I. Respostas morfoanatômica e eficiência fotossintética de mudas de <i>Hymenaea stigonocarpa</i> Mart. ex Hayne produzidas com substrato orgânico submetidas às adubações nitrogenada, fosfatada e potássica.....	1
Tabela 1. Adubação de base e cobertura aplicada para produção de mudas de <i>Hymenaea stigonocarpa</i> durante a fase de viveiro.....	6
Tabela 2. Caracterização química do substrato à base de casca de arroz carbonizada, vermiculita e lodo suíno.....	7
Capítulo II. NPK nas relações hídricas em mudas de <i>Hymenaea stigonocarpa</i> Mart. ex Hayne (Fabaceae) .....	27
Tabela 1. Caracterização físico-química coletado no horizonte “A” em mata nativa do perfil de solo do tipo LATOSSOLO VERMELHO Distrófico.. .....	32
Tabela 2. Correlação de Pearson entre as coordenadas das componentes principais (CP) 1 e 5 com os valores obtidos para cada variável avaliada standardizada do experimento com nitrogênio em plantas de <i>H. stigonocarpa</i> .....	45
Tabela 3. Correlação de Pearson entre as coordenadas das componentes principais (CP) 1 e 5 com os valores obtidos para cada variável avaliada standardizada do experimento com fósforo em plantas de <i>H. stigonocarpa</i> .....	47
Tabela 4. Correlação de Pearson entre as coordenadas das componentes principais (CP) 1 e 5 com os valores obtidos para cada variável avaliada standardizada do experimento com potássio em plantas de <i>H. stigonocarpa</i> .. .....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Capítulo I. Respostas morfoanatômica e eficiência fotossintética de mudas de <i>Hymenaea stigonocarpa</i> Mart. ex Hayne produzidas com substrato orgânico submetidas às adubações nitrogenada, fosfatada e potássica.....	1
Fig. 1. Dados climáticos durante a condução do experimento no Município de Rio Verde – GO, entre novembro de 2018 e julho de 2019 (Fonte: INMET, 2020).....	5
Fig. 2. Altura de plantas (AP), diâmetro do caule (DC) e razão altura/diâmetro do caule (AP/DC) aos 180 dias de mudas de <i>H. stigonocarpa</i> em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).....	10
Fig.3. Taxa fotossintética (A), condutância estomática ( $g_s$ ), taxa transpiratória (E) concentração interna e externa de CO <sub>2</sub> (Ci/Ca) e razão entre fotossíntese e concentração interna de CO <sub>2</sub> (A/Ci) aos 210 dias de mudas de <i>H. stigonocarpa</i> em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).....	11
Fig. 4. Rendimento quântico efetivo do fotossistema II ( $\Phi$ PSII), taxa de transporte de elétrons (ETR) e coeficiente de dissipação não fotoquímico (NPQ) aos 210 dias de mudas de <i>H. stigonocarpa</i> em resposta às doses de nitrogênio de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).....	12
Fig. 5. Massa seca foliar (MSF), massa seca caulinar (MSC), massa seca radicular (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST) aos 250 dias de mudas de <i>H. stigonocarpa</i> em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).....	13
Fig. 6. Índice de clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i> ), clorofila <i>b</i> (Chl <i>b</i> ) e razão entre clorofila <i>a/b</i> (Chl <i>a/b</i> ) aos 210 dias de mudas de <i>H. stigonocarpa</i> em resposta às doses de fósforo (A) e potássio (B).....	14
Fig. 7. Índice de clorofilas totais (Chl <i>a+b</i> ), flavonoides (Flav), antocianinas (Anth) e do balanço do nitrogênio (NBI), aos 210 dias de mudas de <i>H. stigonocarpa</i> em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C)....	15

Fig. 8. Teor e acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contidos na parte aérea aos 250 dias de mudas de *H. stigonocarpa* em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).. ..... 16

Fig. 9. Epiderme adaxial (AdEp), Epiderme abaxial (AbEp), Parênquima paliçádico (PP), Parênquima esponjoso (SP), Espessura do mesofilo (EsM) e Espessura da folha (EsF) aos 210 dias de mudas de *H. stigonocarpa* em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C)..... 17

Fig. 10. Estrutura da anatomia foliar aos 210 dias de mudas de *Hymenaea stigonocarpa*, submetidos às doses de nitrogênio (0, 75, 150, 225, 300 g m<sup>-3</sup> de N: A, D, G, J, M), fósforo (0, 150, 300, 450, 600 g m<sup>-3</sup> de P: B, E, H, K, N) e potássio (0, 40, 80, 120, 160 g m<sup>-3</sup> de K: C, F, I, L, O). As setas indicam dano no parênquima clorofiliano (J) e canal secretor (N). Abreviaturas correspondem: Epiderme Adaxial (AdEp), Epiderme Abaxial (AbEp), Parênquima Paliçádico (PP) e Parênquima Esponjoso (SP). Barras de escalas: 200 µm... ..... 19

Capítulo II. NPK nas relações hídricas em mudas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne (Fabaceae) ..... 27

Fig. 1. Autovalores das componentes principais na análise multivariada de componentes para os experimentos com nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).... ..... 35

Fig. 2. Altura de plantas (AP: A, D), diâmetro do caule (DC: B, E), número de folhas (NF: C, F) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão: n = 4) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ )..... 36

Fig. 3. Taxa de crescimento relativo da altura (TCR altura: A, C, D) e taxa de crescimento relativo do caule (TCR caule: B) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão: n = 4) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ )..... 37

Fig. 4. Condutância estomática (gs: A), concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> (Ci/Ca: B, G), razão entre fotossíntese e concentração interna de CO<sub>2</sub> (A/Ci: H), rendimento quântico efetivo do fotossistema II (ΦPSII: C, E, I) e taxa de transporte de elétrons (ETR: D, F, J) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão: n = 4) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ )..... 38

Fig. 5. Eficiência instantânea (A/E: A, C) e intrínseca (A/g<sub>s</sub>: B, D) do uso da água em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão: n = 4) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).....39

Fig. 6. Massa seca foliar (MSF: A, F), massa seca caulinar (MSC: B), massa seca radicular (MSR: C), massa seca da parte aérea (MSPA: D) e massa seca total (MST: E) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão: n = 4) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ )..... 41

Fig. 7. Razão de massa foliar (RMF: A, D, E), razão de massa caulinar (RMC: B) e razão de massa radicular (RMR: C) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão: n = 4) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ )... .. 42

Fig. 8. Área foliar específica (AFE: A, B, D) e índice Clorofila *a* (Chl *a*: C) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100 % da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30 % da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão: n = 4) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ )..... 43

Fig. 9. Potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P) e com adubação suplementar em nitrogênio/+N (A) e fósforo/+P (B). Médias ( $\pm$  erro padrão: n = 4) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ )..... 44

Fig. 10. Análise de componentes principais do experimento com o nitrogênio (N), e agrupamento dos tratamentos por clusters hierárquicos pelo método de Ward em plantas de *H. stigonocarpa*..... 46

Fig. 11. Análise de componentes principais do experimento com o fósforo (P), e agrupamento dos tratamentos por clusters hierárquicos pelo método de Ward em plantas de *H. stigonocarpa*..... 48

Fig. 12. Análise de componentes principais do experimento com o potássio (K), e agrupamento dos tratamentos por clusters hierárquicos pelo método de Ward em plantas de *H. stigonocarpa*..... 50

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

A	Taxa fotossintética	( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
AbEp	Epiderme abaxial	( $\mu\text{m}$ )
Acúmulo-K	Acúmulo de potássio	( $\text{mg planta}^{-1}$ )
Acúmulo-N	Acúmulo de nitrogênio	( $\text{mg planta}^{-1}$ )
Acúmulo-P	Acúmulo de fósforo	$\text{mg planta}^{-1}$ )
AdEp	Epiderme adaxial	( $\mu\text{m}$ )
AF	Área foliar	( $\text{cm}^2$ )
AFE	Área foliar específica	( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
Al	Alumínio	( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ )
Anth	Índice de antocianinas	
AP	Altura da planta	(cm)
AP/DC	Altura/diâmetro	
B	Boro	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
Ca	Cálcio	( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ )
Ca+Mg	Cálcio mais magnésio	( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ )
CC	Capacidade de campo	
$C_i/C_a$	Relação entre concentração interna e externa de $\text{CO}_2$	
Chl <i>a</i>	Índice de clorofila <i>a</i>	
Chl <i>b</i>	Índice de clorofila <i>b</i>	
Chl <i>a+b</i>	Índice de clorofila <i>a+b</i>	
Chl <i>a/b</i>	Índice de clorofila <i>a/b</i>	
C/N	Relação carbono nitrogênio	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
C.O.	Carbono orgânico	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
CTC	Capacidade de troca catiônica	( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ )
Cu	Cobre	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
DC	Diâmetro do caule	(mm)
DH	Déficit hídrico	
<i>E</i>	Taxa transpiratória	( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
ETR	Taxa relativa de transporte de elétrons	( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
EsF	Espessura da folha	( $\mu\text{m}$ )
EsM	Espessura do mesofilo	( $\mu\text{m}$ )
Fe	Ferro	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
Flav	Índice de flavonoides	Flav

$g_s$	Condutância estomática	$(\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})$
H+Al	Hidrogênio mais alumínio	$(\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3})$
IQD	Índice de qualidade de Dickson	
K	Potássio	$(\text{mg dm}^{-3})$
KCl	Cloreto de potássio	
$K_F$	Espessura da folha	$(\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1})$
LVD	Latossolo Vermelho Distrófico	
m	Saturação por alumínio	(%)
MAP	Mono-amônio fosfato	
Mg	Magnésio	$(\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3})$
Mn	Manganês	$(\text{mg dm}^{-3})$
M.O	Matéria orgânica	(%)
M.S.	Matéria seca	(%)
MSF	Massa seca da folha	$(\text{g planta}^{-1})$
MSC	Massa seca do caule	$(\text{g planta}^{-1})$
MSR	Massa seca da raiz	$(\text{g planta}^{-1})$
MSPA	Massa seca da parte aérea	$(\text{g planta}^{-1})$
MST	Massa seca total	$(\text{g planta}^{-1})$
N	Nitrogênio	$(\text{mg dm}^{-3})$
Na	Sódio	$(\text{mg dm}^{-3})$
NBI	Índice do balanço do nitrogênio	
NF	Número de folhas	
NPQ	Coefficiente de extinção fotoquímica	
P	Fósforo	$(\text{mg dm}^{-3})$
PE	Parênquima esponjoso	$(\mu\text{m})$
pH	Potencial hidrogeniônico	
PP	Parênquima paliçádico	$(\mu\text{m})$
RMF	Razão de massa foliar	
RMC	Razão de massa caulinar	
RMR	Razão de massa radicular	
R/PA	Raiz/parte aérea	
S	Enxofre	$(\text{mg dm}^{-3})$
SB	Soma de bases	$(\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3})$
TCR altura	Taxa de crescimento relativo da altura	
TCR diâmetro	Taxa de crescimento relativo do diâmetro	
Teor-K	Teor de potássio	$(\text{g Kg}^{-1})$
Teor-N	Teor de nitrogênio	$(\text{g Kg}^{-1})$
Teor-P	Teor de fósforo	$(\text{g Kg}^{-1})$
TLE	Taxa de extravasamento de eletrólitos	(%)
V	Saturação de bases	(%)
Zn	Zinco	$(\text{mg dm}^{-3})$
$\Phi\text{PSII}$	Rendimento quântico efetivo do fotossistema II	
$\Psi_w$	Potencial hídrico foliar	(MPa)

## RESUMO GERAL

COSTA, ANDRÉIA MENDES DA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, dezembro de 2020. **Doses de ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio na produção de mudas e no estabelecimento de plantas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne sob restrição hídrica.** Orientador: DSc. Leandro Carlos. Coorientadores: DSc. José Milton Alves e DSc. Paulo Eduardo Menezes Silva.

A nutrição e o déficit hídrico são dois fatores importantes que afetam o crescimento e desenvolvimento das espécies vegetais, principalmente, quando inseridos no contexto das mudanças climáticas globais. Portanto, o objetivo do presente estudo foi determinar as características morfoanatômicas e fisiológicas em mudas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne, integradas à eficiência de uso do nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) para tolerar os efeitos do déficit hídrico. A primeira etapa do experimento foi conduzida em delineamento inteiramente ao acaso (DIC), com 5 doses de nitrogênio (0, 75, 150, 225, 300 g m<sup>-3</sup> de N: ureia), 5 doses de fósforo (0, 150, 300, 450 e 600 g m<sup>-3</sup> de P: superfosfato triplo) e 5 doses de potássio (0, 40, 80, 120 e 160 g m<sup>-3</sup> de K: cloreto de potássio), com 4 repetições, cada uma foi constituída por oito unidades amostrais. As mudas foram produzidas em tubetes de 100 cm<sup>3</sup>, preenchido com lodo suíno, casca de arroz carbonizada e vermiculita na proporção de 1:1:1. Os parâmetros mensurados durante a fase de viveiro foram: biometria da altura de planta e diâmetro do caule, acúmulo de biomassa, trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, índice de pigmentos, teor e acúmulo de N, P, K, micromorfometria e anatomia foliar. A adubação nitrogenada aumentou os parâmetros crescimento, biomassa, índice de pigmentos secundários (antocianinas e flavonoide), eficiência fotoquímica e acúmulo de N na dose

estimada de  $300 \text{ g m}^{-3}$  de nitrogênio, em contrapartida houve a redução da mesofilo foliar e efeito de fotoinibição pela falta de resposta em função da não alteração da razão  $\text{Ci/Ca} - \text{A/Ci}$ . A adubação fosfatada exerceu efeito significativo no crescimento, trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, índices de antocianinas, índices de clorofilas, aumento da epiderme abaxial foliar e acúmulo biomassa na dose de  $600 \text{ g m}^{-3}$  de fósforo. A adubação potássica reduziu o crescimento e espessura do parênquima clorofiliano, por efeito de limitações estomáticas, no entanto, por outro lado, promoveu a produção e acúmulo de biomassa das mudas na dose de  $80 \text{ g m}^{-3}$  de potássio. Com as doses de nitrogênio, fósforo e potássio previamente selecionadas, as mudas foram transplantadas para vasos contendo 4 kg de LATOSSOLO VERMELHO Distrófico e areia na proporção de 2:1, transferidos posteriormente para casa de vegetação. O delineamento do segundo experimento foi em DIC, em esquema fatorial 2x3 composto pelos tratamentos, estados nutricionais (plantas com adubação suplementar e sem adubação suplementar) e reposições hídricas (100%, 50% e 30% da capacidade de campo – CC), com 4 repetições. As doses de  $300 \text{ g m}^{-3}$  de nitrogênio,  $600 \text{ g m}^{-3}$  de fósforo e  $80 \text{ g m}^{-3}$  de potássio foram eficazes no alívio dos efeitos deletérios dos déficits hídricos de 30% e 50% da CC. O tratamento controle com plantas sem adubação suplementar responderam nas máximas reposições hídricas de 50% e 100% da CC.

**PALAVRAS-CHAVE:** jatobá-do-Cerrado, nutrição florestal, restrição hídrica, mecanismos adaptativos.

## ABSTRACT

COSTA, ANDRÉIA MENDES DA. Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde - GO, december 2020. **Doses of urea, triple superphosphate and potassium chloride in the seedlings production and in the establishment of *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne plants under water restriction.** Advisor: DSc. Leandro Carlos. Coadvisor: DSc. José Milton Alves and DSc. Paulo Eduardo Menezes Silva.

Nutrition and water deficit are two important factors that affect the growth and development of plant species, especially when inserted in the context of global climate change. Therefore, the aim of the present study was to determine the morphoanatomical and physiological characteristics of *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne seedlings, integrated with the efficiency of using nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) to tolerate the water deficit effects. The first stage of the experiment was carried out in a completely randomized design (DIC), with 5 doses of nitrogen (0, 75, 150, 225, 300 g m<sup>-3</sup> of N: urea), 5 doses of phosphorus (0, 150, 300, 450 and 600 g m<sup>-3</sup> of P: triple superphosphate) and 5 doses of potassium (0, 40, 80, 120 and 160 g m<sup>-3</sup> of K: potassium chloride), with 4 repetitions, each consisted of eight sample units. The seedlings were produced in tubes of 100 cm<sup>3</sup>, filled with pig sludge, carbonized rice husks and vermiculite in the proportion of 1: 1: 1. The parameters measured during the nursery phase were: plant height and stem diameter biometry, biomass accumulation, gas exchange, chlorophyll a fluorescence, pigment index, N, P, K content and accumulation, micromorphometry and leaf anatomy. Nitrogen fertilization increased the parameters of growth, biomass, secondary pigment index (anthocyanins and flavonoids), photochemical efficiency and N accumulation in the estimated dose of 300 g m<sup>-3</sup> of

nitrogen, on the other hand, there was a reduction in leaf epidermis and photo effect inhibition by the lack of response due to the unchanged  $C_i/C_a - A/C_i$  ratio. Phosphate fertilization had a significant effect on growth, gas exchange, chlorophyll a fluorescence, anthocyanin indices, chlorophyll indices, increased leaf abaxial epidermis of biomass accumulation at a dose of  $600 \text{ g m}^{-3}$  of phosphorus. Potassium fertilization reduced the growth and thickness of the chlorophyll parenchyma, due to the effect of stomatal limitations, however, on the other hand, it promoted the production and accumulation of seedling biomass at the dose of  $80 \text{ g m}^{-3}$  of potassium. With the doses of nitrogen, phosphorus and potassium previously selected, the seedlings were transplanted into pots containing 4 kg of RED LATOSOL and sand in the proportion of 2:1, later transferred to the greenhouse. The design of the second experiment was in DIC, in a 2x3 factorial scheme composed of treatments, nutritional status (plants with supplementary fertilization and without supplementary fertilization) and water replenishment (100%, 50% and 30% of field capacity - CC), with 4 repetitions. The doses of  $300 \text{ g m}^{-3}$  of nitrogen,  $600 \text{ g m}^{-3}$  of phosphorus and  $80 \text{ g m}^{-3}$  of potassium were effective in alleviating the deleterious effects of water deficits of 30% and 50% of WC. The control treatment with plants without supplementary fertilization responded to the maximum water replenishment of 50% and 100% of WC.

**KEY WORDS:** jatobá-do-Cerrado, forest nutrition, water restriction, adaptive mechanisms.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

*Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne (Fabaceae) é uma espécie nativa encontrada nas savanas neotropicais da América do Sul (Garcia et al., 2019), classificada como clímax (Silva et al., 2020), de crescimento lento, conhecida pelo nome de jatobá-do-Cerrado (Costa et al., 2015). Sobretudo, esta espécie arbórea é capaz de recompor áreas desmatadas ou até mesmo degradadas (Silva et al., 2019a). A farinha produzida a partir do fruto do jatobá-do-Cerrado apresenta grande potencial alimentício, e é indicado como uma opção na dieta de pacientes diagnosticados com doenças crônicas, como os diabéticos (Silva et al., 2019b). Também é indicada para o tratamento contra anemia, dor de garganta, diarreia, asma, bronquite e cólica intestinal (Orsi et al., 2012; Boniface et al., 2017). A espécie apresenta importância no ramo madeireiro, mas sofre com a superexploração ilegal de madeira (Granato-Souza et al., 2019), sendo inserida na categoria de “quase ameaçada de extinção” (Mori et al., 2012; Ramalho et al., 2019), e compromete não apenas a composição e densidade dessa espécie, como também interfere nos processos de regeneração e conservação da biodiversidade *in situ* (Meira Junior et al., 2020).

Com área de 2 milhões de km<sup>2</sup> (Bonanom et al., 2019), somente 3% das formações savânicas de Cerrado é protegido por unidades de conservação (UCs), as quais mostraram ineficazes na preservação da vegetação nativa (Sá et al., 2018). De fato, o aumento da demanda agrícola por alimento, bem como a falta de áreas protegidas no bioma Cerrado, gera dualidade (Velazco et al., 2019). Em consequência à degradação e exploração descontrolada das espécies nativas, o crescimento populacional tem levado a exploração dos recursos naturais, além da sua capacidade de manter

reduzindo a resiliência dos sistemas produtivos, sendo necessária a adoção de estratégias de recuperação e conservação da biodiversidade (Silva et al., 2013).

As regiões savânicas brasileiras são consideradas uma das maiores *hotspots* mundiais para a conservação da biodiversidade, embora tenha alta taxa de desmatamento (Colli et al., 2020), que levou à conversão desses habitats naturais em terras produtivas destinadas para atividades da agropecuária (Sá et al., 2018). Essas modificações se caracterizam como um dos principais e preocupantes problemas ambientais, decorrente do uso intensivo e descontrolado de insumos químicos, que por sua vez, promove a poluição de aquíferos e solos (Rezende-Silva et al., 2019; Batista et al., 2018). Ao mesmo tempo, as espécies que ocorrem nessas fisionomias de Cerrado ainda sofrem com as frequentes queimadas, além de contribuir para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (Gomes et al., 2018).

Em resposta a essas alterações, os ecossistemas, tendem a uma série de desbalanços ambientais, como maior radiação solar e baixos índices pluviométricos, tendo efeito direto no aumento da temperatura e queda na umidade relativa do ar (Costa et al., 2015). Como resultado, dessas interações entre os impactos das mudanças climáticas e a perda da biodiversidade de origem antropogênica, somadas ao aquecimento global, é quase que certo que acontecerão rearranjos importantes nesses ecossistemas (Velazco et al., 2019). Dessa forma, surgiu o interesse de estudar a adaptação de espécies nativas as novas condições climáticas do aquecimento global via adubação nitrogenada, fosfatada e potássica, combinadas à restrição hídrica.

A nutrição aumenta a tolerância das espécies à restrição hídrica, que afeta o crescimento, metabolismo e a eficiência fotossintética, caso encontre presente em concentrações adequadas (Battie-Laclau et al., 2014; Tariq et al., 2017 e 2018; Huang et al., 2018b). Dentre os nutrientes o nitrogênio (N) está presente em uma série de moléculas nas plantas, como nos pigmentos (clorofilas), no metabolismo secundário (compostos nitrogenados), nas bases nitrogenadas dos ácidos nucleicos (RNA e DNA), e nos aminoácidos de proteínas e enzimas da célula (Nunes-Nesi et al., 2010; Wang et al., 2014). O nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) são as principais formas de N absorvido pelas plantas (Wang et al., 2012; Huang et al., 2018a). Durante o processo de absorção, transporte e assimilação o  $\text{NO}_3^-$  é reduzido a  $\text{NH}_4^+$  por ação do nitrato redutase (NR) e nitrito redutase (NiR), sendo ativada pelo nitrato e inibida por produtos finais da rota do metabolismo do N (aminoácidos: glutamato e glutamina) (Fernandes, 2006). Alternativamente, a presença de  $\text{NO}_3^-$  participa na ativação de alguns genes envolvidos

no metabolismo do carbono como algumas enzimas da respiração e do Ciclo de Calvin (Nunes-Nesi et al., 2010). O  $\text{NH}_4^+$ , produzido ou assimilado em altas concentrações é tóxico para célula, em que a principal via metabólica da assimilação do  $\text{NH}_4^+$  a aminoácidos é catalisada pelas enzimas Glutamina Sintetase (GS) e Glutamato Sintase (GOGAT) (Xu et al., 2012; Esteban et al., 2016; Vega-Mas et al., 2017). O  $\text{NH}_4^+$ , em baixas concentrações é ativado pela via da enzima Glutamato Desidrogenase (GDH) na desaminação oxidativa da fotorrespiração (Miyashita e Good, 2008)

Assim, como o nitrogênio, o fósforo (P) também é um dos nutrientes mais exigidos pelas plantas. Especialmente, por atuar na taxa de transporte de elétrons (ETR) envolvidas com a redução/fosforilação formando o NADPH/ATP, produtos estes necessários na fase redutiva do carbono responsável pela oxidação/desfosforilação liberando o  $\text{NADP}^+$ /ADP. Ou seja, o P está diretamente vinculado às etapas fotoquímica e bioquímica da fotossíntese (Costa et al., 2020), e também está associado diretamente com o metabolismo do carbono (Taiz e Zeiger, 2017) e do enxofre (S) com a fosforilação (ATP) de alguns compostos para redução e assimilação do S (Watanabe et al., 2012). O fósforo absorvido é acumulado no vacúolo na forma de pirofosfato e fósforo inorgânico – “Pi”, após ser assimilado, o P está presente na forma de ésteres de P (Malhotra et al., 2018), tendo como função atrair cátions por meio de ligações fracas para manter-compor estruturas de macromoléculas do DNA e RNA (Kögel-Knabner e Amelung, 2014).

O potássio (K) tem como uma das principais funções a regulação da abertura e fechamento estomático, atua nos processos de trocas gasosas, conduzindo a respiração e fotossíntese por meio do ajustamento osmótico (Hasanuzzaman et al. 2018), além de estar diretamente integrado com o metabolismo do nitrogênio e do carbono (Zahoor et al., 2017). Participa, ainda, efetivamente na ativação de várias enzimas (aldolases, quinases, sintetases, transferases, oxireductases e desidrogenases), apesar de não possuir função estrutural e nem afinidade com outros compostos orgânicos (Silveira e Malavolta, 2000). O K é responsável por equilibrar o pH do citosol durante o processo de carregamento do floema por meio da fotoassimilação, envolvido diretamente na biossíntese de proteínas (Fernandes, 2006)

Sabe-se que em condições de estresse hídrico há alterações nas trocas gasosas aliadas a alterações estruturais nos cloroplastos, afetando diretamente a eficiência fotoquímica do fotossistema II (PSII), variando em intensidade de acordo com a espécie. Como consequência há comprometimento do potencial produtivo, seja por

limitações difusivas, decorrentes da redução da condutância estomática ( $g_s$ ) e mesofílica ( $g_m$ ), ou por alterações bioquímicas com consequente danos estruturais citológicos, o que pode levar a alterações na atividade de algumas enzimas importantes, como a Ribulose bifosfato carboxilase (Rubisco) (Gallé et al., 2011). Essas alterações fisiológicas estão associadas ao aumento da concentração de ácido abscísico (ABA), do efeito de foto-inibição e foto-oxidação nas plantas, que podem ter implicações isoladas ou aditivas sobre a fotossíntese (Barbosa et al., 2010). Embora esses parâmetros fisiológicos, sejam importantes para determinar as taxas fotossintéticas, porém não são suficientes para avaliar os efeitos deletérios nos cloroplastos, ocasionados pelas diversas formas de estresses abióticos (Claeys e Inzé, 2013). Logo, o conhecimento anatômico combinado com as observações fisiológicas, é uma ferramenta que permite compreender o comportamento de espécies como um todo, sendo por um estresse hídrico (Costa et al., 2015), estresse salino (Chakraborty et al., 2016) ou sob condições de deficiência de nutrientes (Wen et al., 2019).

Assim, testou a hipótese de que mudas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne, quando bem nutridas com nitrogênio, fósforo e potássio podem aumentar a tolerância ao estresse hídrico. Portanto, pretende-se contribuir com este estudo para melhor compreensão da resposta das mudas de *Hymenaea stigonocarpa*, a diferentes doses de nitrogênio, fósforo e potássio e sob estresse hídrico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, K.B.F., Costa, N.M.B., Alfenas, R.C.G., Paula, S.O., Minim, V.P.R., Bressan, J., 2010. Estresse oxidativo: conceito, implicações e fatores modulatórios. *Revista de Nutrição* 23, 629 – 643. <https://doi.org/10.1590/S1415-52732010000400013>
- Batista, P.F., Costa, A.C., Megguer, C.A., Lima, J.S., Silva, F.B., Guimarães, D.S., Almeida, G.M., Nascimento, K.J.T., 2018. Pouteria torta: A native species of the Brazilian Cerrado as a bioindicator of glyphosate action. *Brazilian Journal of Biology* 78, 296 – 305. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.07416>
- Battie-Laclau, P., Laclau, J.P., Domec, J.C., Christina, M., Bouillet, J.P., Piccolo, M.C., Gonçalves, J.L.M., Moreira, R.M., Krusche, A.V., Bouvet, J.M., Nouvellon, Y. (2014). Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations. *New Phytologist*, 203(2), 401–413. <https://doi.org/10.1111/nph.12810>
- Bonanomi, J., Tortato, F.R., Gomes, R.S.R., Penha, J.M., Bueno, A.S., Peres, C.A., 2019. Protecting forests at the expense of native grasslands: Land-use policy encourages open-habitat loss in the Brazilian cerrado biome. *Perspectives in*

Ecology and Conservation 17, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.12.002>

- Boniface, P.K., Ferreira, S.B., Kaiser, C.R., 2017. Current state of knowledge on the traditional uses, phytochemistry, and pharmacology of the genus *Hymenaea*. *Journal of Ethnopharmacology* 206, 193 – 223. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2017.05.024>
- Chakraborty, K., Bhaduri, D., Meena, H.N., Kalariya, K., 2016. External potassium (K<sup>+</sup>) application improves salinity tolerance by promoting Na<sup>+</sup>-exclusion, K<sup>+</sup>-accumulation and osmotic adjustment in contrasting peanut cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry* 103, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.02.039>
- Claeys, H., Inzé, D., 2013. The agony of choice: how plants balance growth and survival under water-limiting conditions. *Plant Physiology* 162, 1768 – 1779. <https://doi.org/10.1104/pp.113.220921>
- Colli, G.R., Vieira, C.R., Dianese, J.C., 2020. Biodiversity and conservation of the Cerrado: recent advances and old challenges. *Biodiversity and Conservation* 29, 1465–1475. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-01967-x>
- Costa, A.C., Rezende-Silva, S.L., Megguer, C.A., Moura, L.M.F., Rosa, M., Silva, A.A., 2015. The effect of irradiance and water restriction on photosynthesis in young jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*) plants. *Photosynthetica* 53, 118 – 127. <http://doi.org/10.1007/s11099-015-0085-6>
- Costa, A. M., Venturin, N., Venturin, R.P., Silva, P.O., Carlos, L., 2020. Phosphate fertilization and liming promote the growth and development of *Annona crassiflora*. *Floresta e Ambiente* 27, 1 – 10. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.031118>
- Esteban, R., Ariz, I., Cruz, C., Moran, J.F., 2016. Review: Mechanisms of ammonium toxicity and the quest for tolerance. *Plant Science* 248, 92 – 101. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.04.008>
- Gallé, A., Florez-Sarasa, I., Aououad, H. E., Flexas, J., 2011. The Mediterranean evergreen *Quercus ilex* and the semi deciduous *Cistus albidus* differ in their leaf gas exchange regulation and acclimation to repeated drought and re-watering cycles. *Journal of Experimental Botany* 62, 1–10. <https://doi.org/10.1093/jxb/err233>
- Garcia, A.S., Bressan, E.A., Ballester, M.V.R., Figueira, A., Sebbenn, A.M., 2019. High rates of pollen and seed flow in *Hymenaea stigonocarpa* on a highly fragmented savanna landscape in Brazil. *New Forests* 50, 991–1006. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09710-3>
- Gomes, L., Miranda, H.S., Bustamante, M.M.C., 2018. How can we advance the knowledge on the behavior and effects of fire in the Cerrado biome?. *Forest Ecology and Management*, 417, 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.032>
- Granato-Souza, D., Barbosa, A.C.M.C., Chaves, H.F., 2019. Drivers of growth variability of *Hymenaea stigonocarpa*, a widely distributed tree species in the

- Brazilian Cerrado. *Dendrochronologia* 53, 73 – 81.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.12.001>
- Huang, L., Li, M., Shao, Y., Sun, T., Li, C., Ma, F., 2018a. Ammonium uptake increases in response to PEG-induced drought stress in *Malus hupehensis*. *Environmental and Experimental Botany* 151, 32-42.  
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.04.007>
- Huang, L., Li, M., Zhou, K., Sun, T., Hu, L., Li, C., Ma, F., 2018b. Uptake and metabolism of ammonium and nitrate in response to drought stress in *Malus prunifolia*. *Plant Physiology and Biochemistry* 127, 185–193.  
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.031>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M.B., Nahar, K., Hossain, M.S., Mahmud, J.A., Hossen, M.S., Masud, A.A.C., Moumita, Fujita, M., 2018. Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy* 8, 1 – 29.  
<http://doi.org/10.3390/agronomy8030031>
- Jin, X., Yang, G., Tan, C., Zhao, C., 2015. Effects of nitrogen stress on the photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation, chlorophyll fluorescence, and sugar-nitrogen ratio in corn. *Scientific Reports* 9311, p. 1 – 9. <https://doi.org/10.1038/srep09311>
- Kögel-Knabner, I., Amelung, W., 2014. Dynamics, Chemistry, and Preservation of Organic Matter in Soils. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* 12, 157 – 215. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01012-3>
- Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., Pandey, R., 2018. Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess. In: Hasanuzzaman, M., Fujita, M.; Oku, H., Nahar, K., Hawrylak-Nowa, B. ed. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 171 – 190.  
<http://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8>
- Meira Junior, M.S., Pinto, J.R.R., Ramos, N.O., Miguel, E.P., Gaspar, R.D.O., Phillips, O.L., 2020. The impact of long dry periods on the aboveground biomass in a tropical forests: 20 years of monitoring. *Carbon Balance and Management*, 15, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s13021-020-00147-2>
- Fernandes, M.S., 2006. Mineral nutrition of plants [nutrição mineral de plantas]. Viçosa, Brazil: SBCS.
- Miyashita, Y., Allen, G.G., 2008. Glutamate deamination by glutamate dehydrogenase plays a central role in amino acid catabolism in plants. *Plant Signaling e Behavior* 3, 42-843. <https://doi.org/10.4161/psb.3.10.5936>
- Mori, E.S., Piña-Rodrigues, F.C.M., Ivanauskas, N.M., Freitas, N.P., Brancalion, P.H.S., Martins, R.B., 2012. Guia para germinação de 100 espécies nativas. In: Mori, E.S., Piña-Rodrigues, F.C.M., Freitas, N.P. (Ed.). *Sementes Florestais: guia para germinação de 100 espécies nativas*. São Paulo: Instituto Refloresta, p.154.

- Nunes-Nesi, A., Fernie, A. R., Stitt, M., 2010. Metabolic and signaling aspects underpinning the regulation of plant carbon nitrogen interactions. *Molecular Plant* 3, 973 – 996. <https://doi.org/10.1093/mp/ssq049>
- Orsi, P.R., Bonamin, F., Severi, J.A., Santos, R.C., Vilegas, W., Hiruma-Lima, C.A., STASI, L.C., 2012. *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne: A Brazilian medicinal plant with gastric and duodenal anti-ulcer and antidiarrheal effects in experimental rodent models. *Journal of Ethnopharmacology* 143, 81 – 90. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.06.001>
- Ramalho, C.I., Camilo, F.L., Paranaguá, L.A.M.N., Gomes, G.L.S., 2019. Avaliação de diferentes tratamentos pré-germinativos para sementes de Jatobá do Cerrado (*Hymenaea stigonocarpa* L.). *Revista Brasileira de Meio Ambiente* 7, 002 – 009. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3524805>
- Rezende-Silva, S.L., Costa, A.C., Dyszy, F.H., Batista, P.F., Crispim-Filho, A.J., Nascimento, K.J.T., Silva, A.A. *Pouteria torta* is a remarkable native plant for biomonitoring the glyphosate effects on Cerrado vegetation. *Ecological Indicators* 102, 497 – 506. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.003>
- Sá, D., Scariot, A., Ferreira, J.B., 2020. Effects of ecological and anthropogenic factors on population demography of the harvested *Butia capitata* palm in the Brazilian Cerrado. *Biodiversity and Conservation* 29, 1571–1588. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1669-9>
- Silva, C.P., Soares-Freitas, R.A.M., Sampaio, G.R., Santos, M.C.B., do Nascimento, T.P., Cameron, L.C., Ferreira, M.S.L., Arêas, J.A. G. 2019b. Identification and action of phenolic compounds of Jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa* Mart.) on  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase activities and flour effect on glycemic response and nutritional quality of breads. In *Food Research International* 116, 1076 – 1083 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.050>
- Silva, P.O., Carlos, L., Menezes-Silva, P.E., Costa, A.M., Rodrigues, C.R., Loram-Lourenço, L., Dias, J.S., 2019a. Morphophysiological and nutritional behavior of *Hymenaea stigonocarpa* mart. Ex hayne (fabaceae) seedlings submitted to liming. *Revista Arvore* 43, 1 – 9. <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000300005>
- Silva, P.O., Carlos, L., Menezes-Silva, P.E., Costa, A.M., Barbosa, K.P., 2020. Physiological and morphological behavior of *Hymenaea stigonocarpa* seedlings submitted to Phosphorus. *Floresta e Ambiente* 27, 1 – 9. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.093317>
- Silva, C.R., Souzab, K.B, Furtado, W.F., 2013. Evaluation of the Progress of Intensive Agriculture in the Cerrado Piauiense – Brazil. *Procedia* 5, 51 – 58. <https://doi.org/10.1016/j.ieri.2013.11.069>
- Silveira, R.L.V.A., Malavolta, E., 2000. Nutrição e adubação potássica em Eucalyptus. Relatório técnico. Piracicaba, ESALQ/USP, 12p.
- Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O.A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., Sun, X., Song, D., Chen, W., Zhang, A., Wu, X., Zhang, L., Mingrui, D., Xiong, Q., Liu, C., 2017.

- Phosphorous application improves drought tolerance of *Phoebe zhennan*. *Frontiers in Plant Science* 8, 1 – 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01561>
- Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O. A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., Zhang, L., Wu, X., Chen, W., Song, D., Huang, D., Xue, T., Zhang, A., 2018. Phosphorous fertilization alleviates drought effects on *Alnus cremastogyne* by regulating its antioxidant and osmotic potential. *Scientific Reports* 8, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24038-2>
- Taiz, L., Zeiger, E., 2017. *Fisiologia vegetal*. Volume Eletrônico, 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 888p.
- Velazco, S.J.E., VillaloboS, F., Galvão, F., Marco Júnior, P., 2019. A dark scenario for Cerrado plant species: Effects of future climate, land use and protected areas ineffectiveness. *Diversity and Distributions* 25, 660 – 673. <https://doi.org/10.1111/ddi.12886>
- Wang, M., Shen, Q., Xu, G., Guo, S., 2014. New insight into the strategy for nitrogen metabolism in plant cells. *International Review of Cell and Molecular Biology* 310, 1- 37. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800180-6.00001-3>
- Wang, Y.Y., Hsu, P.K., Tsay, Y.F., 2012. Uptake, allocation and signaling of nitrate. *Trends in Plant Science* 17, 458 – 467. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.007>
- Watanabe, M., Hubberten, H.M., Hoefgen, R., 2012. Plant response to mineral ion availability: transcriptome responses to sulfate, selenium and iron. In: De Kok L. et al. (eds) *Sulfur Metabolism in Plants*. Proceeding of the International Plant Sulfur Workshop, v. 1, Spring, Dordrecht, 123 – 134. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4450-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4450-9_17)
- Wen, B., Li, C., Fu, X., Li, D., Li, L., Chen, X., Wu, H., Cui, X., Zhang, X., Shen, H., Zhang, W., Xiao, W., Gao, D., 2019. Effects of nitrate deficiency on nitrate assimilation and chlorophyll synthesis of detached apple leaves. *Plant Physiology and Biochemistry* 142, 363 – 371. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.07.007>
- Xu, G.H., Fan, X.R., Miller, A.J., 2012. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual Review of Plant Biology* 63, 153 – 182. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532>
- Zahoor, R., Zhao, W., Abid, M., Dong, H., Zhou, Z., 2017. Potassium application regulates nitrogen metabolism and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) functional leaf under drought stress. *Journal of Plant Physiology* 215, 30 – 38. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.05.001>

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Geral

Avaliar as respostas morfofisiológicas e anatômicas em mudas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne, submetidas à adubação com N, P, K e a restrição hídrica.

### 2.2 Específicos

1. Avaliar o efeito da adubação com N, P e K combinada com a restrição hídrica nas variáveis de crescimento, biomassa, trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, e índice de pigmentos, taxa de extravasamento de eletrólitos, condutividade hidráulica e potencial hídrico foliar em mudas de *Hymenaea stigonocarpa*.

2. Determinar o teor de N, P, K e acúmulo das formas de adubação que mostraram melhores resultados nas características morfofisiológicas, possibilitando maior produção e qualidade das mudas de *Hymenaea stigonocarpa*, durante a fase de viveiro.

3. Verificar as principais alterações na morfoanatomia foliar das mudas de *Hymenaea stigonocarpa*, em função da adubação com N, P, K, e identificar estratégias da planta para tolerar os efeitos do déficit hídrico.

## CAPÍTULO I

### Respostas morfoanatômicas e eficiência fotossintética de mudas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne produzidas com substrato orgânico submetidas às adubações nitrogenada, fosfatada e potássica

(Normas de acordo com a revista South African Journal of Botany)

#### RESUMO

A fim de reduzir ou reverter a perda da biodiversidade e diminuir o impacto das mudanças climáticas, é necessário desenvolver estudos para adaptar as espécies nativas do Cerrado as novas condições do aquecimento global via adubação nitrogenada, fosfatada e potássica. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito de doses de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) sobre as características morfoanatômicas, fisiológicas e nutricionais das mudas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne. O delineamento utilizado foi inteiramente ao acaso, composto por três experimento distintos, com cinco doses de nitrogênio (0, 75, 150, 225, 300 g m<sup>-3</sup> de ureia), fósforo (0, 150, 300, 450 e 600 g m<sup>-3</sup> de superfosfato triplo) e potássio (0, 40, 80, 120 e 160 g m<sup>-3</sup> de cloreto de potássio), com quatro repetições e cada uma constituída de oito unidades amostrais, num total de 32 mudas. O substrato utilizado foi confeccionado com partes iguais de lodo suíno tratado, casca de arroz carbonizada e vermiculita, produzidas em

tubetes de 100 cm<sup>3</sup>. Aos 180 e 250 dias após a semeadura, avaliou-se os parâmetros biométricos, produção de biomassa, trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, índice de clorofilas, teor e acúmulo de N, P, K, micromorfometria e anatomia foliar. A adubação nitrogenada, na dose de 300 g m<sup>-3</sup> de N apresentou os melhores resultados de crescimento, biomassa, eficiência fotoquímica, índice de pigmentos e acúmulo de N, porém ao analisar os parâmetros de eficiência bioquímica indicaram efeito de fotoinibição pela não difusão de CO<sub>2</sub> da razão Ci/Ca - A/Ci e redução do mesofilo foliar. A adubação fosfatada aumentou a altura de planta, diâmetro do caule, fluorescência da clorofila *a*, índices de clorofilas, trocas gasosas, epiderme abaxial das folhas e acúmulo de biomassa na dose de 600 g m<sup>-3</sup> de P. A adubação potássica promoveu o decréscimo do crescimento, espessura do parênquima clorofiliano e das trocas gasosas por limitações estomáticas, com exceção da NPQ, índice de clorofila *a*, acúmulo e produção de biomassa que aumentou na dose estimada de 80 g m<sup>-3</sup> de K em mudas de *H. stigonocarpa*.

**Palavras-chave:** jatobá-do-Cerrado, nutrição mineral, crescimento inicial, qualidade de mudas.

#### ABSTRACT

In order to delay or reverse the loss of biodiversity and reduce the impact of climate change, it is necessary to develop studies to adapt the native species of the Cerrado to the new conditions of global warming through nitrogen, phosphate and potassium fertilization. Therefore, the objective of this research was to evaluate the effect of doses of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) on the morpho-anatomical, physiological and nutritional characteristics of *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne seedlings. The design used was entirely random, composed of three distinct experiments, with five doses of nitrogen (0, 75, 150, 225, 300 g m<sup>-3</sup> of N: urea), phosphorus (0, 150, 300, 450 and 600 g m<sup>-3</sup> of P: triple superphosphate) and potassium (0, 40, 80, 120 and 160 g m<sup>-3</sup> of K: potassium chloride), with four repetitions and each consisting of eight sample units, for a total of 32 seedlings. The substrate used was made with equal parts of treated pig sludge, carbonized rice husks and vermiculite, produced in tubes of 100 cm<sup>3</sup>. At 180 and 250 days after sowing, biometric parameters, biomass accumulation, gas exchange, chlorophyll *a* fluorescence, chlorophyll index, N, P, K content and accumulation, micromorphometry and leaf anatomy were evaluated.

Nitrogen fertilization, at a dose of 300 g m<sup>-3</sup> of N, showed the best growth results, biomass, photochemical efficiency, pigment index and N accumulation, however, when analyzing the biochemical efficiency parameters, they indicated photoinhibition effect due to the non-diffusion of CO<sub>2</sub> of the Ci/Ca - A/Ci ratio and reduction of leaf mesophyll. Phosphate fertilization increased plant height, stem diameter, chlorophyll a fluorescence, chlorophyll indices, gas exchange, abaxial leaf epidermis and accumulation of biomass at a dose of 600 g m<sup>-3</sup> of P. Potassium fertilization decreased growth, thickness of the chlorophyll parenchyma and gas exchange due to stomatal limitations, with the exception of NPQ, chlorophyll indices, accumulation and production of biomass that increased in the estimated dose of 80 g m<sup>-3</sup> of K in *H. stigonocarpa* seedlings.

**Key words:** jatobá-do-Cerrado, mineral nutrition, initial growth, seedling quality.

## 1. INTRODUÇÃO

*Hymenaea stigonocarpa* Mart. Ex Hayne (Fabaceae) é uma espécie medicinal, endêmica das savanas neotropicais e conhecida popularmente como “jatobá-do-Cerrado” (Boniface et al., 2017), indicada para recomposição de áreas degradadas (Silva et al., 2020). Por ocorrer em formações savânicas de Cerrado, espécies como essa, são frequentemente expostas a longos períodos estressantes, porém com as mudanças climáticas esses períodos tendem a ser intensificados (Costa et al., 2015). Dessa forma, estudos voltados para adaptar plantas às condições adversas por meio da adubação nitrogenada, fosfatada e potássica em fase de muda, devem ser realizados, uma vez que plantas nutridas podem ter sua capacidade de tolerância e sobrevivência aumentadas frente às condições estressantes. Esses estudos se fazem mais necessários ainda, se considerar o fato que as condições climáticas do planeta tendem a mudar, pelas altas taxas de desmatamento, queimadas e outros fatores (Velazco et al., 2019).

A aplicação de fertilizantes comumente utilizados na agricultura, como a ureia, superfosfato triplo e o cloreto de potássio desempenham funções cruciais na eficiência fotossintética e no crescimento das plantas (Kaur et al., 2017; Bhattacharya, 2019; Kumar et al., 2020) por serem fontes de elementos essenciais como o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), respectivamente. Cada elemento está relacionado a um importante processo ou faz parte da constituição de moléculas responsáveis por algum

processo. Porém, o efeito da ureia, superfosfato triplo e do cloreto de potássio em espécies arbóreas nativas do Cerrado ainda não está claro, principalmente no que diz respeito a produção de mudas com maior qualidade para tolerar as condições impostas por esse Bioma. Sabe-se que o N fornecido pela ureia (fonte amídica), uma vez assimilado, pode aumentar a eficiência fotoquímica do rendimento quântico efetivo do fotossistema II, taxa de transporte de elétrons e, ao mesmo tempo, aumentar os índices de pigmentos secundários, como os flavonoides e antocianinas, que auxiliam na dissipação de elétrons, importante mecanismo de tolerância ao estresse hídrico (Chen e Cheng, 2003; Zhou et al., 2012; Kaur et al., 2017).

O fósforo fornecido pelo superfosfato triplo (ST), que ao ser aplicado ao solo é solubilizado liberando P e cálcio (Ca) (Bhattacharya, 2019). Nas plantas, o P é um elemento chave necessário na regulação do metabolismo dos carboidratos e também na regulação da fotossíntese (Stigter e Plaxton, 2015). O Ca é importante sinalizador bioquímico, que pode estabilizar membranas da parede celular e regular o metabolismo fotossintético através da cálcio-calmodulina, em plantas submetidas às condições estressantes (Sanders et al., 2002; Zou et al., 2010; Aliniaefard et al., 2020).

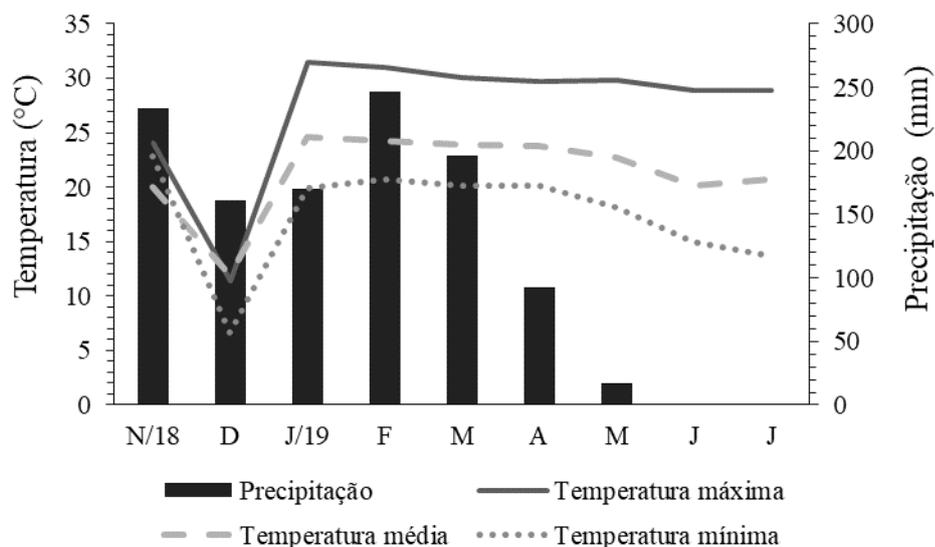
O potássio fornecido pelo cloreto de potássio (KCl), quando aplicado no solo fornece K e cloreto (Cl) às plantas (Kumar et al., 2020), é regulador da abertura e fechamento estomático, que influem diretamente nas trocas gasosas, conduzindo a fotossíntese e respiração por meio do ajustamento osmótico (Hasanuzzaman et al., 2018). O K, ainda, é responsável pelo equilíbrio do pH do citosol e do processo de carregamento do floema com fotoassimilados, participa diretamente da biossíntese de proteínas e aminoácidos (Tränkner et al., 2018). Enquanto o Cl está associado a fosforilação não cíclica com o transporte de elétrons (ETR) da etapa fotoquímica, em que ocorre a foto-oxidação da água ( $O_2$ ) no fotossistema II (Hind et al., 1969).

Com base no exposto acima, levantou-se a hipótese de que mudas de *H. stigonocarpa* quando cultivadas com adubação nitrogenada, fosfatada e potássica, apresentam maiores respostas morfofisiológicas e nutricionais, e por fim, maior qualidade. E, para testar a hipótese acima, este estudo teve como objetivo avaliar alterações nutricionais, morfoanatômicas e fisiológicas de mudas de *H. stigonocarpa*, submetidas a diferentes doses de nitrogênio, fósforo e potássio em substrato.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Condições de cultivo e delineamento experimental

O experimento foi conduzido no viveiro a pleno sol (17°48'28" S, 50°53'57" W), entre novembro de 2018 e julho de 2019. O clima para a região é do tipo Aw (tropical), com chuvas em dezembro, janeiro e fevereiro com mais de 250 mm por mês. A precipitação anual varia entre 1.600 e 1.900 mm e a temperatura média anual entre 19° e 20° C (Alvarez et al., 2014). Durante a condução do experimento (INMET, 2020), os meses mais chuvosos na região estudada foram novembro 2018 e fevereiro 2019 com precipitação de 233 e 249 mm, respectivamente (Fig. 1) já os meses mais secos foram junho e julho de 2019 com 0,0 mm. A temperatura máxima se manteve entre 28° a 31° C, sendo janeiro e fevereiro os meses mais quentes.



**Fig. 1.** Dados climáticos durante a condução do experimento no Município de Rio Verde – GO, entre novembro de 2018 e julho de 2019 (Fonte: INMET, 2020).

As sementes de *Hymenaea stigonocarpa* (jatobá-do-Cerrado) foram coletadas na mata nativa (17°47'12" S e 50°57'48" W), localizada no Município de Rio Verde, Estado de Goiás, Brasil. Por apresentar dormência tegumentar, as sementes foram escarificadas com lixadeira elétrica na região oposta ao hilo e imersas em água pelo período de 24 horas em temperatura ambiente, segundo a metodologia modificada de Santos et al. (2011).

O delineamento adotado foi inteiramente ao acaso, com quatro repetições, e cada uma foi constituída por oito unidades amostrais e cinco doses de nitrogênio (0, 75, 150, 225, 300 g m<sup>-3</sup> de N: ureia - 45% de N), cinco doses de fósforo (0, 150, 300, 450 e 600 g m<sup>-3</sup> de P: superfosfato triplo - 46% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 12% Ca) e cinco doses de potássio (0, 40, 80, 120 e 160 g m<sup>-3</sup> de K: cloreto de potássio - 60% K<sub>2</sub>O e 48% de Cl). A adubação de base foi incorporada juntamente ao substrato e adubação de cobertura aplicada aos 90 e 120 dias após a emergências das mudas na forma de solução nutritiva utilizando ureia (fonte de N) e cloreto de potássio (fonte de K), calculados, de acordo com cada tratamento seguindo as recomendações de Gonçalves e Benedetti (2005), como demonstrado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Adubação de base e cobertura aplicada para produção de mudas de *Hymenaea stigonocarpa* durante a fase de viveiro.

Tratamentos	Adubação de base		
	Doses de nitrogênio (Ureia)	Doses de fósforo (Superfosfato triplo)	Doses de potássio (Cloreto de potássio)
	-----g m <sup>-3</sup> -----		
T1	0	0	0
T2	75	150	40
T3	150	300	80
T4	225	450	120
T5	300	600	160

Tratamentos	Adubação de cobertura					
	Experimento de N		Experimento de P		Experimento de K	
	N	K	N	K	N	K
	-----g-----					
T1	0	0,8	3,2	0,8	3,2	0
T2	1,6	0,8	3,2	0,8	3,2	0,4
T3	3,2	0,8	3,2	0,8	3,2	0,8
T4	4,8	0,8	3,2	0,8	3,2	1,2
T5	6,4	0,8	3,2	0,8	3,2	1,6

A formulação do substrato utilizado para produção das mudas consistiu da mistura de casca de arroz carbonizada, vermiculita de textura média e lodo suíno, compostado e solarizado (Tabela 2), na proporção de 1:1:1, dispostos em tubetes de 100 cm<sup>3</sup>. Foi acompanhada a irrigação via aspersão, com o turno de rega de 15 minutos, três vezes ao dia (6, 10 e 17 horas), lâmina de 8 mm por m<sup>2</sup>. A escolha do substrato e tamanho do recipiente, foram selecionados através de estudos internos do grupo de

pesquisa por apresentar certo diferencial nas características morfofisiológicas no cultivo das mudas de *H. stigonocarpa*.

**Tabela 2.** Caracterização química do substrato à base de casca de arroz carbonizada, vermiculita e lodo suíno.

pH	V	M.S.	N	P	K	Ca	Mg	C.O.	C/N
	.....%		.....mg dm <sup>-3</sup> .....						
7,26	86,78	63,35	26,72	21,77	1,50	231,94	11,18	88,20	3,30

pH: potencial hidrogeniônico, V: saturação de bases, M.S.: matéria seca, N: nitrogênio, P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, C.O.: carbono orgânico, C/N: relação carbono nitrogênio.

## 2.2. Análise morfofisiológica

Aos 90 e 180 dias após a disposição das sementes no substrato foram realizadas as medições biométricas de altura de planta - AP (cm) e diâmetro do caule - DC (mm). Com 210 dias foram avaliadas as trocas gasosas e a fluorescência da clorofila *a*, da concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> - Ci/Ca, condutância estomática - *g<sub>s</sub>* (mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), taxa fotossintética - *A* (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), taxa transpiratória - *E* (mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), razão entre fotossíntese e concentração interna de CO<sub>2</sub> - *A*/Ci, rendimento quântico efetivo do fotossistema II - ΦPSII, taxa de transporte de elétrons - ETR (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) e coeficiente de dissipação não fotoquímico - NPQ. A avaliação da eficiência fotoquímica (ΦPSII - ETR - NPQ) e bioquímica (Ci/Ca - *g<sub>s</sub>* - *A* - *E* - *A*/Ci) da fotossíntese utilizou o equipamento LI6400xt, Licor<sup>®</sup>, Nebraska, EUA, entre os horários das 08 e 11 horas.

## 2.3. Índice de pigmentos pelo clorofilômetro e Dualex

Os índices de clorofila *a* e *b* (Chl *a* e Chl *b*), foram avaliados com o Clorofilog (Modelo CFL1030, Falker<sup>®</sup> - Automação agrícola). Com os dados dos índices de clorofila *a* e *b*, calculou-se a razão clorofila *a* e *b* (Chl *a/b*). As medições foram realizadas no segundo a terceiro par de folhas completamente expandidas, juntamente com o uso do sensor foliar Dualex<sup>®</sup>, obtendo os índices do balaço de nitrogênio (NBI), da clorofila total (Chl *a+b*), dos flavonoides (Flav) e das antocianinas (Anth).

#### 2.4. Análise de biomassa de folha, caule e raiz

Para obtenção da biomassa, aos 250 dias após fase de viveiro, as mudas foram separadas em folhas, caules e raízes, lavadas em água destilada e secas em estufa de circulação forçada a 65-70°C. Após atingir peso constante obteve a massa seca de folhas (MSF: g planta<sup>-1</sup>), caule (MSC: g planta<sup>-1</sup>), parte aérea (MSPA: g planta<sup>-1</sup>), raiz (MSR: g planta<sup>-1</sup>) e total (MST: g planta<sup>-1</sup>), com auxílio de uma balança de precisão. A partir dos dados de crescimento e biomassa, calculou-se a razão entre altura/diâmetro (AP/DC), raiz/parte aérea (R/PA) e índice e qualidade de Dickson (IQD), segundo Dickson et al. (1960).

#### 2.5. Teor e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio

Posterior ao processo de secagem da parte aérea, as mudas de *H. stigonocarpa* foram moídas em moinho tipo Willey. Em seguida as amostras foram destinadas a análise química de tecido para obter os teores foliares de N, P e K, conforme (Embrapa, 2009). O N (N: g kg<sup>-1</sup>) foi extraído por digestão úmida com ácido sulfúrico 85% e destilação (microkjeldahl) e determinado por titulação. O fósforo (P: g kg<sup>-1</sup>) e potássio (K: g kg<sup>-1</sup>) foram extraídos por digestão seca através da queima em mufla a 500°C por 3 horas e as determinações foram feitas por colorimetria (desenvolvimento da cor azul pela formação do complexo P-Mo na presença do ácido ascórbico) e em fotômetro de chama para o P e o K, respectivamente. Com base nos dados de teor foliar e de biomassa das plantas foi estimado o acúmulo de N, P e K nas plantas (mg planta<sup>-1</sup>).

#### 2.6. Caracterização morfoanatômica da folha

Para as observações morfoanatômicas das folhas de *H. stigonocarpa* foram seccionadas 3 cm<sup>2</sup> de cada folha próximo a nervura central, fixadas em FAA<sub>70</sub> durante 24 horas. Em seguida, lavadas previamente com tampão fosfato, desidratadas em série etílica crescente (70, 80, 90 e 100%), pré-infiltradas em historesina + álcool etílico 100% (Leica, Alemanha). Logo após, o material foi cortado a 5 µm de espessura transversalmente (Micrótomo Rotativo: Modelo 1508R, Logen Scientific, China), as secções coradas com azul toluidina 0,05% em tampão fosfato 0,1 M, pH 6,8 (O'Brien et al., 1964). As imagens foram obtidas por microscopia de luz (Modelo - BX61,

Olympus, Tokyo, Japão) com a câmera DP-72 utilizando a opção de campo claro foi possível descrever anatomia do tecido foliar das faces adaxial (AdEp:  $\mu\text{m}$ ) e abaxial (AbEp:  $\mu\text{m}$ ), parênquima paliçádico (PP:  $\mu\text{m}$ ), parênquima esponjoso (SP:  $\mu\text{m}$ ), espessura do mesofilo (EsM:  $\mu\text{m}$ ) e da folha (EsF:  $\mu\text{m}$ ). Com as observações das análises morfoanatômicas utilizando o programa ImageJ, foram mensuradas as análises micromorfométricas, de cada repetição.

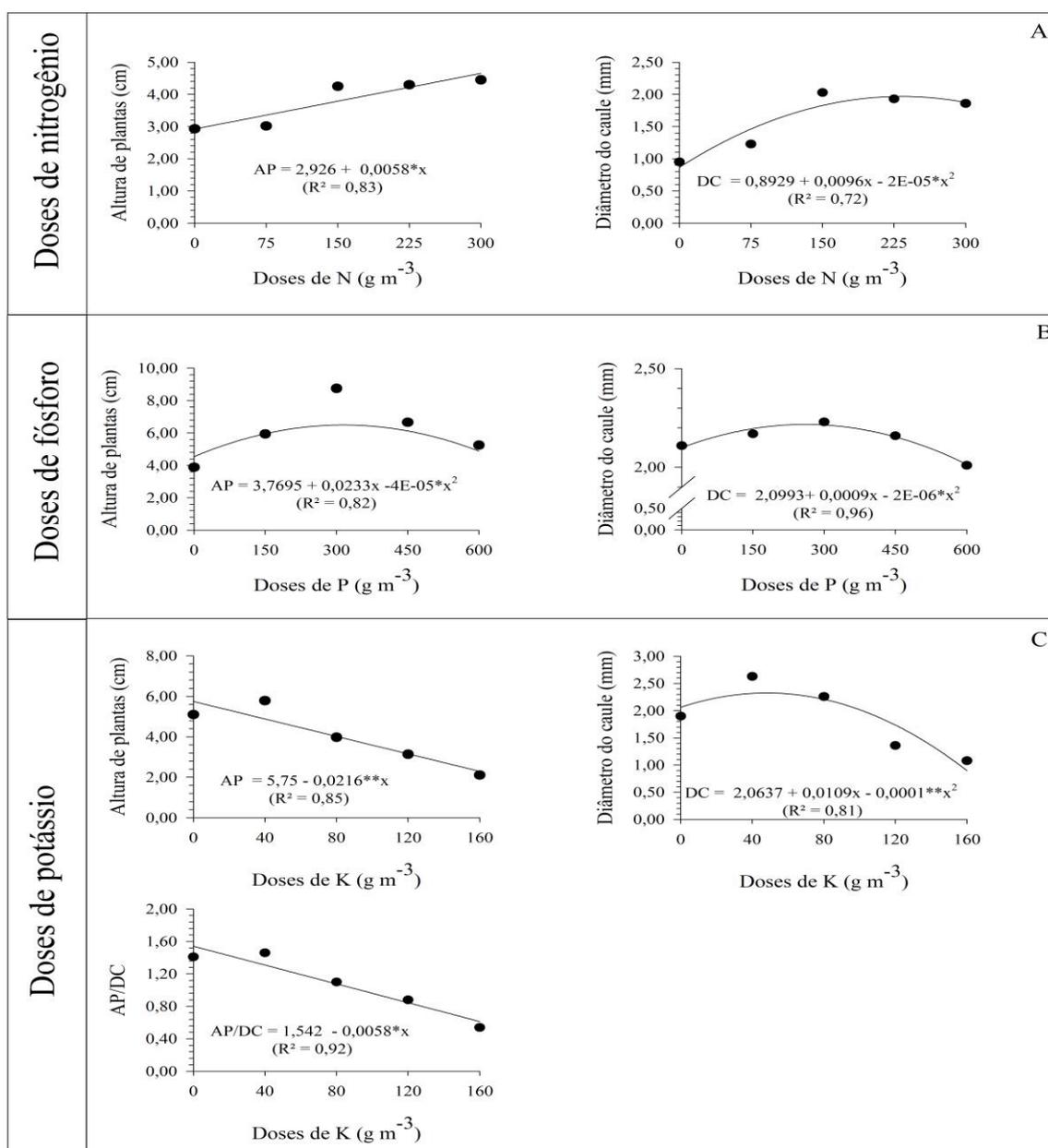
## 2.7. Análise estatística

Os dados quantitativos foram submetidos à ANOVA aplicando análise de regressão, com o programa estatístico SISVAR®, versão 5.3 (Ferreira, 2014). Todos os dados foram verificados quanto à homogeneidade de variância e normalidade dos erros (teste Levene e Shapiro Wilk), no nível de significância de 5%.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Resposta morfofisiológica

A maior altura de planta (AP) e diâmetro do caule (DC) em mudas de *Hymenaea stigonocarpa*, foram obtidos nas doses de 300 e 240  $\text{g m}^{-3}$  de nitrogênio, respectivamente (Fig. 2A). Para adubação fosfata, maiores AP e DC foram obtidos nas doses de 291,25  $\text{g m}^{-3}$  e 225  $\text{g m}^{-3}$  de fósforo, respectivamente (Fig. 2B). Como aumento das doses de potássio houve redução da AP e da razão AP/DC. O maior valor de DC foi obtido com 54,5  $\text{g m}^{-3}$  de K (Fig. 2C).

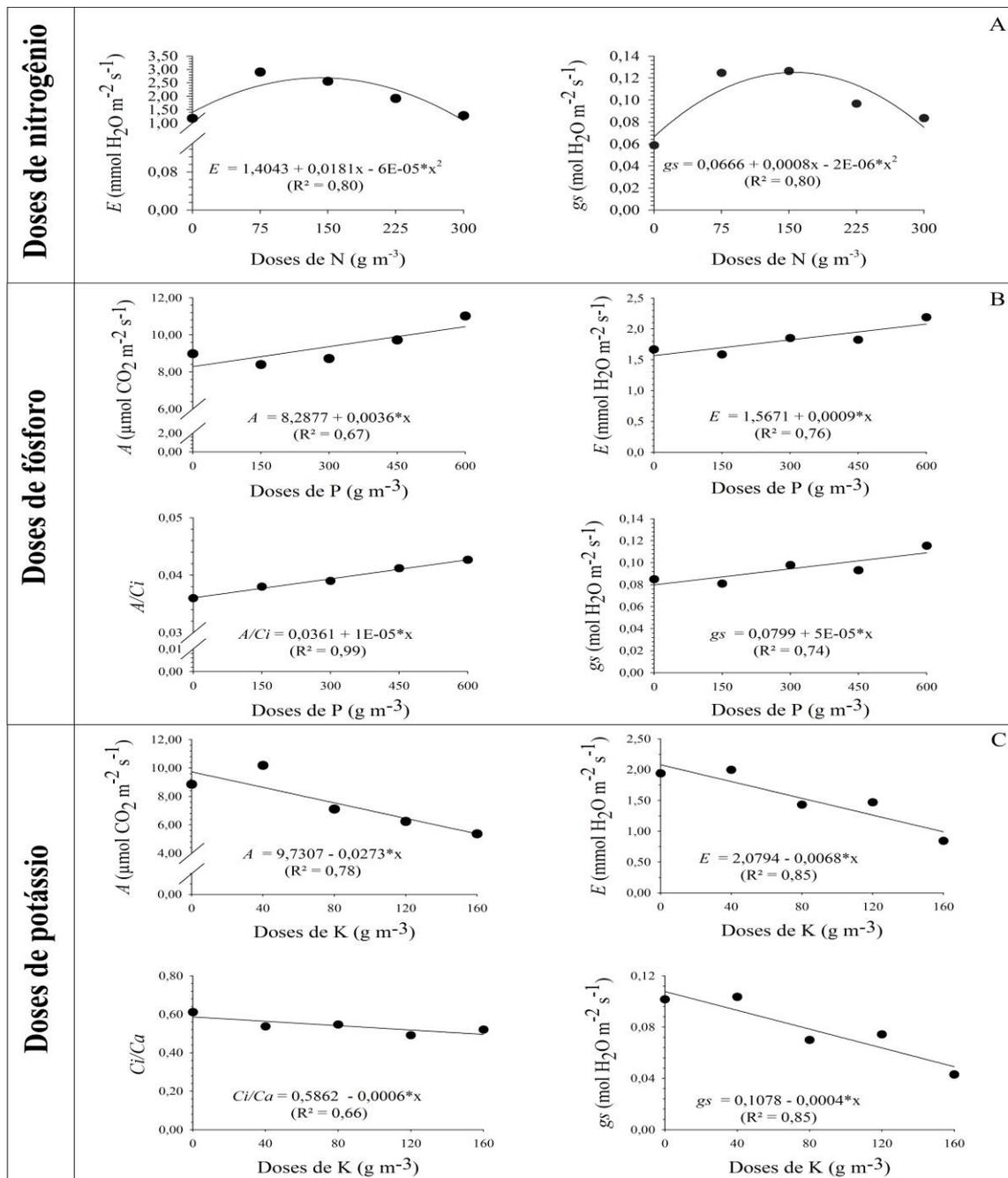


**Fig. 2.** Altura de plantas (AP), diâmetro do caule (DC) e razão altura/diâmetro do caule (AP/DC) aos 180 dias de mudas de *H. stigonocarpa* em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).

A taxa transpiratória ( $E$ ) e a condutância estomática ( $g_s$ ) aumentaram até as doses de  $150,83 \text{ g m}^{-3}$  e  $200 \text{ g m}^{-3}$  de nitrogênio, respectivamente (Fig. 3A). Em relação à taxa fotossintética ( $A$ ), concentração interna/externa de  $\text{CO}_2$  ( $C_i/C_a$ ) e razão entre fotossíntese/concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $A/C_i$ ), não foram ajustados modelos em função das doses de N.

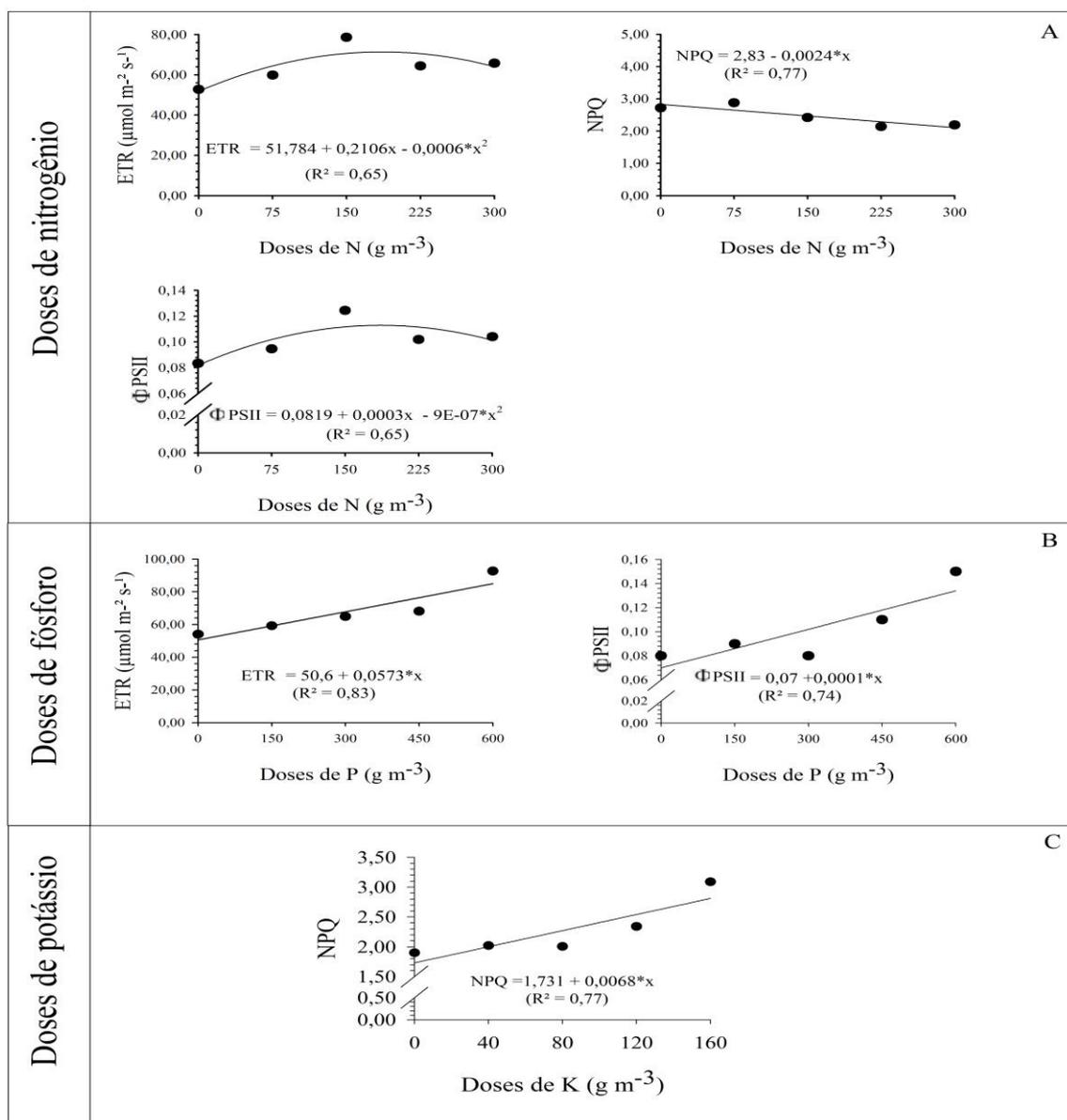
$A$ ,  $g_s$ ,  $E$  e  $A/C_i$ , aumentaram linearmente com a adição das doses de fósforo ( $600 \text{ g m}^{-3}$ ), por outro lado, a concentração  $C_i/C_a$  não ajustou aos modelos matemáticos

em função das doses de P (Fig. 3B). Com o aumento das doses de potássio (160 g m<sup>-3</sup>) houve reduções da  $A$ ,  $E$ ,  $g_s$  e  $Ci/Ca$  (Fig. 3 C). A razão  $A/Ci$ , não ajustou a nenhum modelo em função das doses de K (Fig. 3C).



**Fig. 3.** Taxa fotossintética ( $A$ ), condutância estomática ( $g_s$ ), taxa transpiratória ( $E$ ) concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> ( $Ci/Ca$ ) e razão entre fotossíntese e concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $A/Ci$ ) aos 210 dias de mudas de *H. stigonocarpa* em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).

Para o rendimento quântico efetivo do fotossistema II ( $\Phi$ PSII) e a taxa de transporte de elétrons (ETR) obtiveram os maiores valores estimados com 166,67 g m<sup>-3</sup>, 175,5 g m<sup>-3</sup> de N, respectivamente (Fig. 4A). A dissipação não fotoquímica (NPQ) reduziu com o aumento das doses de N (Fig. 4A). Com as doses do P houve incremento do rendimento quântico  $\Phi$ PSII e da ETR (Fig. 4B). A NPQ não se ajustou aos modelos em função da dose de P (Fig. 4B). Com as doses de K houve aumento da dissipação não quântica de elétrons (160 g m<sup>-3</sup>) e não houve ajuste para o rendimento quântico do  $\Phi$ PSII e a ETR (Fig. 4C).

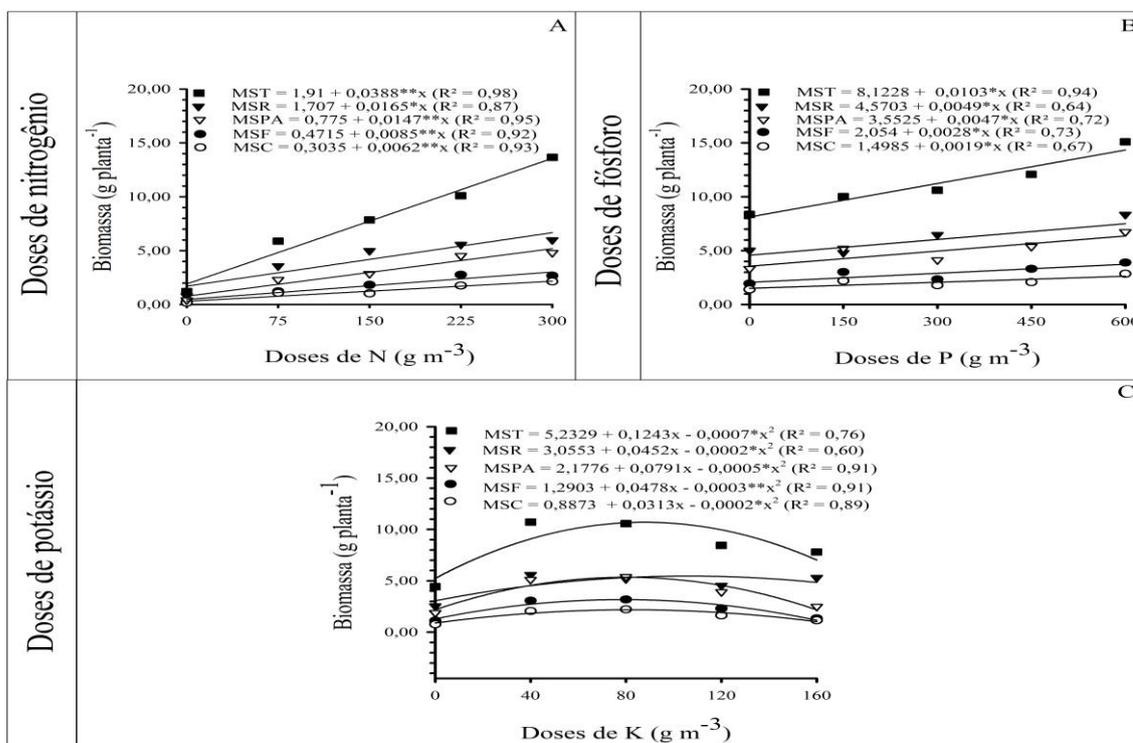


**Fig. 4.** Rendimento quântico efetivo do fotossistema II ( $\Phi$ PSII), taxa de transporte de elétrons (ETR) e coeficiente de dissipação não fotoquímica (NPQ) aos 210 dias de

mudas de *H. stigonocarpa* em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).

### 3.2. Partição e alocação de biomassa

A biomassa de folhas (MSF), caule (MSC), parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST) apresentaram ajuste linear em função das doses de N e P (Fig. 5 A e B). Em função das doses de K os maiores valores de MSF, MSC, MSPA, MSR e MST foram obtidos com 79,67; 78,25; 79,1; 113 e 88,78 g m<sup>-3</sup> de K, respectivamente (Fig. 5C).

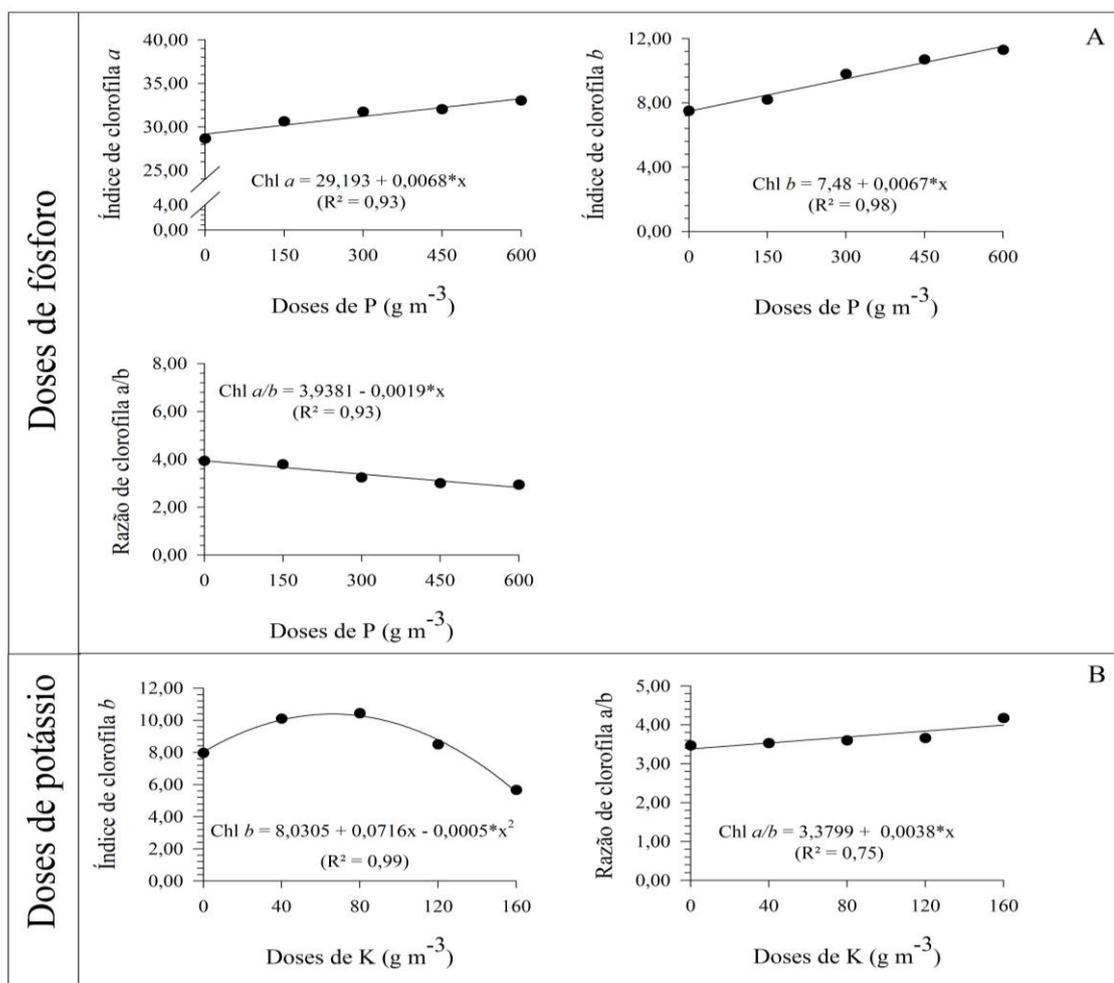


**Fig. 5.** Massa seca foliar (MSF), massa seca caulinar (MSC), massa seca radicular (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST) aos 250 dias de mudas de *H. stigonocarpa* em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).

### 3.3. Índices de pigmentos

Os índices de clorofila *a* (Chl *a*), *b* (Chl *b*) e razão clorofila *a/b* (Chl *a/b*) não ajustaram aos modelos matemáticos em função das doses de nitrogênio. Houve aumento

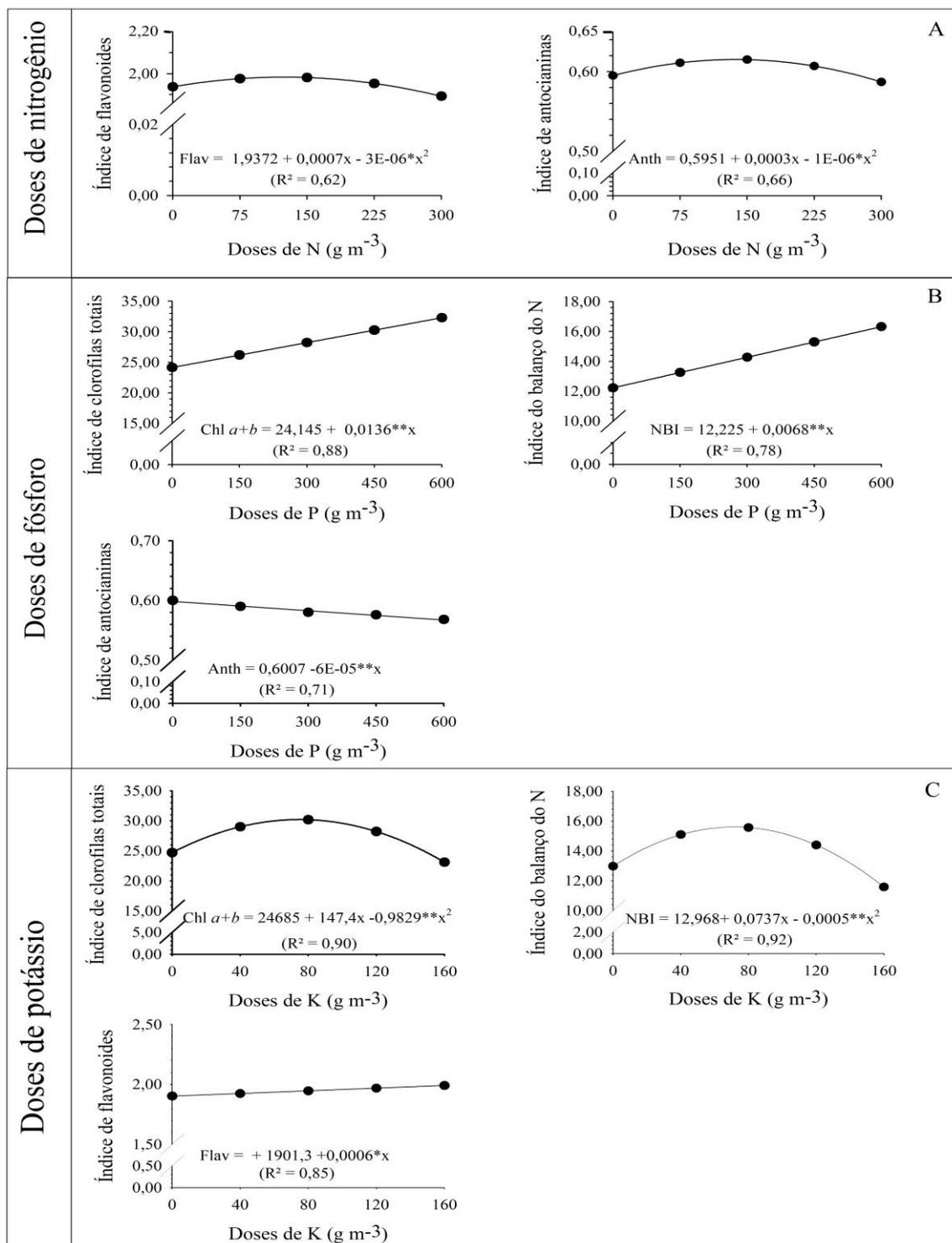
linear dos índices de Chl *a* e Chl *b*, enquanto a razão Chl *a/b* reduziu em função da elevação das doses de fósforo (Fig. 6A). Com a adubação potássica houve incremento dos teores da Chl *b* até a dose de 53,12 g m<sup>-3</sup> de K e incremento linear da razão Chl *a/b* (Fig. 6B). Não houve ajuste dos índices de Chl *a* em função das doses de K.



**Fig. 6.** Índice de clorofila *a* (Chl *a*), clorofila *b* (Chl *b*) e razão entre clorofila *a/b* (Chl *a/b*) aos 210 dias de mudas de *H. stigonocarpa* em resposta às doses de fósforo (A) e potássio (B).

A adubação nitrogenada não alterou os índices de clorofilas totais (Chl *a+b*) e balanço do nitrogênio (NBI). No entanto, constatou-se resposta positiva para as variáveis antocianinas (Anth) e flavonoides (Flav), nas doses de 150 g m<sup>-3</sup> e 122,63 g m<sup>-3</sup> de N (Fig. 7A) ajustados ao modelo quadrático. Com o aumento das doses de fósforo houve o incremento dos índices de Chl *a+b* e NBI nas folhas e diminuição da Anth, na dose máxima estimada de 600 g m<sup>-3</sup> de P (Fig. 7B). Já adubação potássica influenciou a

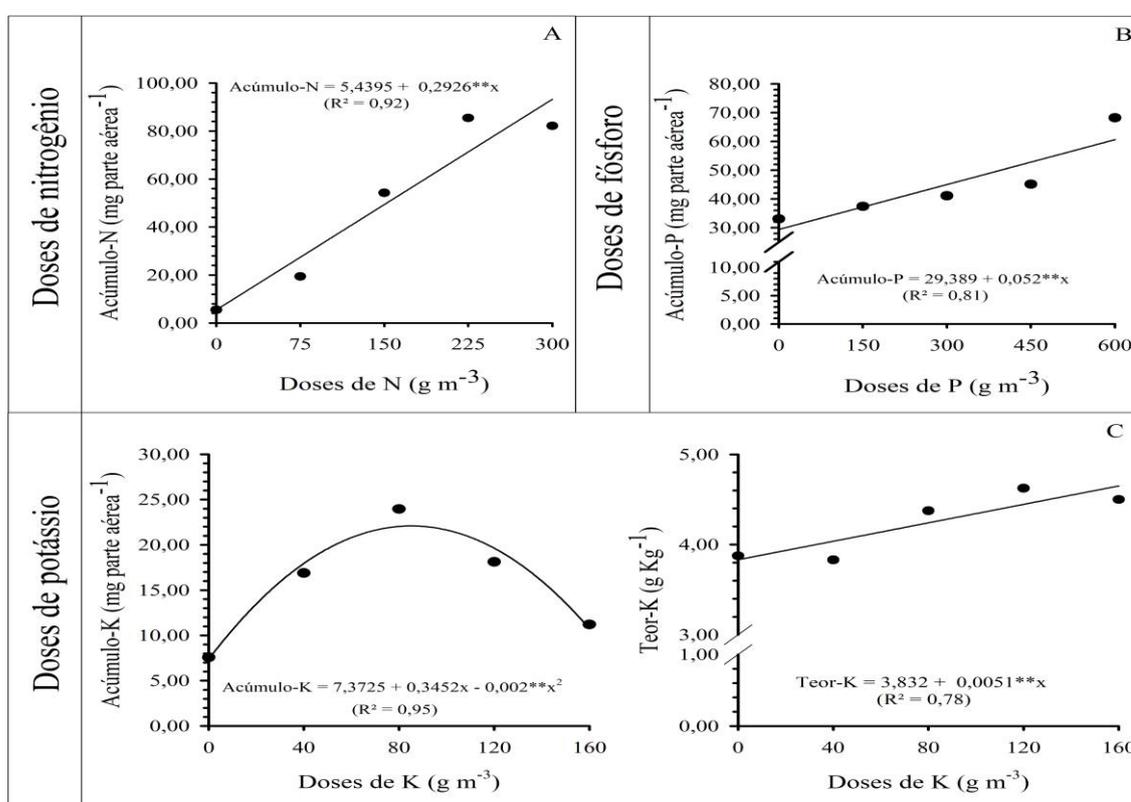
Chl  $a+b$ , NBI e Flav seguindo modelo quadrático e linear, obtidos nas doses de 74,98 g  $m^{-3}$ , 73,7 g  $m^{-3}$  e 160 g  $m^{-3}$  de K, respectivamente (Fig. 7C).



**Fig. 7.** Índice de clorofilas totais (Chl  $a+b$ ), flavonoides (Flav), antocianinas (Anth) e do balanço do nitrogênio (NBI), aos 210 dias de mudas de *H. stigoncarpa* em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).

### 3.4. Eficiência nutricional

Na parte aérea das mudas, os teores nitrogênio e fósforo não apresentaram diferença em função das doses de N e P, respectivamente. No entanto, nos níveis mais elevados da adubação nitrogenada ( $300 \text{ g m}^{-3}$ ) e adubação fosfatada ( $600 \text{ g m}^{-3}$ ) promoveram ajuste linear crescente para o acúmulo de N e P (Fig. 8A-B). Comportamento inverso ocorreu para o teor e acúmulo de potássio na parte aérea que responderam de forma linear crescente e quadrática, obtidas nas doses de 160 e  $86,3 \text{ g}$  de K por  $\text{m}^{-3}$  de substrato, respectivamente (Fig. 8C).



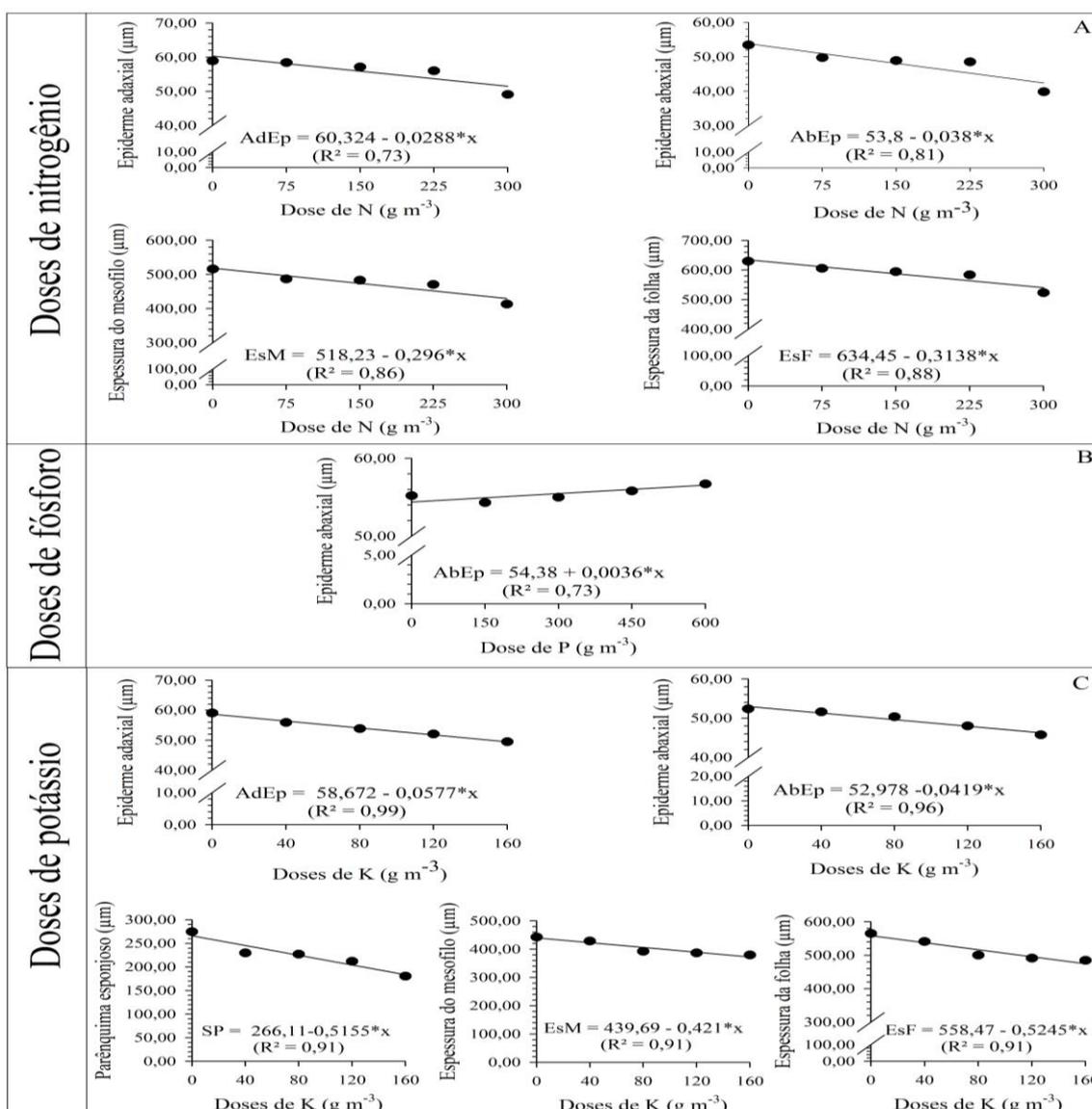
**Fig. 8.** Teor e acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) contidos na parte aérea aos 250 dias de mudas de *H. stigonocarpa* em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).

### 3.5. Micromorfometria foliar

Houve a redução para as espessuras da epiderme da face adaxial (AdEp - 16,70%), face abaxial (AbEp - 25,46%), mesofílica (EsM - 19,99%) e da folha (EsF - 16,92%), nas mudas submetidas à dose máxima de  $300 \text{ g m}^{-3}$  de N, quando comparada

ao controle (Fig. 9A). O parênquima paliçádico (PP) e esponjoso (SP) não apresentaram diferença em relação ao controle, para a adubação nitrogenada.

Incremento na espessura da AbEp (28,03%), foi obtido na maior dose de 600 g m<sup>-3</sup> de fósforo (Fig. 9B). As espessuras da AdEp, PP, SP, EsM e EsF não foram afetadas pela adubação fosfatada. As doses de potássio também promoveram a redução da espessura da AdEp (16,25%), AbEp (12,57%), SP (34,29%), EsM (14,33%) e EsF (14,19%), exposta a dose de 160 g m<sup>-3</sup> de K (Fig. 9C). No entanto, a adubação potássica não promoveu alteração significativa do PP em comparação com o controle.

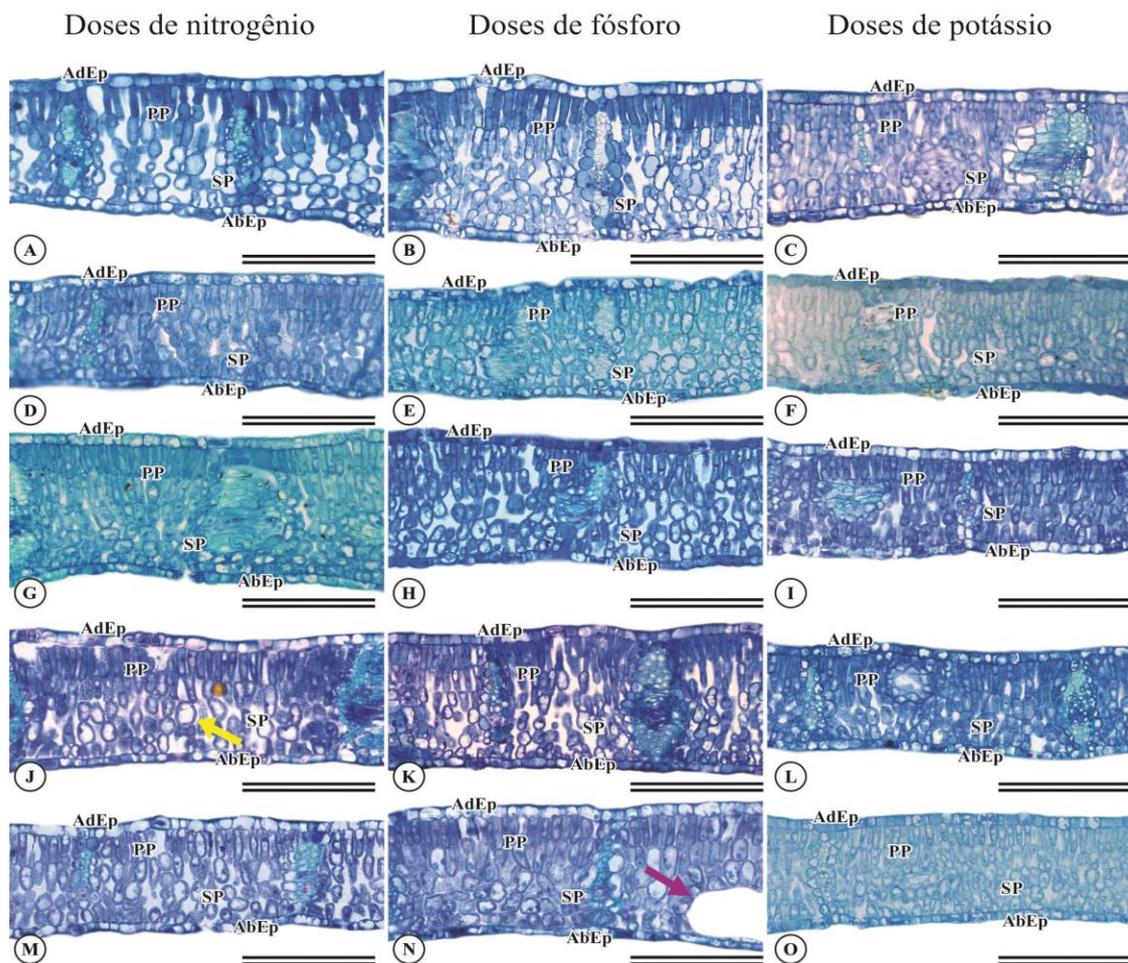


**Fig. 9.** Epiderme adaxial (AdEp), Epiderme abaxial (AbEp), Parênquima paliçádico (PP), Parênquima esponjoso (SP), Espessura do mesofilo (EsM) e Espessura da folha (EsF) aos 210 dias de mudas de *H. stigonocarpa* em resposta às doses de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).

### 3.6. Descrição morfoanatômica das mudas de *Hymenaea stigonocarpa*

A epiderme foliar das mudas de *H. stigonocarpa* são unisseriadas em ambas as faces adaxial e abaxial. Existe a presença de canal secretor, como pode ser observado na Figura 9N. Espécie de metabolismo fotossintético C3. Os feixes vasculares são do tipo colateral, constituídos por fibras na porção inferior e superior do feixe; as folhas classificadas em anfiestomáticas. O mesofilo é heterogêneo dorsiventral composto de duas camadas de células justapostas de parênquima paliçádico e três a quatro camadas de células isodiamétricas do parênquima esponjoso, com poucos espaços intercelulares. Na Figura 10J, constatou-se danos no parênquima clorofiliano compostas de células anômalas, impossibilitando a distinção dos parênquimas esponjoso e paliçádico.

O aumento da adubação nitrogenada (Fig. 10A-D-G-J-M) e potássicas (Fig. 9C-F-I-L-O), levou a redução da espessura do parênquima foliar. Com aumento das doses de fósforo houve incremento apenas na epiderme abaxial das mudas de *H. stigonocarpa* (Fig. 9B-E-H-K-N).



**Fig. 10.** Estrutura da anatomia foliar aos 210 dias de mudas de *Hymenaea stigonocarpa*, submetidos às doses de nitrogênio (0, 75, 150, 225, 300 g m<sup>-3</sup> de N: A, D, G, J, M), fósforo (0, 150, 300, 450, 600 g m<sup>-3</sup> de P: B, E, H, K, N) e potássio (0, 40, 80, 120, 160 g m<sup>-3</sup> de K: C, F, I, L, O). As setas indicam dano no parênquima clorofiliano (J) e canal secretor (N). Abreviaturas correspondem: Epiderme Adaxial (AdEp), Epiderme Abaxial (AbEp), Parênquima Paliçádico (PP) e Parênquima Esponjoso (SP). Barras de escalas: 200 µm.

#### 4. DISCUSSÃO

A adubação nitrogenada aumentou a altura, diâmetro e a biomassa das mudas de *Hymenaea stigonocarpa*. Os resultados mostram, ainda, efeito de diluição, mesmo que não tenha sido observado resposta significativa para o teor de N na parte aérea. Esse efeito de diluição ocorreu porque houve crescimento e acúmulo de matéria seca, em relação ao teor de N absorvidos pelas mudas, diminuindo a concentração do mesmo nos

tecidos (Jarrell e Beverly et al., 1981). Caso o nitrogênio se encontre presente em concentração adequada, permite a captação e transporte de N, assimilação, translocação e remobilização para os processos bioquímicos e fisiológicos envolvidos com o metabolismo do N, presente em uma série de molécula formando os aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, essenciais ao crescimento e a produção de biomassa das mudas (Wang et al., 2014).

Os dados de transpiração (E) e condutância estomática (gs) do experimento com nitrogênio, sugerem que não há limitações difusivas, porém, a relação da  $C_i/C_a$  e  $A/C_i$ , não foram afetadas. Portanto, nem sempre uma planta que respira mais apresenta maior taxa fotossintética, como constatada neste estudo. O aumento da ETR e do  $\Phi PSII$ , quanto o decréscimo do NPQ estão associadas a maior eficiência na utilização de energia na etapa fotoquímica para a redução e fosforilação do  $NADP^+/ADP$ . No entanto, a redução do NPQ e a ausência de resposta da taxa fotossintética líquida são indicativos de fotoinibição pela não redução da transmissão de elétrons à difusão de  $CO_2$ . Esses impactos negativos sobre processo fotossintético reduz a atividade da Rubisco, regulando de forma negativa essa enzima (Jin et al., 2015) permitindo o aumento da fotorrespiração, como mecanismo de proteção para a dissipação desses elétrons (Voss et al., 2013). Isso porque o excesso de N em plantas de metabolismo fotossintético C3, como a espécie de estudo, reduz a assimilação de carbono (C) (Sage et al., 1987; Evans, 1989), em condições de deficiência, ocorre a perda de energia na forma de calor justamente pelo Ciclo da Xantofilas (Chen e Cheng, 2003).

A falta de resposta dos índices da Chl *a* e Chl *b*, à adubação nitrogenada pode estar ligada a fotoinibição, pois não teve absorção da fotossíntese líquida, mas houve o aumento da eficiência fotoquímica e dos pigmentos acessórios para inibir danos por foto-oxidação. Em função disso, possivelmente ocorreu direcionamento da energia no incremento dos índices de Flav e Anth nas folhas, tidos como metabolitos de defesa na proteção contra o estresse oxidativo (Zhou et al., 2012; Wen et al., 2020), que inibiu o aumento da atividade fotossintética. A diminuição do NPQ e a não alteração da razão  $C_i/C_a - A/C_i$  levaram a outras formas de dissipação do excesso de energia. O aparecimento de danos no parênquima clorofiliano (Fig. 9N), assim como a redução da epiderme foliar e o aumento do acúmulo de N no vacúolo, sugere efeito fotoinibição provavelmente a nível de tecido e metabólico.

Constatou-se que a adubação fosfatada influenciou de forma positiva os parâmetros biométricos e de trocas gasosas. Tanto o aumentou do acúmulo de matéria

seca das mudas, resposta típica do efeito diluição, havendo a produção de biomassa, mas não o teor de fósforo. Todos esses resultados indicam que o Ca superfosfato triplo exerceu influência na ativação das enzimas responsáveis por transferir agrupamento fosfato para apoiar o bombeamento de prótons durante a ativação da ATPase na falta do gradiente eletroquímico, auxiliado a entrada de P nos plastídios, através da cálcio-calmodulina (Sanders et al, 2002; Zou et al., 2010).

As doses de P, aumentou ETR e  $\Phi$ PSII indicando que o Ciclo de Calvin está sendo mediado pelas reações de fosforilação reguladas pela enzima Rubisco. Com isso, as mudas de *H. stigonocarpa* puderam direcionar sua energia luminosa para os processos assimilatórios (Malhotra et al., 2018), e não só culminou em alterações fisiológicas, mas também metabólicas, elevando os índices de clorofila, seguidos do índice de antocianina nas folhas. Nesse caso, as mudas estão investindo em Chl $a$ , Chl $b$  e Anth para melhor captação da radiação fotossinteticamente ativa e promover a proteção contra a foto-oxidação consumindo os elétrons destinado a formação das Espécies Reativas de Oxigênio (EROs) (Karageorgou e Manetas, 2006). Observou-se ainda, nesta espécie, aumento da epiderme foliar, proporcionando rápida e dinâmica difusão de gases. Essa melhoria da estrutura do tecido, a nível histológico das folhas pode estar relacionada com o Ca do superfosfato triplo. Uma vez que o Ca, está diretamente ligado a divisão e crescimento do volume das células, além de apresentar folhas mais delgadas com a área foliar menor (Sanders et al, 2002; Aliniaiefard et al., 2020).

A redução da altura e o aumento do teor de potássio na parte aérea, assim como o decréscimo na produção e acúmulo de massa seca após a dose estimada de 80 g m<sup>-3</sup> de K, sugerem efeito de concentração. O declínio da taxa de crescimento relativo poder ser atribuído ao desbalanço nutricional do K por efeito de competição pelos sítios de troca, além de reduzir à absorção de outros cátions, e também pode estar associado a toxicidade dos ânions de Cl<sup>-</sup>. Sobretudo, por induzir o aumento progressivo dos níveis de K na parte aérea transcolado para o vacúolo (Geilfus, 2018). Ainda, nas mudas, adubadas com potássio houve o decréscimo na eficiência de carboxilação da A, g $s$ , E e Ci/Ca, indicando limitações difusivas. Tais restrições afetam a taxa de consumo de elétrons, ATP e NADPH, necessários na etapa bioquímica durante a fixação de carbono (Hafsi et al., 2016). Esse efeito negativo sobre processo fotossintético pode ser explicado pelo aumento da relação Chl  $a/b$  e do coeficiente de NPQ, reduzindo o teor de carboidratos, substrato necessário para promover o crescimento. Isso significa que as mudas estão absorvendo mais luz, no qual realmente consegue processar, dissipando

parte dos elétrons pelo Ciclo da Xantofilas na forma de calor (Marin-Guirao et al., 2013). Contribuindo, para uma possível redução do Ciclo de Calvin, levando a danos oxidativos, induzido a formação de EROs, afetando a cadeia de transporte de elétrons (Hafsi et al., 2017).

A dissipação térmica do NPQ, não foi o principal mecanismo de defesa constitutiva para proteção do excesso de energia nos centros de reação, contra os efeitos deletérios causados por essas EROs. Houve, ainda, o aumento do índice de Flav nas folhas, levando a ativação dos mecanismos de defesas induzidas (Hafsi et al., 2016; Lucini et al., 2016). A síntese de Flav é ativada pela enzima fenilalanina amônia-liase (PAL) na via de biossíntese dos compostos fenólicos, resultante da rota do ácido chiquímico. Além disso, observou-se resposta para o NBI, pois que os compostos fenólicos representam um ponto de ramificação entre o metabolismo nitrogênio, primário e secundário para a biossíntese de flavonoides em plantas submetidas a condição de estresse (Mandal et al., 2010). Ou seja, o excesso potássio acumulado no vacúolo, permitiu maior produção de compostos fenólicos nas folhas que, ao restringir a concentração interna de CO<sub>2</sub>, levam conseqüentemente à quebra de amido e proteínas gerando ATP ou agentes redutores, mesmo sob concentrações tóxicas de Cl<sup>-</sup>, para tentar manter a atividade da Rubisco por meio do ajustamento osmótico. Esse ajustamento osmótico permite a manutenção da turgescência celular e, conseqüentemente, do metabolismo fotossintético através de suas funções osmoprotetoras (Hasanuzzaman et al. 2018).

As folhas expostas as doses menores de K está formando um tecido mais esponjosos com mais espaços intercelulares, ao ampliar a adubação potássica começa a compactar o mesofilo foliar. Essas alterações podem estar relacionadas a toxidez de Cl<sup>-</sup>, da adubação potássica por meio do cloreto de potássio, a nível metabólico, e não estrutural. Portanto, uma forma para tentar minimizar esse fator de estresse, é promover o alongamento celular e aumento da área foliar total (Wag et al., 2013; Hafsi et al. 2014) das mudas de *H. stigonocarpa*, respostas comuns ao suprimento de K.

## 5. CONCLUSÕES

A adubação nitrogenada aumentou o crescimento, eficiência fotoquímica, índice de antocianinas, índice de flavonoides, produção e acúmulo de biomassa na dose

de 300 g m<sup>-3</sup> de N. E inibiu a difusão de CO<sub>2</sub> da fotossíntese líquida por efeito de foto-inibição, e ainda, reduziu a mesofilo foliar.

A adubação fosfatada aumentou o crescimento, índice de clorofila *a* e *b*, índice de antocianinas, epiderme abaxial, biomassa e acúmulo de P, por efeito de diluição obtida na dose de 600 g m<sup>-3</sup> de P.

A adubação potássica reduziu o crescimento, parênquima clorofiliano e as trocas gasosas, por limitação difusiva e pelo efeito de concentração, com exceção da razão Chl *a/b* e do NPQ que aumentou. Já a maior biomassa e acúmulo de K foram encontradas na dose estimada de 80 g m<sup>-3</sup> de K em mudas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne.

## 6. AGRADECIMENTOS

À CAPES e a FAPEG pela concessão da bolsa, ao Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais, Laboratório de Anatomia Vegetal, Laboratório de Química Agrícola, Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal e o Laboratório de Análise de Solo e Tecido Foliar. Ao IF Goiano – Campus Rio Verde, e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia.

## 7. REFERÊNCIAS

- Aliniaiefard S., Shomali A., Seifikalhor M., Lastochkina O., 2020. Calcium Signaling in Plants Under Drought. In: Hasanuzzaman M., Tanveer M. (eds) Salt and Drought Stress Tolerance in Plants. Signaling and Communication in Plants. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40277-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40277-8_10)
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift 22, 711–728. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Bhattacharya, A. 2019. Changing Environmental Condition and Phosphorus-Use Efficiency in Plants. Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants, 241–305. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-816209-5.00005-2>
- Boniface, P.K., Ferreira, S.B., Kaiser, C.R., 2017. Current state of knowledge on the traditional uses, phytochemistry, and pharmacology of the genus *Hymenaea*. Journal of Ethnopharmacology 206, 193–223. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jep.2017.05.024>

- Chen, L., Cheng, L., 2003. Both xanthophyll cycle-dependent thermal dissipation and the antioxidant system are up-regulated in grape (*Vitis labrusca* L. cv. Concord) leaves in response to N limitation. *Journal of Experimental Botany* 54, 2165–2175. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg220>
- Costa, A.C., Rezende-Silva, S.L., Megguer, C.A., Moura, L.M.F., Rosa, M., Silva, A.A., 2015. The effect of irradiance and water restriction on photosynthesis in young jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*) plants. *Photosynthetica* 53, 118–127. <http://doi.org/10.1007/s11099-015-0085-6>
- Dickson, A., Leaf, A.L., Hosner, J.F., 1960. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *Forest Chronicle* 36, 10–13. <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2009. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília – DF: Embrapa Informação Tecnológica.
- Evans, J.R., 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. *Oecologia*, 78, 9–19. <https://doi.org/10.1007/BF00377192>
- Ferreira, D.F., 2014. Sisvar: A Guide for Its Bootstrap Procedures in Multiple Comparisons. *Ciência e Agrotecnologia* 38, 109-112. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>
- Geilfus, C., 2018. Chloride: from nutrient to toxicant. *Plant and Cell Physiology* 59, 877–886. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcy071>
- Gonçalves, J.L.M., Benedetti, V., 2005. Nutrição e fertilidade florestal. Piracicaba: IPEF, 427p.
- Hafsi, C., Debez, A., Abdelly, C., 2014. Potassium deficiency in plants: Effects and signaling cascades. *Acta Physiologiae Plantarum* 36, 1055–1070. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1491-2>
- Hafsi, C., Falleh, H., Saada, M., KsourI, R., Abdelly, C., 2017. Potassium deficiency alters growth, photosynthetic performance, secondary metabolites content, and related antioxidant capacity in *Sulla carnosa* grown under moderate salinity. *Plant Physiology and Biochemistry* 118, 609–617. <http://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.08.002>
- Hafsi, C., Falleh, H., Saada, M., Rabhi, M., Mkadmini, K., Ksouri, R., Abdelly, C., Smaoui, A., 2016. Effects of potassium supply on growth, gas exchange, phenolic composition, and related antioxidant properties in the forage legume *Sulla carnosa*. *Flora* 223, 38 – 45. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2016.04.012>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M.B., Nahar, K., Hossain, M.S., Mahmud, J.A., Hossen, M.S., Masud, A.A.C., Moumita, Fujita, M., 2018. Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy* 8, 1–29. <http://doi.org/10.3390/agronomy8030031>

- Hind, G., Nakatani, H. Y., Izawa, S., 1969. The role of  $\text{Cl}^-$  in photosynthesis I. The  $\text{Cl}^-$  requirement of electron transport. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics* 172, 277–289. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(69\)90070-X](https://doi.org/10.1016/0005-2728(69)90070-X)
- Jarrell, W.M., Beverly, R.B., 1981. The Dilution Effect in Plant Nutrition Studies. *Advances in Agronomy* 34, 197–224. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60887-1](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60887-1)
- Jin, X., Yang, G., Tan, C., Zhao, C., 2015. Effects of nitrogen stress on the photosynthetic  $\text{CO}_2$  assimilation, chlorophyll fluorescence, and sugar-nitrogen ratio in corn. *Scientific Reports* 9311, p. 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep09311>
- Kumar, P., Kumar, T., Singh, S., Tuteja, N., Prasad, R., Singh, J., 2020. Potassium: A Key Modulator for Cell Homeostasis. *Journal of Biotechnology* 324, 198–210. <http://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.10.018>
- Karageorgou, P., Manetas, Y., 2006. The importance of being red when young: Anthocyanins and the protection of young leaves of *Quercus coccifera* from insect herbivory and excess light. *Tree Physiology* 26, 613–621. <http://doi.org/10.1093/treephys/26.5.613>
- Kaur, B., Kaur, G., Asthir, B., 2017. Biochemical aspects of nitrogen use efficiency: An overview. *Journal of Plant Nutrition* 40, 506–523. <http://doi.org/10.1080/01904167.2016.1240196>
- Lucini, L., Borgognone, D., Roupheal, Y., Cardarelli, M., Bernardi, J., Colla, G., 2016. Mild potassium chloride stress alters the mineral composition, hormone network, and phenolic profile in artichoke leaves. *Frontiers in Plant Science* 7, 1–11. <http://doi.org/10.3389/fpls.2016.00948>
- Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., Pandey, R., 2018. Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess. In: Hasanuzzaman, M., Fujita, M.; Oku, H., Nahar, K., Hawrylak-Nowa, B. ed. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 171–190. <http://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8>
- Mandal, S.M., Chakraborty, D., Dey, S., 2010. Phenolic acids act as signaling molecules in plant-microbe symbioses. *Plant Signaling and Behavior* 5, 359–368. <http://doi.org/10.4161/psb.5.4.10871>
- Marin-Guirao, L., Ruiz, J.M., Sandoval-Gil, J.M., Bernardeau-Esteller, J., Stinco, C.M., Meléndez-Martínez, A., 2013. Xanthophyll cycle-related photoprotective mechanism in the Mediterranean seagrasses *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* under normal and stressful hypersaline conditions. *Aquatic Botany* 109, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2013.03.006>
- Sage, R.F., Pearcy, R.W., Seemann J.R., 1987. The Nitrogen Use Efficiency of C3 and C4 Plants. *Plant Physiology* 85, 355–359. <https://doi.org/10.1104/pp.85.2.355>
- Sanders, D., Pelloux, J., Brownlee, C., Harper, J.F., 2002. Calcium at the Crossroads of Signaling. *The Plant Cell* 14, S401–S417. <https://doi.org/10.1105/tpc.002899>

- Santos, L.C.R., Costa, E., Leal, P.A.M., Nardelli, E.M.V., Souza, G.S.A., 2011. Ambientes protegidos e substratos com doses de composto orgânico comercial e solo na formação de mudas de Jatobazeiro em Aquidauana-MS. *Engenharia Agrícola* 31, 249–259. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000200005>.
- Silva, P.O., Carlos, L., Menezes-Silva, P.E., Costa, A.M., Barbosa, K.P., 2020. Physiological and morphological behavior of *Hymenaea stigonocarpa* seedlings submitted to Phosphorus. *Floresta e Ambiente* 27, 1–9. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.093317>
- Stigter, K.A., Plaxton, W.C., 2015. Molecular Mechanisms of Phosphorus Metabolism and Transport during Leaf Senescence. *Plants* 4, 773–798. <https://doi.org/10.3390/plants4040773>
- Tränkner, M., Tavakol, E., Jákl, B., 2018. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. *Physiologia Plantarum* 163, 414–431. <https://doi.org/10.1111/ppl.12747>
- Velazco, S.J.E., Villalobo, S. F., Galvão, F., Marco Júnior, P., 2019. A dark scenario for Cerrado plant species: Effects of future climate, land use and protected areas ineffectiveness. *Diversity and Distributions* 25, 660–673. <https://doi.org/10.1111/ddi.12886>
- Voss, I., Sunil, B., Scheibe, R., Raghavendra, A.S., 2013. Emerging concept for the role of photorespiration as an important part of abiotic stress response. *Plant Biology* 15, 713–722. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00710.x>
- Wang, M., Shen, Q., Xu, G., Guo, S., 2014. New insight into the strategy for nitrogen metabolism in plant cells. *International Review of Cell and Molecular Biology* 310, 1–37. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800180-6.00001-3>
- Zhou, L.L., Shi, M.Z., Xie, D.Y., 2012. Regulation of anthocyanin biosynthesis by nitrogen in TTG<sub>1</sub>–GL<sub>3</sub>/TT8–PAP<sub>1</sub>-programmed red cells of *Arabidopsis thaliana*. *Planta* 236, 825–837. <https://doi.org/10.1007/s00425-012-1674-2>
- Zou, J.J., Wei, F.J., Wang, C., Wu, J.J., Ratnasekera, D., Liu, W.X., Wu, W.H., 2010. *Arabidopsis* calcium-dependent protein kinase cpk10 functions in abscisic acid- and Ca<sup>2+</sup>-mediated stomatal regulation in response to drought stress. *Plant Physiology* 154, 1232–1243. <https://doi.org/10.1104/pp.110.157545>

## CAPÍTULO II

### NPK nas relações hídricas em mudas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne (Fabaceae)

(Normas de acordo com a revista Environmental and Experimental Botany)

#### RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi avaliar as taxas de crescimento relativo (TCR), eficiência fotossintética, razões alométricas, permeabilidade de membranas e potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) de plantas jovens de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne, quando submetidas à adubação nitrogenada, fosfatada e potássica, comparados com o tratamento de restrição hídrica, para tolerar os efeitos do déficit hídrico (DH). O delineamento experimental adotado foi inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 2x3 com dois estados nutricionais (plantas com adubação suplementar e sem adubação suplementar), três reposições hídricas (100%, 50% e 30% da capacidade de campo – “CC”) e quatro repetições. A altura, diâmetro e a TCR, das plantas com e sem adubação suplementar responderam de forma semelhante no DH de 50% e no tratamento controle a 100% da CC. Os tratamentos com nitrogênio (N) e potássio (K) permitiram o aumento das trocas gasosas, nos DH de 30% e 50%, em comparação ao controle. A máxima eficiência fotoquímica foi obtida nos DH de 30% e 50%, independente dos estados nutricionais do experimento de N e com adubação suplementar em K, porém ao analisar as plantas adubadas com fósforo (P) respondeu nas reposições hídricas de 50% e 100%

da CC. Para as razões alométricas, as plantas adubadas com P e K investiram sua produção de biomassa nos DH de 30% e 50%, já as adubadas com N responderam nas reposições hídricas máximas. O  $\Psi_w$  foi influenciado de forma isolada com destaque para as plantas sem adubação suplementar se manteve mais hidratadas, em relação as plantas adubadas com N e P. Ao contrário do esperado, taxa de liberação de eletrólitos, não constatou-se resposta significativa, indicando ausência de danos na membrana celular. Portanto, a adubação suplementar com nitrogênio, fósforo e potássio mitigaram os efeitos deletérios do DH ao evitar danos à membrana celular e assim permitir o aumento da taxa de crescimento relativo e eficiência fotoquímica das plantas de *H. stigonocarpa*.

**Palavras-chave:** jatobá-do-Cerrado, nutrição florestal, déficit hídrico, características morfofisiológicas.

NPK in water relations in *Hymenaea stigonocarpa* Mart seedlings. ex  
Hayne (Fabaceae)

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the relative growth rates (TCR), photosynthetic efficiency, allometric ratios, membrane permeability and leaf water potential ( $\Psi_w$ ) of *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne seedlings, when subjected to nitrogen, phosphate and potassium fertilization, compared with water restriction treatment, to tolerate the effects of water deficit (DH). The experimental design was entirely random, in a 2x3 factorial scheme with two nutritional states (plants with supplementary fertilization and without supplementary fertilization), three water replenishments (100%, 50% and 30% of the field capacity - "CC") and four repetitions. The height, diameter and TCR of plants with and without supplementary fertilization responded similarly in the 50% DH and in the control treatment at 100% WC. The treatments with nitrogen (N) and potassium (K) allowed an increase in gas exchange, in the DH of 30% and 50%, compared to the control. The maximum photochemical efficiency was obtained in the DH of 30% and 50%, independent of the nutritional states of the N experiment and with supplementary fertilization in K, however when

analyzing the plants fertilized with phosphorus (P) it responded in the water replacements of 50% and 100 % of CC. For allometric reasons, plants fertilized with P and K invested their biomass production in the DH of 30% and 50%, while those fertilized with N responded to the maximum water replenishment.  $\Psi_w$  was influenced in isolation, with emphasis on plants without supplementary fertilization, if they remained more hydrated, in relation to plants fertilized with N and P. Contrary to expected, electrolyte release rate, there was no significant response, indicating absence damage to the cell membrane. Therefore, supplementary fertilization with nitrogen, phosphorus and potassium mitigated the deleterious effects of DH by preventing damage to the cell membrane and thus allowing an increase in the relative growth rate and photochemical efficiency of plants. *H. stigonocarpa*.

**Key Words:** jatobá-do-Cerrado, forest nutrition, water deficit, morphophysiological characteristics.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos 40 anos, as mudanças climáticas oriundas do aquecimento global aumentaram significativamente os impactos nos ecossistemas florestais de todo o planeta (Liu et al., 2020). Diante disso, foi firmado no Acordo de Paris em 2015 metas para minimizar os efeitos do aquecimento global, e entre as metas estava reduzir as emissões de gases de efeito estufa, para que a temperatura global se eleve no máximo (em média) 1,5 ° C, bem como adaptação às mudanças climáticas, de modo a reduzir a vulnerabilidade a eventos climáticos extremos de países menos desenvolvidos. Outra meta muito interessante, em especial para a ciência, é promover o desenvolvimento tecnológico e capacitação para adaptação às mudanças climáticas (UNFCCC, 2015). Tais adaptações não devem ser apenas tecnológicas, mas também biológicas, como por exemplo, aumentar a tolerância das plantas às mudanças climáticas. Uma vez que modelos climáticos globais preveem o aumento e a intensificação dos eventos de seca em muitas regiões do mundo, o que não só afeta a disponibilidade de água, mas também reduz absorção de nutrientes pelas plantas, promovendo alterações morfoanatômicas, metabólicas e fisiológicas em função do estresse hídrico (Tariq et al., 2017).

Muitos estudos avaliam os feitos de adubação nitrogenada (N), fosfatada (P) e potássica (K) no crescimento de espécies arbóreas, mas há pouco entendimento sobre o

que a suplementação com tais nutrientes promove nas plantas ao serem expostas às condições de estresse hídrico. Como as plantas absorvem os íons juntamente com água, a nutrição adequada das mesmas pode aumentar a capacidade de tolerar os efeitos deletérios do déficit hídrico (Ahanger et al., 2016). A adubação nitrogenada, por exemplo, aumenta os processos de assimilação da fotossíntese por estar ligada as moléculas de clorofila e atividade enzimática da Rubisco (Huang et al., 2018a), melhora a eficiência do uso da água, reduz impactos do estresse hídrico, previne danos à membrana celular e aumenta a pressão osmótica (Huang et al., 2018b). O fósforo participa do metabolismo fotossintético e regulação do metabolismo de carboidratos (Tariq et al., 2017), melhora da estrutura dos cloroplastos e maior resistência das plantas ao estresse hídrico (Liu et al., 2018; Tariq et al., 2018). O potássio estabelece potencial de membranas, regulação osmótico, participa do aumento da fixação de CO<sub>2</sub> e no carregamento de fotoassimilados no floema, e aumenta eficiência do uso da água (Hasanuzzaman et al, 2018).

Adaptar plantas às condições adversas através de adubação pode ajudar na conservação das espécies para manter todo um ecossistema em funcionamento. Trazendo este contexto para o Domínio Cerrado, há inúmeras espécies que merecem ser conservadas, e entre elas está *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne (Fabaceae), espécie importante para recuperação de áreas degradadas (Silva et al., 2019). Planta de metabolismo C3, de crescimento lento, apresenta potencial alimentício, madeireiro (Silva et al., 2020) e medicinal (Orsi et al., 2012; Oliveira et al., 2018). Adaptada a solos pobres em nutrientes e principalmente hídricas, com 6 meses de período chuvoso e 6 meses de seca (Costa et al., 2015). Mesma adaptada as condições do Cerrado, o crescimento de *H stigonocarpa* pode ser comprometido, uma vez que a queda dos níveis de chuva tende a ser bem severa e constante, devido ao aquecimento global. E, aumentar o nível de estresse rapidamente em uma vegetação que já passa por fatores estressantes, pode ser devastador e acelerar sua extinção, já que não houve tempo hábil para tal adaptação.

Conforme ao exposto, levantou-se a hipótese de que mudas de *H. stigonocarpa*, quando bem nutridas apresentam maior eficiência do uso da água. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar as respostas morfofisiológicas, bem como mensurar o potencial hídrico e taxa de crescimento relativo de plantas jovens de *H. stigonocarpa* com e sem adubação (N, P e K), e submetidas a diferentes níveis hídricos, para identificar possíveis estratégias inerentes de tolerância aos efeitos do estresse hídrico.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Obtenção das sementes, condições de cultivo e delineamento experimental

As sementes de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne, foram obtidas em área de Cerrado conservado (17°47'12" S e 50°57'48" W). Por apresentar dormência tegumentar foi realizada à escarificação mecânica na região oposta ao hilo, com auxílio de uma lixadeira elétrica e emersas em água em temperatura ambiente por 24 horas, segundo a metodologia modificada de Santos et al. (2011).

As mudas foram produzidas em tubetes de 100 cm<sup>3</sup>, preenchidos com lodo suíno, casca de arroz carbonizada e vermiculita de granulometria média na proporção - 1:1:1. O substrato foi adubado com 300 g m<sup>-3</sup> de nitrogênio (ureia: (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO - 45% de N), 600 g m<sup>-3</sup> de fósforo (superfosfato triplo: Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> - 41% de P e 12% Ca) e 80 g m<sup>-3</sup> de potássio (cloreto de potássio: KCl - 52% de K e 48% de Cl) denominados de +N, +P e +K, respectivamente. Os tratamentos sem adubação suplementar que não houve aplicação de nitrogênio, fósforo e potássio no preparo do substrato foram denominados de -N, -P e -K. Experimentos independentes foram conduzidos, para cada nutriente, com e sem adubação suplementar com nitrogênio, fósforo e potássio. Por fim, mantendo-se a irrigação com o turno de rega de três vezes ao dia (6, 10 e 17 horas) durante 15 minutos, lâmina de 8 mm por m<sup>2</sup>, via aspersão.

A partir da primeira fase do experimento através de estudos internos foi possível selecionar o tamanho do recipiente, substrato e as doses ótimas para o cultivo das mudas de *H. stigonocarpa*, por meio da seleção dos parâmetros biométricos e de biomassa envolvidos durante o processo de avaliação. Num segundo momento, após a fase de viveiro a pleno sol (17°48'28" S, 50°53'57" W), aos 210 dias de idade das mudas já formadas e estabelecidas consideradas aptas para plantio em campo foram transplantadas para vasos contendo 4 kg de substrato, obtido a partir da mistura de duas partes de LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e uma parte de areia. A calagem e adubação do substrato foram feitas de acordo com análise físico-química do solo, elevado a saturação de bases até 60% (Raij, 1981) e adubado com 300 ppm de monoamônio fosfato (MAP) por vaso, em seguida transferidos para casa de vegetação climatizada (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização físico-química coletado no horizonte “A” em mata nativa do perfil de solo do tipo LATOSSOLO VERMELHO Distrófico.

Ca	Mg	Ca+Mg	Al	H+Al	CTC	SB	M.O	V	m	pH	
-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----							g dm <sup>-3</sup>	-----%-----	CaCl <sub>2</sub>		
1,06	0,49	1,6	0,05	2,1	4,0	1,9	41,3	47	2,6	5,12	
K	P(Mel)	S	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Argila	Silte	Areia
-----mg dm <sup>-3</sup> -----									-----%-----		
128	2,6	8,4	2,0	123,4	27,3	14,5	11,3	0,2	48	12	40

Ca: cálcio, Mg: magnésio, Ca+Mg: cálcio mais magnésio, Al: alumínio, H+Al: hidrogênio mais alumínio, CTC: capacidade de troca catiônica, SB: soma de bases, V: saturação de bases, m: saturação por alumínio, pH: potencial hidrogeniônico, K: potássio, P: fósforo, S: enxofre, Na: sódio, Fe: ferro, Mn: manganês, Cu: cobre, Zn: zinco, B: boro e M.O: matéria orgânica.

Após 35 dias de aclimatação das mudas nos vasos, iniciou-se a aplicação dos tratamentos hídricos. Para isso, foram utilizadas as mesmas plantas com adubação suplementar e sem suplementação de ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio. Adotando-se o delineamento inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 2x3 constituídos por dois estados nutricionais (plantas com adubação suplementar e sem adubação suplementar), três reposições hídricas de 100%, 50% e 30% da capacidade de campo (CC) e quatro repetições. Com a equação da curva de retenção de água do substrato foi possível calcular os potenciais mátricos e ajustar os teores de água no solo, para cada tratamento. As reposições dos diferentes regimes hídricos foram efetuadas pelas pesagens diárias dos vasos, até atingir a CC desejada da quantidade de água perdida (evapotranspiração) no substrato.

## 2.2. Análise morfológica e taxa de crescimento relativo

Aos 90 e 120 dias após a imposição da restrição hídricas combinadas com plantas adubadas e sem adubação suplementar, foram avaliados os parâmetros morfológicos de altura da planta (AP: cm), diâmetro do caule (DC: mm) e número de folhas (NF). Com os dados AP e DC calculou-se a taxa de crescimento relativo da altura (TCR altura) e a taxa de crescimento relativo de diâmetro do caule (TCR caule),

segundo Benincasa (2003), que permitiu verificar quanto as plantas de jatobá-do-Cerrado puderam direcionar sua produção de biomassa para a parte aérea.

### 2.3. Trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a* e eficiência do uso da água

Para o registro das trocas gasosas e da fluorescência da clorofila *a*, no final do experimento, foram mensuradas as variáveis da taxa fotossintética ( $A$ :  $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ), condutância estomática ( $g_s$ :  $\text{mol}(\text{H}_2\text{O})\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ), taxa transpiratória ( $E$ :  $\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ), eficiência instantânea ( $A/E$ ) e intrínseca ( $A/g_s$ ) do uso da água, concentração interna e externa de  $\text{CO}_2$  ( $C_i/C_a$ ), razão entre fotossíntese e concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $A/C_i$ ), rendimento quântico efetivo II ( $\Phi\text{PSII}$ ) e taxa de transporte de elétrons (ETR:  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ). Para obtenção dessas variáveis, utilizou-se um analisador de gases no infravermelho portátil (IRGA: LI6400xt, Licor<sup>®</sup>, Nebraska, EUA), em avaliações, realizadas nos horários entre 08 e 11 horas da manhã.

### 2.4. Índices de clorofila *a* e *b*

Os índices de Clorofila *a* (Chl *a*) e *b* (Chl *b*) foram realizadas nas mesmas folhas das trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*, com medidor portátil Clorofilog (Modelo CFL1030, Falker<sup>®</sup> – Automação agrícola). Após a obtenção das Chl *a* e Chl *b*, calculou-se a relação entre a clorofila *a/b* (Chl *a/b*) e total (Chl *a+b*).

### 2.5. Biomassa, razões alométricas e área foliar

Ao final do experimento, após 155 dias sendo cultivadas em ambiente protegido, as plantas de *Hymenaea stigonocarpa* foram separadas em caule, folha e raízes e secas em estufa de circulação de ar forçada a 65°C para obtenção da massa seca de folhas (MSF: g/planta), caule (MSC: g/planta), raiz (MSR: g/planta), parte aérea (MSPA: g/planta) e total (MST: g/planta). Também foram avaliadas as razões alométricas de massa foliar (RMF), caulinar (RMC) e radicular (RMR). Com os dados de AP, DC e biomassa, calculou-se a razão entre altura/diâmetro (AP/DC) e raiz/parte aérea (R/PA). Utilizando o software ImageJ foi calculada a área foliar (AF:  $\text{cm}^2$ ), mensuradas antes de serem secas em estufa de circulação de ar forçada (Jadoski et al., 2012). A partir dos dados de AF e MSF calculou-se a área foliar específica (AFE:  $\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$ ).

## 2.6. Potencial hídrico e condutividade hidráulica foliar

O potencial hídrico na antemanhã foi avaliado em folhas individuais ( $\Psi_w$ : MPa) das plantas de *Hymenaea stigonocarpa*, usando uma câmara de pressão do tipo Scholander (Model SKPM 1405; Skye Instruments Ltd, Powys, UK) aos 120 dias. Com os dados da taxa transpiratória (LI-6400xt: IRGA) e a diferença no potencial hídrico foliar, determinou-se a condutividade hidráulica das folhas ( $K_F$ :  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$ ), segundo a metodologia de Brodribb e Holbrook (2003).

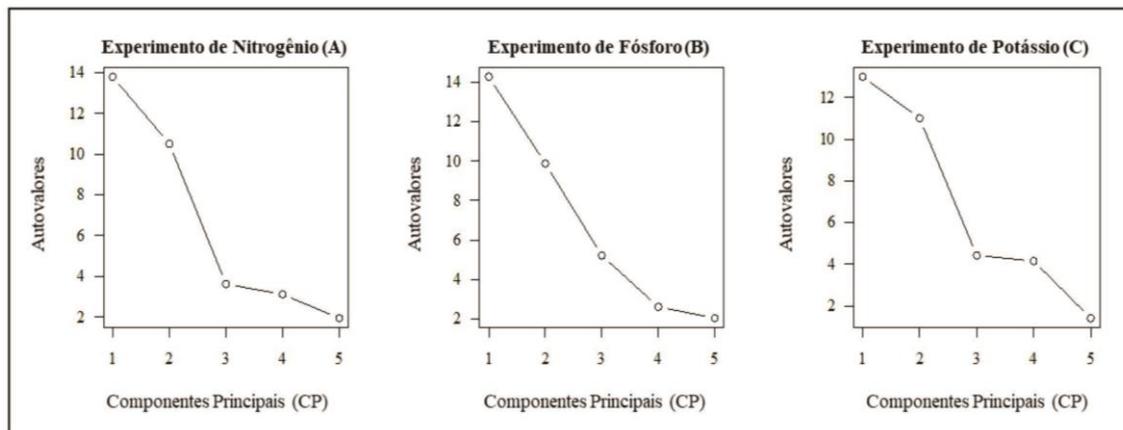
## 2.7. Taxa de extravasamento de eletrólitos

O extravasamento de eletrólitos dos tecidos foliares, indicador da descompartmentalização celular, foi realizado mediante a taxa de liberação de eletrólitos segundo adaptação da metodologia descrita por Vasquez-Tello et al., (1990) e Pimentel et al., (2002). Os 15 discos foliares de cinco mm de diâmetro foram lavados previamente com água destilada e então, submersos em 30 mL de água deionizada, em frascos âmbar, por período de 24 horas à temperatura ambiente. Após este período, foi mensurado a condutividade livre (CL:  $\mu\text{S/cm}$ ), utilizando condutivímetro portátil CD-850. Posteriormente, os mesmos frascos foram colocados em estufa por uma hora sob temperatura de  $100^\circ\text{C}$  e, após o resfriamento até temperatura ambiente, foi medida a condutividade total (CT:  $\mu\text{S/cm}$ ). Para evitar o erro nos resultados, o sensor foi lavado entre cada leitura com água deionizada. A taxa de liberação de eletrólitos foi obtida utilizando a fórmula  $\text{TLE (\%)} = \text{CL/CT} \times 100$ .

## 2.8. Análise estatística

Os dados obtidos foram testados, quanto a homogeneidade e normalidade, submetidos análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, entre os fatores reposições hídricas e os estados nutricionais. Para execução das análises foi utilizando o programa SISVAR<sup>®</sup> versão 5.3 (Ferreira, 2014). Foi realizada a análise multivariada de agrupamento de dados com auxílio do programa R (R Core Team, 2020) no pacote FactoMineR (Le et al., 2008). O número de componentes principais foi determinado conforme o critério de Kaiser, onde é utilizado somente componentes principais que obtiveram autovalores igual e superior a 1. (Fig.

1). O agrupamento dos tratamentos foi realizado através de clusters hierárquico, com auxílio do pacote FactoMineR e o gráfico feito com o pacote factoextra (Kassambara e Mundt, 2020).



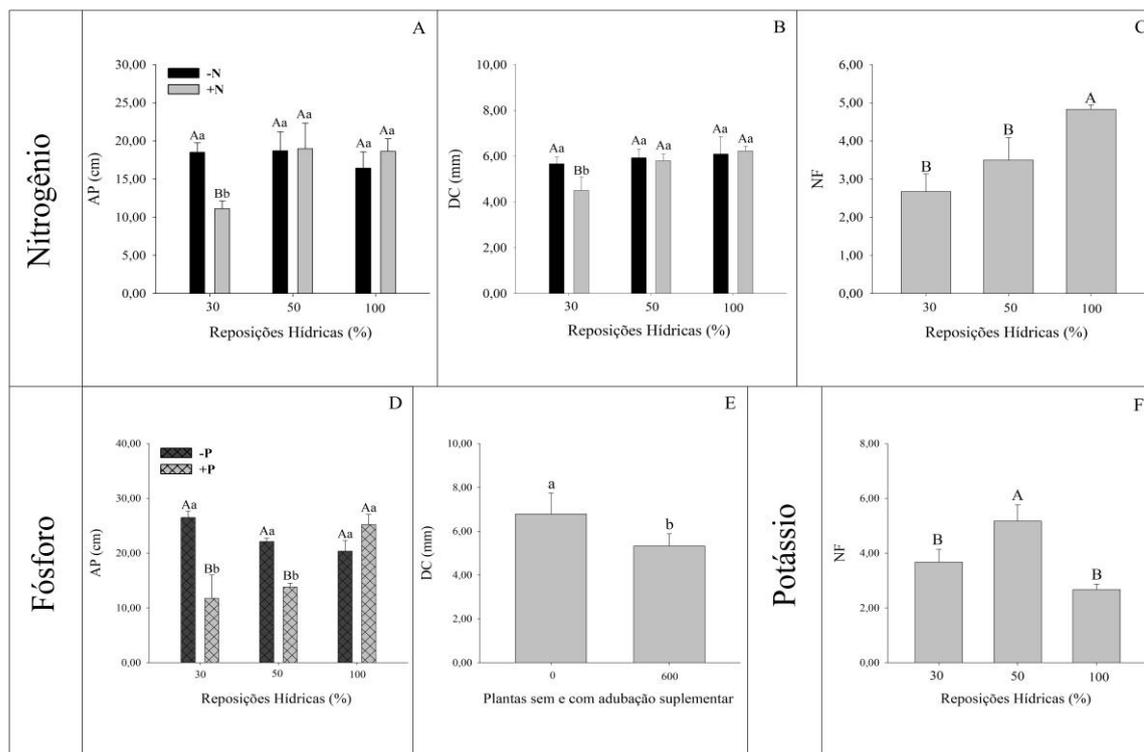
**Fig. 1.** Autovalores das componentes principais na análise multivariada de componentes para os experimentos com nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Performance morfológica e taxa de crescimento relativo

As plantas de *Hymenaea stigonocarpa* submetidas às reposições hídrica de 50% a 100% da CC, e adubadas com nitrogênio obtiveram aumento da altura (AP) (Fig. 2A) e diâmetro do caule (DC) (Fig. 2B), quando comparadas as plantas sem adubação suplementar. O número de folhas (NF) variou em função da reposição hídrica de 100% da CC, independente dos estados nutricionais testados (Fig. 2C).

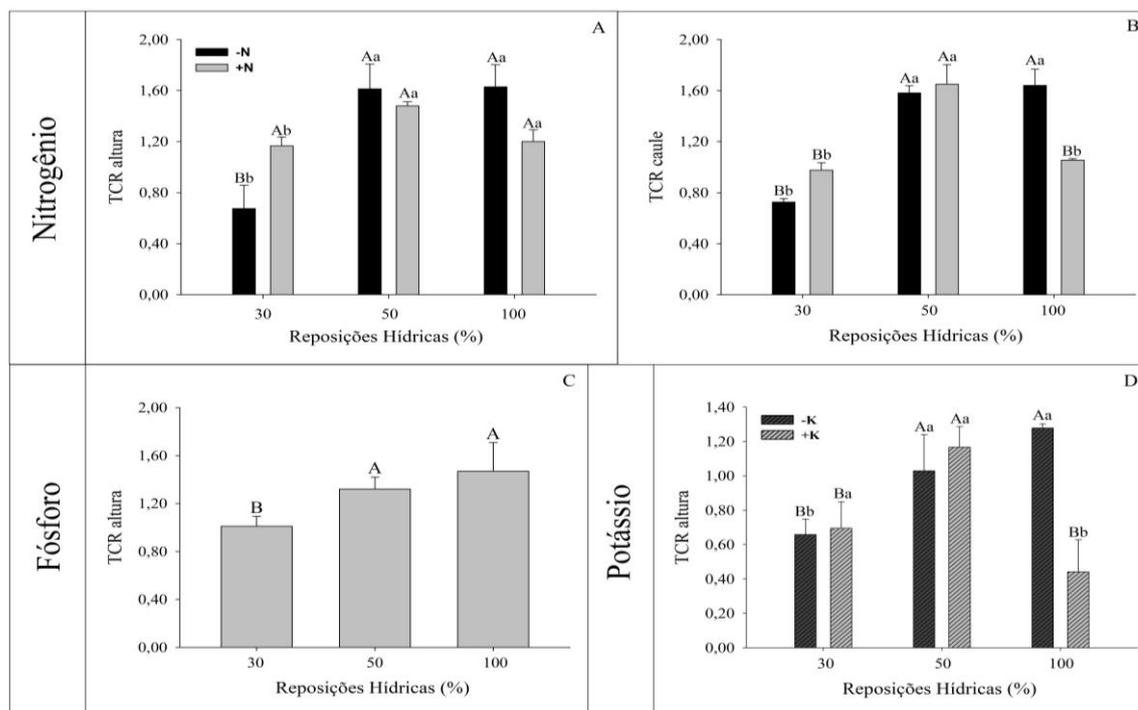
AP foi alterada apenas com a reposição hídrica de 100% da CC e bem nutridas em fósforo (Fig. 2D), enquanto o DC (Fig. 2E), foi influenciado de forma isolada com destaque para as plantas sem adubação suplementar, contudo, o NF não foi afetado. Já o potássio não diferiu de acordo com os fatores “estados nutricionais” e “reposições hídricas”, exceto para o NF no DH de 50% (Fig. 2F).



**Fig. 2.** Altura de plantas (AP: A, D), diâmetro do caule (DC: B, E), número de folhas (NF: C, F) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão; n = 4) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

A taxa de crescimento relativo (TCR) da altura e diâmetro do caule foram maiores, tanto nas plantas sem adubação suplementar nas reposições hídricas de 50% e 100%, quanto nas plantas bem nutridas em nitrogênio, com exceção da TCR do diâmetro de caule, obtido no DH de 50% (Fig. 3A-B).

A maior TCR para altura de plantas ocorreram nas reposições hídricas de 50% e 100% da CC, independente de plantas com e sem adubação suplementar em fósforo (Fig. 3C). Nas plantas sem adubação suplementar a 50% e 100% da CC, assim como em plantas bem nutridas em potássio com a reposição hídrica de 50%, promoveu o aumento da TCR em altura (Fig. 3D). No entanto, os fatores entre reposições hídricas e estados nutricionais nos tratamentos de fósforo e potássio não promoveu efeito significativo para TCR do caule.



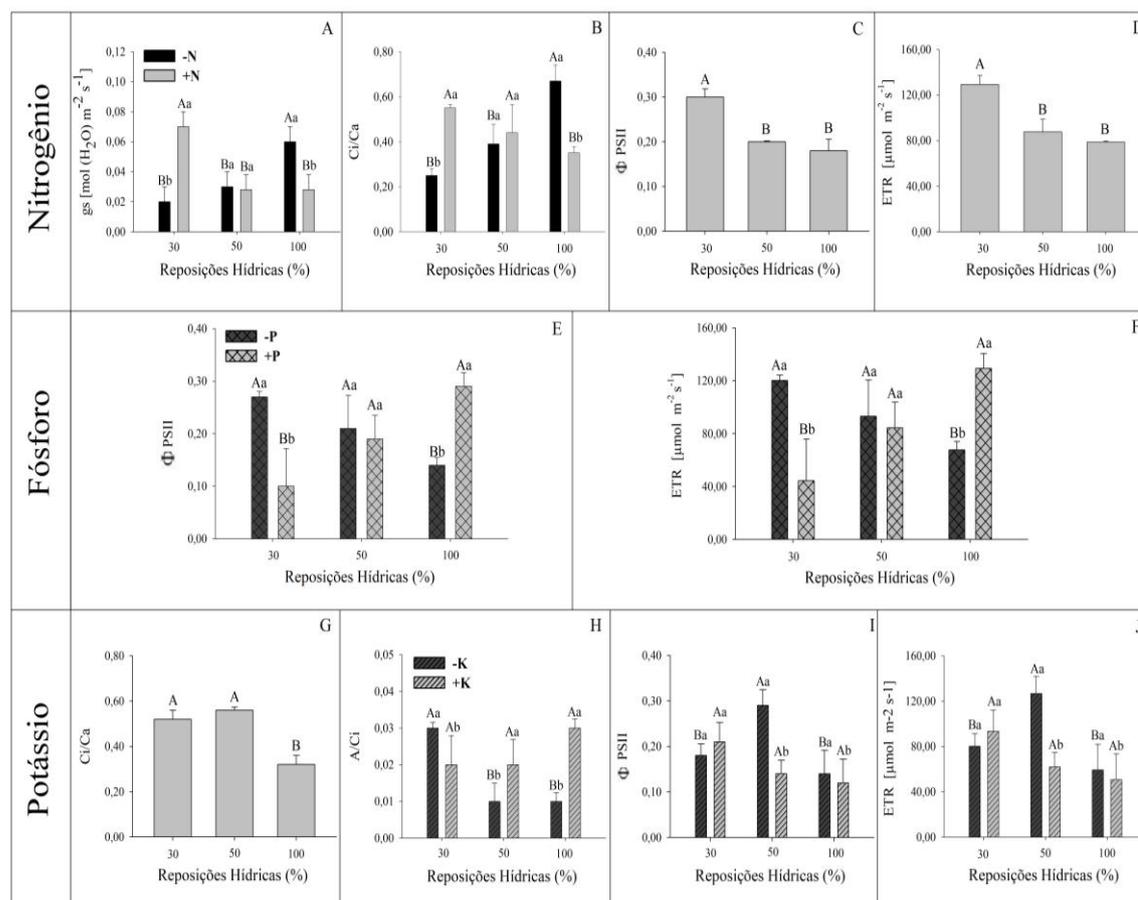
**Fig. 3.** Taxa de crescimento relativo da altura (TCR altura: A, C, D) e taxa de crescimento relativo do caule (TCR caule: B) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão:  $n = 4$ ) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

### 3.2. Eficiência fotoquímica e bioquímica da fotossíntese

As plantas adubadas com nitrogênio, obtiveram aumento na condutância estomática ( $g_s$ ) no DH de 30% e nas plantas sem adubação suplementar a 100% da CC (Fig. 4A). Com a reposição hídrica de 100% da CC, as plantas sem adubação suplementar elevaram a concentração interna e externa de  $CO_2$  ( $C_i/C_a$ ), diferentemente do observado para plantas bem nutridas em nitrogênio encontrados nos DH de 30% e 50% (Fig. 4B), que por sua vez não alterou as variáveis da taxa fotossintética (A) e transpiratória (E), bem como a razão entre fotossíntese e concentração interna de  $CO_2$  (A/ $C_i$ ). A eficiência fotoquímica efetiva do fotossistema II ( $\Phi PSII$ ) e taxa transportadora de elétrons (ETR) foi maior no DH de 30% (Fig. 4C-D).

Os tratamentos com plantas com e sem adubação suplementar em fósforo, combinadas as reposições hídricas de 30%, 50% e 100% da CC, não mostraram diferenças significativas nas trocas gasosas. À medida que houve a redução do  $\Phi$ PSII e ETR para as plantas sem adubação suplementar nos DH de 30% e 50% da CC, aumentou nas plantas bem nutridas em fósforo nas reposições hídricas de 50% e 100% (Fig. 4E-F).

A relação Ci/Ca foi afetada apenas nas reposições hídricas, sendo os maiores valores obtidos nos DH de 30% e 50% da CC (Fig. 4G), independentemente de plantas com e sem adubação suplementar em potássio. As plantas com adubação suplementar em potássio aumentaram a razão A/Ci nas reposições hídricas de 50% e 100% da CC, e nas plantas sem adubação suplementar no DH de 30% (Fig. 4H), embora os parâmetros de A,  $g_s$  e E, não responderem aos fatores avaliados. Com DH de 50%, sem adubação suplementar induziu o aumento do  $\Phi$ PSII e ETR, assim como, nas plantas bem nutridas em potássio submetidas ao DH de 30% (Fig. 4I-J).

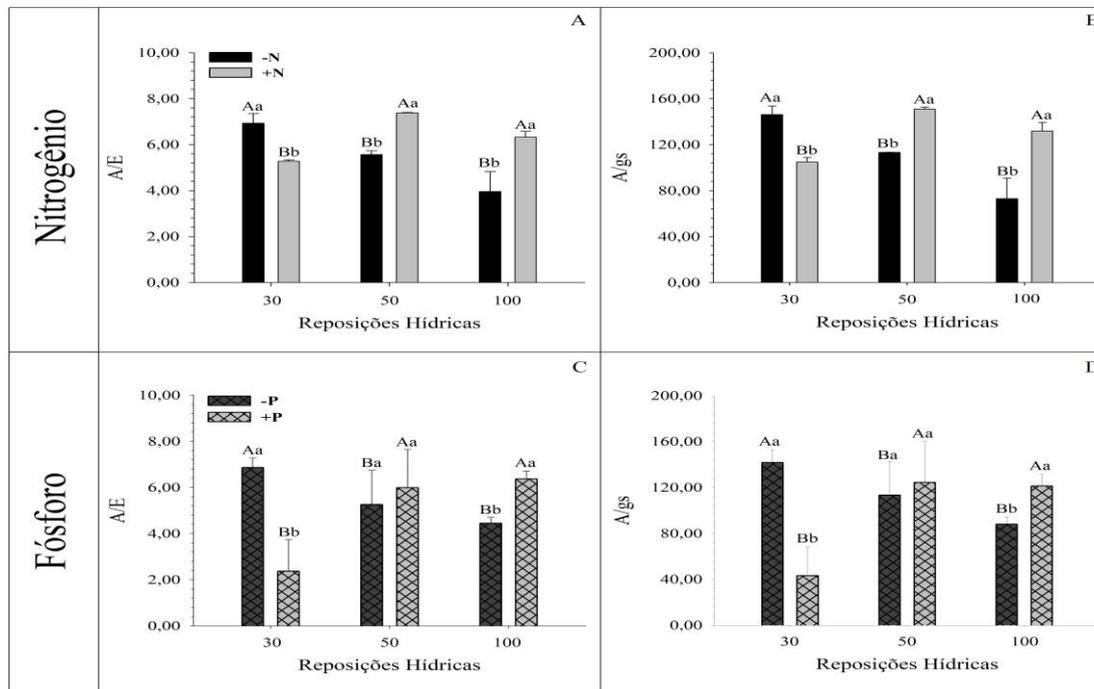


**Fig. 4.** Condutância estomática ( $g_s$ : A), concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> (Ci/Ca: B, G), razão entre fotossíntese e concentração interna de CO<sub>2</sub> (A/Ci: H), rendimento

quântico efetivo do fotossistema II ( $\Phi$ PSII: C, E, I) e taxa de transporte de elétrons (ETR: D, F, J) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão:  $n = 4$ ) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

### 3.3. Eficiência instantânea e intrínseca do uso da água

A eficiência do uso da água instantânea ( $A/E$ ) e intrínseca ( $A/g_s$ ) aumentou no DH de 30% sem adubação suplementar e nas plantas com adubação suplementar em nitrogênio (Fig. 5A-B) e fósforo (Fig. 5C-D) nas máximas reposições hídricas de 50% e 100% da CC. As plantas com e sem adubação suplementação de potássio, não se constatou efeito para a eficiência do uso da água, nas reposições hídricas de 30%, 50% e 100% da CC.



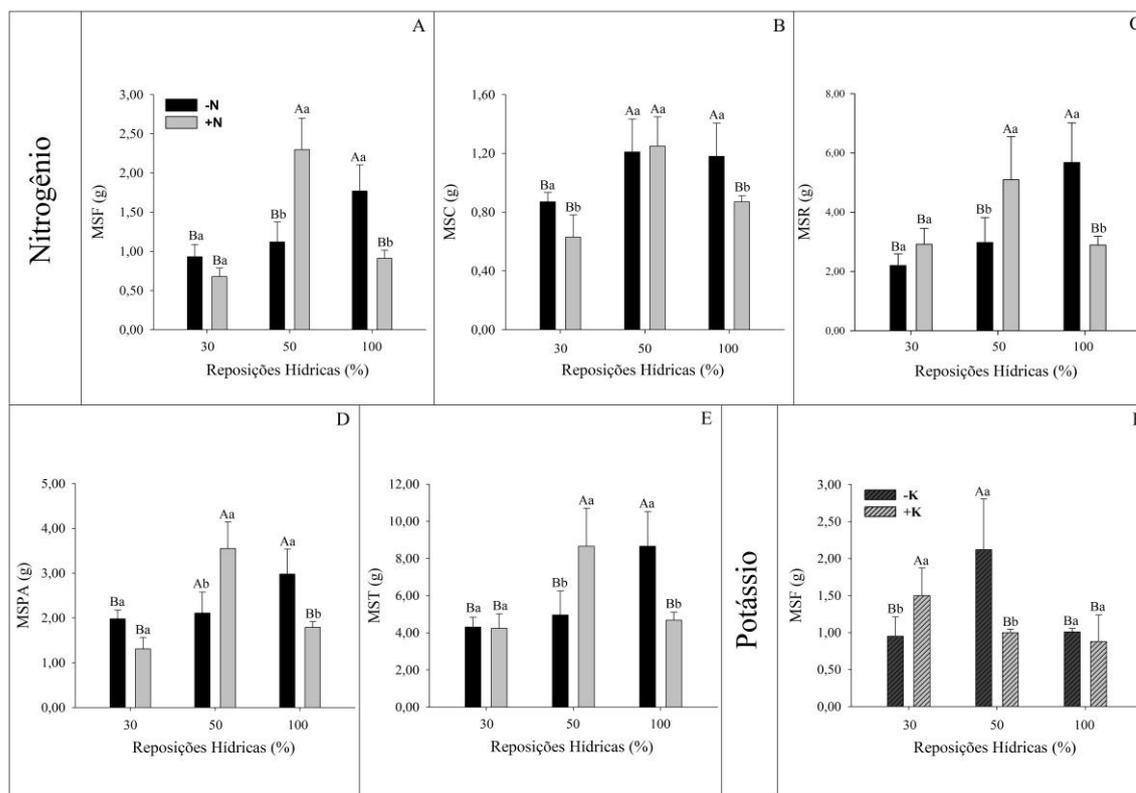
**Fig. 5.** Eficiência instantânea ( $A/E$ : A, C) e intrínseca ( $A/g_s$ : B, D) do uso da água em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o

déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão:  $n = 4$ ) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

### 3.4. Partição de biomassa e razões alométricas

O DH de 50%, adubadas com nitrogênio, constatou-se o aumento na alocação e partição de biomassa das folhas (MSF), caule (MSC), raiz (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST) das plantas de *H. stigonocarpa* (Fig. 6A-B-C-D-E). Para as plantas sem adubação suplementar, as variáveis de MSF, MSR, MSPA e MST foram observados efeitos na reposição hídrica de 100% da CC (Fig. 6A-C-D-E), com exceção da MSC respondendo não apenas a reposição hídrica de 100%, como também a 50% da CC (Fig.6B).

O DH, tanto em plantas sem adubação suplementar quanto bem adubadas em fósforo inibiu a produção de biomassa nas folhas, caule raiz, parte aérea e total, não demonstrando resposta significativa para o acúmulo de massa seca. A exposição prolongada ao DH de 50% sem adubação suplementar em potássio e 30% nas plantas com adubação suplementar permitiram a maior MSF (Fig. 6F), em relação a MSC, MSR, MSPA e MST não apresentaram diferenças entre as reposições hídricas e estados nutricionais, nas plantas com e sem adubação suplementar em potássio.

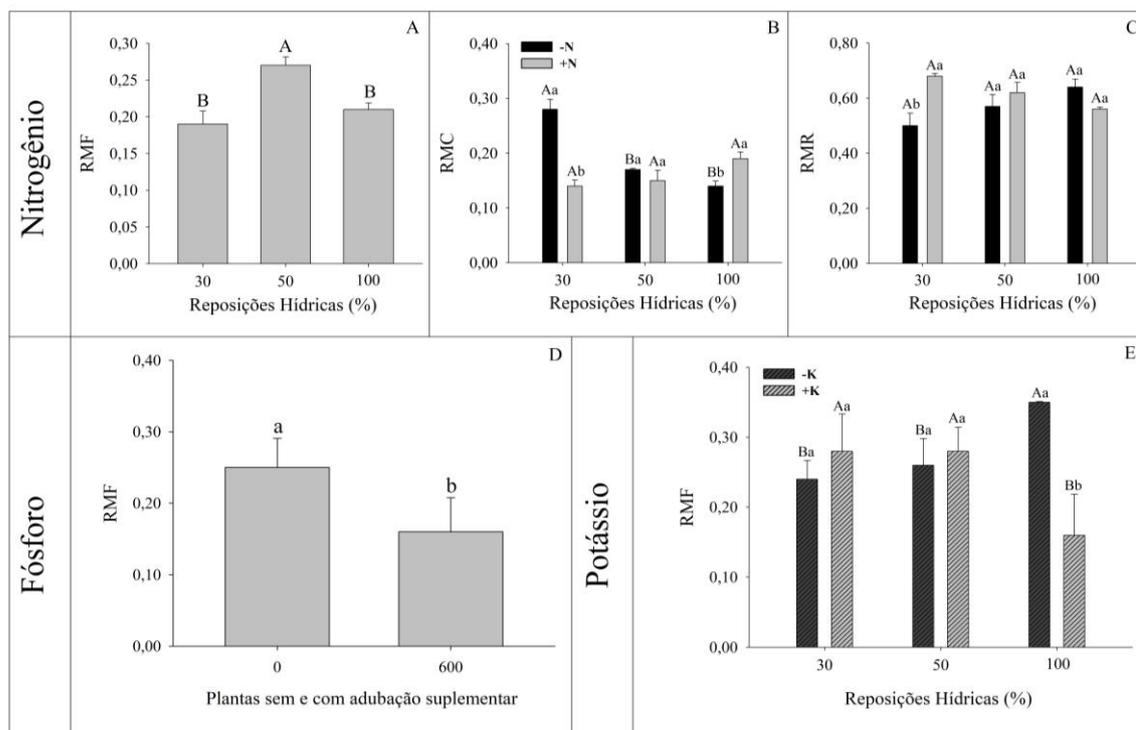


**Fig. 6.** Massa seca foliar (MSF: A, F), massa seca caulinar (MSC: B), massa seca radicular (MSR: C), massa seca da parte aérea (MSPA: D) e massa seca total (MST: E) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas às reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão;  $n = 4$ ) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

O DH de 50%, respondeu isoladamente para a razão de massa foliar (RMF) (Fig. 7A). As razões alométricas do caule (RMC), foram significativas no DH de 30% em plantas sem adubação suplementar e nas reposições hídricas de 50% e 100% com adubação suplementar em nitrogênio (Fig. 7B), por outro lado, as plantas sem adubação suplementar submetidas às reposições hídricas de 50% e 100% da CC, aumentou a razão de massa seca da raiz (RMR) (Fig. 7C).

As plantas sem adubação suplementar em fósforo responderam apenas para a RMF permitindo direcionar maior investimento de biomassa até as folhas (Fig. 7D), porém, a RMF e RMR, não houve resposta significativa. Observou-se efeito significativo somente para RMF sem adubação suplementar em potássio e submetida à

100% da CC (Fig. 7E), assim como também nas plantas com adubação suplementar nos DH de 30% e 50%. Quanto as RMC e RMR, não se constatou diferença entre os fatores avaliados.



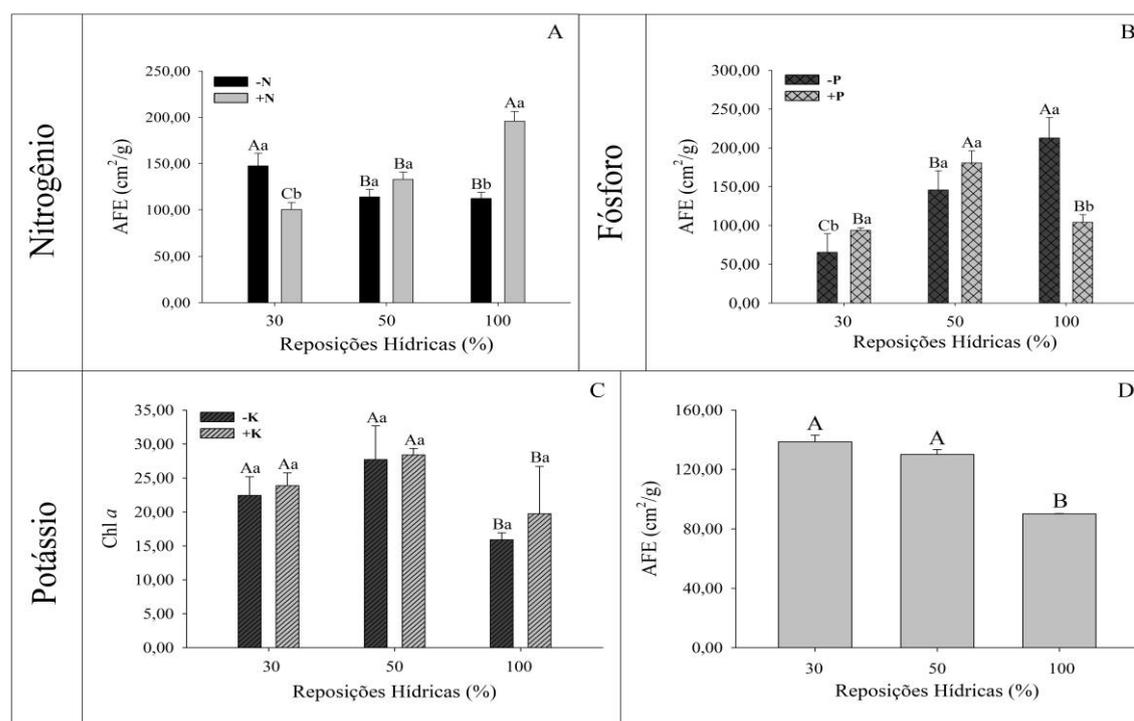
**Fig. 7.** Razão de massa foliar (RMF: A, D, E), razão de massa caulinar (RMC: B) e razão de massa radicular (RMR: C) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100% da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30% da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão:  $n = 4$ ) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

### 3.5. Índices de clorofila, área foliar e área foliar específica

As folhas de *H. stigonocarpa* exibiram maiores valores para área foliar específica (AFE) a 30% de DH, sem adubação suplementar e 100% da CC com plantas bem nutridas em nitrogênio (Fig. 8A). As reposições hídricas de 50% adubadas com fósforo e 100% da CC sem adubação suplementar permitiram a maior AFE (Fig. 8B). As variáveis de área foliar (AF) e os índices clorofila *a* (Chl *a*), clorofila *b* (Chl *b*), clorofila total (Chl *a+b*), razão entre clorofila *a/b* (Chl *a/b*), não diferiram entre plantas

com e sem adubação suplementar em nitrogênio e fósforo, submetidas a diferentes reposições hídricas.

Os DH de 30% e 50% e a interação entre plantas com e sem adubação suplementar em potássio aumentaram o índice de Chl *a* (Fig. 8C), com exceção da Chl *b*, Chl *a+b* e Chl *a/b*, não foram afetados. Apesar AF não ter apresentado alterações significativas, houve efeito apenas para AFE, principalmente entre os DH de 30% e 50% para o potássio (Fig. 8D).

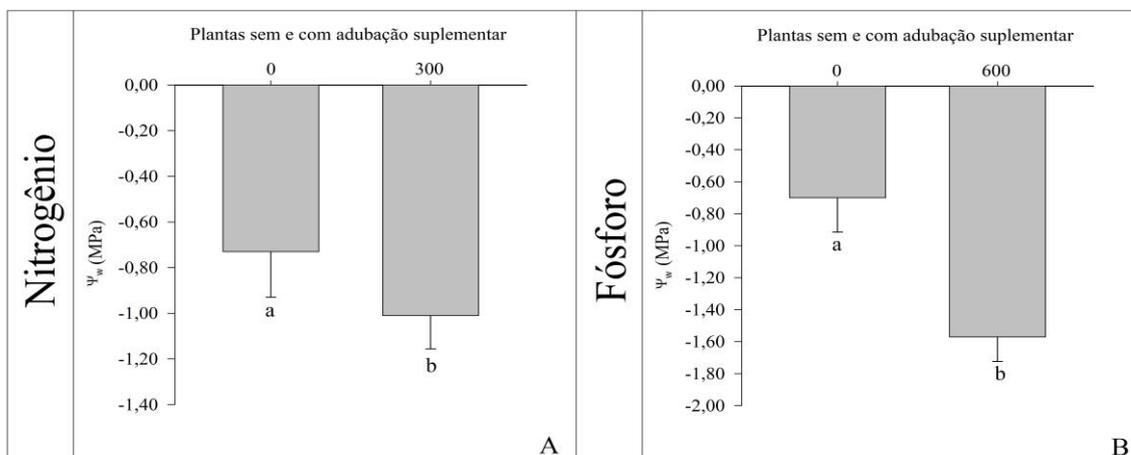


**Fig. 8.** Área foliar específica (AFE: A, B, D) e índice Clorofila *a* (Chl *a*: C) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P, -K) e com adubação suplementar em nitrogênio (+N), fósforo (+P) e potássio (+K) submetidas as reposições hídricas: 100 % da capacidade de campo (CC) – controle, 50% e 30 % da CC para o déficit hídrico (DH). Médias ( $\pm$  erro padrão:  $n = 4$ ) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

### 3.6. Relações hídricas e taxa de liberação de eletrólitos

As reposições hídricas levaram a redução do potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) nas plantas sem adubação suplementar com nitrogênio e fósforo, que se manteve mais

hidratadas, em relação as plantas bem nutridas de modo isolado (Fig. 9A-B). Já a condutividade hidráulica foliar (Kf) e taxa de liberação de eletrólitos (TLE), não se constatou diferença entre os fatores para nitrogênio, fósforo e potássio.



**Fig. 9.** Potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) em plantas de *H. stigonocarpa* sem adubação suplementar (-N, -P) e com adubação suplementar em nitrogênio/+N (A) e fósforo/+P (B). Médias ( $\pm$  erro padrão:  $n = 4$ ) seguidas de letras diferentes entre os tratamentos diferem restrição hídrica (maiúsculas) e plantas mal/bem nutridas (minúsculas) pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

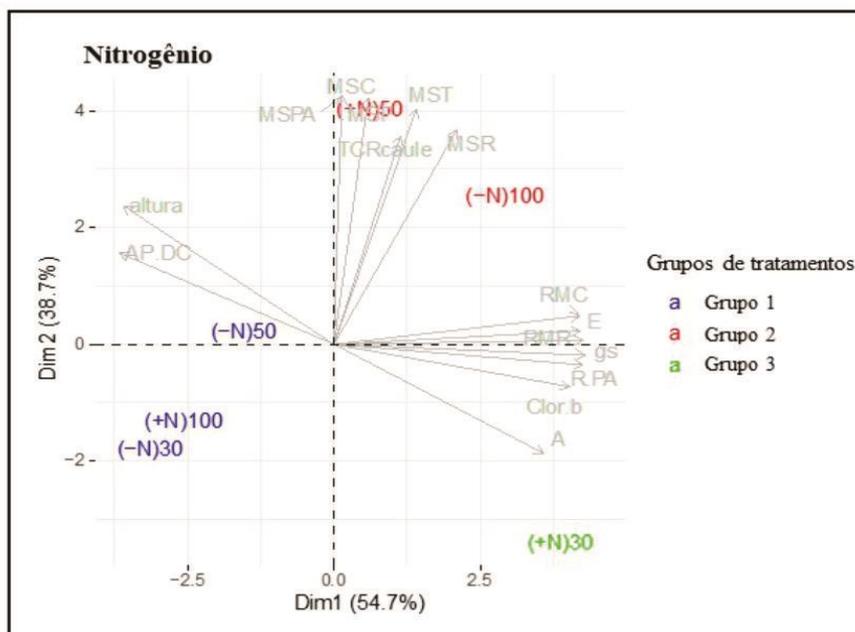
### 3.7. Experimento de nitrogênio: correlação de Pearson e multivariada

Na correlação entre os valores obtidos pelas variáveis avaliadas e a covariância de cada componente principal (CP) obtida houve significância entre as variáveis altura, AP/DC, R/PA, RMC, RMR, A, E,  $g_s$  e Chl *b* e a CP1, e entre as variáveis TCR caule, MSF, MSC, MSR, MSPA e MST e a CP2 (Tabela 1). Assim, foi refeita a análise de componentes principais somente com as variáveis que apresentaram correlação significativa com as CP1 e CP2 (Fig. 10). Observa-se que 93,4% da variação dos dados é explicada pelas correlações das variáveis significativas e que explicam o agrupamento dos tratamentos (Fig. 10).

**Tabela 2.** Correlação de Pearson entre as coordenadas das componentes principais (CP) 1 e 5 com os valores obtidos para cada variável avaliada estandardizada do experimento com nitrogênio em plantas de *H. stigonocarpa*.

	Variáveis	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
1	<b>altura</b>	-0.91*	0.35 <sup>ns</sup>	0.15 <sup>ns</sup>	-0.10 <sup>ns</sup>	0.14 <sup>ns</sup>
2	<b>diâmetro</b>	-0.73 <sup>ns</sup>	0.60 <sup>ns</sup>	-0.26 <sup>ns</sup>	-0.14 <sup>ns</sup>	0.13 <sup>ns</sup>
3	<b>NF</b>	-0.53 <sup>ns</sup>	0.59 <sup>ns</sup>	0.57 <sup>ns</sup>	0.18 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>
4	<b>AP/DC</b>	-0.84*	0.06 <sup>ns</sup>	0.41 <sup>ns</sup>	0.00 <sup>ns</sup>	0.34 <sup>ns</sup>
5	<b>TCR altura</b>	0.30 <sup>ns</sup>	0.77 <sup>ns</sup>	-0.01 <sup>ns</sup>	0.06 <sup>ns</sup>	0.56 <sup>ns</sup>
6	<b>TCR caule</b>	0.15 <sup>ns</sup>	0.85*	0.22 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>	0.45 <sup>ns</sup>
7	<b>MSF</b>	-0.05 <sup>ns</sup>	0.85*	0.50 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>	-0.12 <sup>ns</sup>
8	<b>MSC</b>	-0.05 <sup>ns</sup>	0.85*	0.50 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>	-0.12 <sup>ns</sup>
9	<b>MSR</b>	0.29 <sup>ns</sup>	0.93**	0.14 <sup>ns</sup>	-0.11 <sup>ns</sup>	-0.15 <sup>ns</sup>
10	<b>MSPA</b>	-0.15 <sup>ns</sup>	0.85*	0.47 <sup>ns</sup>	-0.15 <sup>ns</sup>	-0.13 <sup>ns</sup>
11	<b>MST</b>	0.13 <sup>ns</sup>	0.92**	0.28 <sup>ns</sup>	-0.14 <sup>ns</sup>	-0.18 <sup>ns</sup>
12	<b>R/PA</b>	0.97**	0.13 <sup>ns</sup>	-0.01 <sup>ns</sup>	0.20 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>
13	<b>RMF</b>	-0.69	-0.56 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>	-0.34 <sup>ns</sup>	-0.29 <sup>ns</sup>
14	<b>RMC</b>	0.91*	0.33 <sup>ns</sup>	0.03 <sup>ns</sup>	0.26 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>
15	<b>RMR</b>	0.93**	0.26 <sup>ns</sup>	0.04 <sup>ns</sup>	0.26 <sup>ns</sup>	0.04 <sup>ns</sup>
16	<b>A</b>	0.90*	-0.33 <sup>ns</sup>	0.15 <sup>ns</sup>	0.24 <sup>ns</sup>	-0.09 <sup>ns</sup>
17	<b>E</b>	0.93**	0.22 <sup>ns</sup>	-0.02 <sup>ns</sup>	0.05 <sup>ns</sup>	-0.29 <sup>ns</sup>
18	<b>gs</b>	0.95**	0.20 <sup>ns</sup>	-0.10 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	-0.21 <sup>ns</sup>
19	<b>Ci</b>	0.68 <sup>ns</sup>	0.65 <sup>ns</sup>	-0.14 <sup>ns</sup>	-0.07 <sup>ns</sup>	-0.30 <sup>ns</sup>
20	<b>Ci/Ca</b>	0.81 <sup>ns</sup>	0.54 <sup>ns</sup>	-0.20 <sup>ns</sup>	-0.11 <sup>ns</sup>	-0.02 <sup>ns</sup>
21	<b>A/Ci</b>	0.45 <sup>ns</sup>	-0.81 <sup>ns</sup>	0.26 <sup>ns</sup>	0.10 <sup>ns</sup>	0.26 <sup>ns</sup>
22	<b>A/E</b>	-0.46 <sup>ns</sup>	-0.37 <sup>ns</sup>	0.62 <sup>ns</sup>	0.46 <sup>ns</sup>	-0.24 <sup>ns</sup>
23	<b>A/gs</b>	-0.65 <sup>ns</sup>	-0.30 <sup>ns</sup>	0.55 <sup>ns</sup>	0.38 <sup>ns</sup>	-0.20 <sup>ns</sup>
24	<b>ΦPSII</b>	0.55 <sup>ns</sup>	-0.77 <sup>ns</sup>	0.22 <sup>ns</sup>	-0.03 <sup>ns</sup>	-0.24 <sup>ns</sup>
25	<b>ETR</b>	0.36 <sup>ns</sup>	-0.70 <sup>ns</sup>	0.24 <sup>ns</sup>	-0.17 <sup>ns</sup>	0.53 <sup>ns</sup>
26	<b>Chl a</b>	0.59 <sup>ns</sup>	-0.58 <sup>ns</sup>	0.37 <sup>ns</sup>	0.23 <sup>ns</sup>	0.36 <sup>ns</sup>
27	<b>Chl b</b>	0.98**	0.02 <sup>ns</sup>	-0.08 <sup>ns</sup>	-0.20 <sup>ns</sup>	0.00 <sup>ns</sup>
28	<b>Chl a+b</b>	0.81 <sup>ns</sup>	-0.49 <sup>ns</sup>	0.27 <sup>ns</sup>	0.08 <sup>ns</sup>	0.17 <sup>ns</sup>
29	<b>Chl a/b</b>	-0.71 <sup>ns</sup>	0.43 <sup>ns</sup>	-0.25 <sup>ns</sup>	0.44 <sup>ns</sup>	0.22 <sup>ns</sup>
30	<b>Ψ<sub>w</sub></b>	0.15 <sup>ns</sup>	-0.47 <sup>ns</sup>	0.40 <sup>ns</sup>	-0.77 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>
31	<b>K<sub>F</sub></b>	0.57 <sup>ns</sup>	-0.04 <sup>ns</sup>	0.57 <sup>ns</sup>	-0.58 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>
32	<b>AF</b>	0.17 <sup>ns</sup>	-0.16 <sup>ns</sup>	0.52 <sup>ns</sup>	0.80 <sup>ns</sup>	-0.17 <sup>ns</sup>
33	<b>AFE</b>	-0.77 <sup>ns</sup>	-0.03 <sup>ns</sup>	-0.35 <sup>ns</sup>	0.44 <sup>ns</sup>	-0.28 <sup>ns</sup>
34	<b>TLE</b>	-0.69 <sup>ns</sup>	-0.49 <sup>ns</sup>	0.27 <sup>ns</sup>	-0.41 <sup>ns</sup>	-0.18 <sup>ns</sup>

\*\*,\* e <sup>ns</sup> Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente, pelo teste de F.



**Fig. 10.** Análise de componentes principais do experimento com o nitrogênio (N), e agrupamento dos tratamentos por clusters hierárquicos pelo método de Ward em plantas de *H. stigonocarpa*.

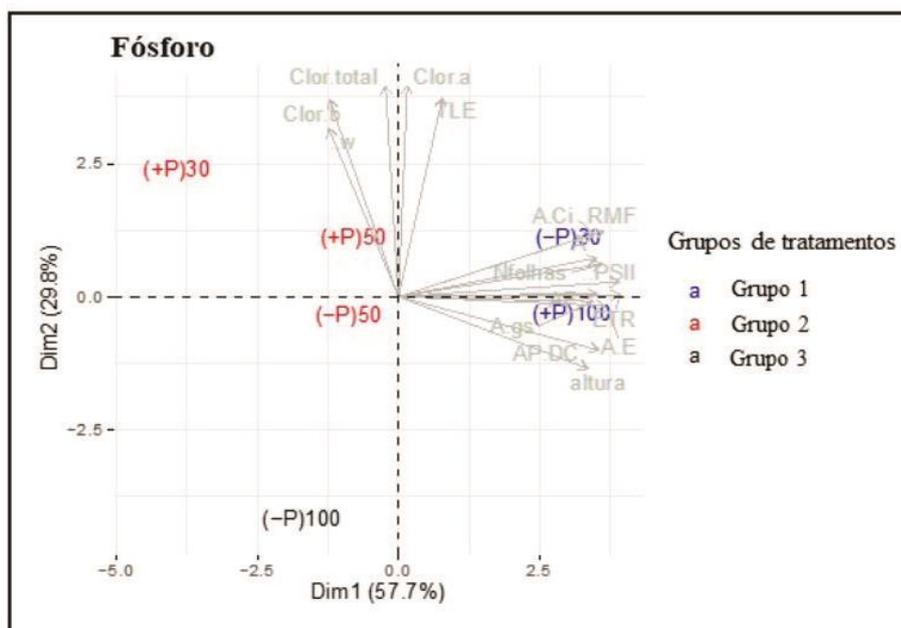
### 3.8. Experimento de fósforo: correlação de Pearson e multivariada

Houve correlação significativa entre variáveis altura, NF, AP/DC, RMF, A, A/Ci, A/E, A/gS,  $\Phi$ PSII, ETR e AF e o Dim.1; e entre as variáveis de Chl *a*, Chl *b*, Chl *a+b*,  $\Psi_w$  e TLE e o Dim.2 (Tabela 3). Dessa forma, a análise dos componentes principais foi refeita somente com as variáveis que apresentaram correlação significativa como o Dim.1 e Dim.2 (Fig. 11). 87,5% da variação dos dados é explicada pelas correlações das variáveis significativas (Fig. 11).

**Tabela 3.** Correlação de Pearson entre as coordenadas das componentes principais (CP) 1 e 5 com os valores obtidos para cada variável avaliada estandardizada do experimento com fósforo em plantas de *H. stigonocarpa*.

	Variáveis	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
1	<b>altura</b>	0.82*	-0.44 <sup>ns</sup>	-0.04 <sup>ns</sup>	-0.05 <sup>ns</sup>	-0.37 <sup>ns</sup>
2	<b>diâmetro</b>	0.51 <sup>ns</sup>	-0.40 <sup>ns</sup>	0.76 <sup>ns</sup>	-0.09 <sup>ns</sup>	-0.04 <sup>ns</sup>
3	<b>NF</b>	0.89*	0.08 <sup>ns</sup>	-0.16 <sup>ns</sup>	-0.15 <sup>ns</sup>	-0.39 <sup>ns</sup>
4	<b>AP/DC</b>	0.85*	-0.33 <sup>ns</sup>	-0.34 <sup>ns</sup>	-0.14 <sup>ns</sup>	-0.17 <sup>ns</sup>
5	<b>TCR altura</b>	0.80 <sup>ns</sup>	0.31 <sup>ns</sup>	-0.51 <sup>ns</sup>	-0.05 <sup>ns</sup>	0.09 <sup>ns</sup>
6	<b>TCR caule</b>	0.61 <sup>ns</sup>	0.66 <sup>ns</sup>	-0.32 <sup>ns</sup>	0.30 <sup>ns</sup>	0.03 <sup>ns</sup>
7	<b>MSF</b>	0.20 <sup>ns</sup>	0.78 <sup>ns</sup>	0.58 <sup>ns</sup>	-0.08 <sup>ns</sup>	-0.05 <sup>ns</sup>
8	<b>MSC</b>	0.48 <sup>ns</sup>	-0.11 <sup>ns</sup>	0.79 <sup>ns</sup>	-0.03 <sup>ns</sup>	-0.37 <sup>ns</sup>
9	<b>MSR</b>	0.30 <sup>ns</sup>	0.62 <sup>ns</sup>	0.45 <sup>ns</sup>	-0.09 <sup>ns</sup>	0.56 <sup>ns</sup>
10	<b>MSPA</b>	0.35 <sup>ns</sup>	0.53 <sup>ns</sup>	0.75 <sup>ns</sup>	-0.07 <sup>ns</sup>	-0.19 <sup>ns</sup>
11	<b>MST</b>	0.36 <sup>ns</sup>	0.63 <sup>ns</sup>	0.66 <sup>ns</sup>	-0.09 <sup>ns</sup>	0.21 <sup>ns</sup>
12	<b>R/PA</b>	0.43 <sup>ns</sup>	-0.43 <sup>ns</sup>	-0.07 <sup>ns</sup>	0.64 <sup>ns</sup>	0.46 <sup>ns</sup>
13	<b>RMF</b>	0.89*	0.32 <sup>ns</sup>	0.03 <sup>ns</sup>	-0.33 <sup>ns</sup>	-0.03 <sup>ns</sup>
14	<b>RMC</b>	0.42 <sup>ns</sup>	-0.79 <sup>ns</sup>	0.23 <sup>ns</sup>	0.29 <sup>ns</sup>	-0.24 <sup>ns</sup>
15	<b>RMR</b>	0.65 <sup>ns</sup>	-0.49 <sup>ns</sup>	0.17 <sup>ns</sup>	0.25 <sup>ns</sup>	0.48 <sup>ns</sup>
16	<b>A</b>	0.86*	0.15 <sup>ns</sup>	-0.41 <sup>ns</sup>	-0.23 <sup>ns</sup>	0.15 <sup>ns</sup>
17	<b>E</b>	0.77 <sup>ns</sup>	0.20 <sup>ns</sup>	-0.58 <sup>ns</sup>	-0.12 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>
18	<b>gs</b>	0.75 <sup>ns</sup>	0.15 <sup>ns</sup>	-0.59 <sup>ns</sup>	-0.16 <sup>ns</sup>	0.20 <sup>ns</sup>
19	<b>Ci</b>	0.70 <sup>ns</sup>	-0.48 <sup>ns</sup>	-0.07 <sup>ns</sup>	0.48 <sup>ns</sup>	-0.19 <sup>ns</sup>
20	<b>Ci/Ca</b>	0.70 <sup>ns</sup>	-0.48 <sup>ns</sup>	-0.09 <sup>ns</sup>	0.48 <sup>ns</sup>	-0.20 <sup>ns</sup>
21	<b>A/Ci</b>	0.84*	0.31 <sup>ns</sup>	-0.23 <sup>ns</sup>	-0.37 <sup>ns</sup>	0.12 <sup>ns</sup>
22	<b>A/E</b>	0.92**	-0.08 <sup>ns</sup>	0.32 <sup>ns</sup>	-0.09 <sup>ns</sup>	0.18 <sup>ns</sup>
23	<b>A/gs</b>	0.88*	-0.07 <sup>ns</sup>	0.44 <sup>ns</sup>	-0.02 <sup>ns</sup>	0.14 <sup>ns</sup>
24	<b>ΦPSII</b>	1.00**	-0.03 <sup>ns</sup>	-0.07 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>
25	<b>ETR</b>	1.00**	-0.08 <sup>ns</sup>	-0.04 <sup>ns</sup>	-0.01 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>
26	<b>Chl a</b>	0.13 <sup>ns</sup>	0.95**	-0.13 <sup>ns</sup>	0.24 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>
27	<b>Chl b</b>	-0.19 <sup>ns</sup>	0.86*	-0.03 <sup>ns</sup>	0.47 <sup>ns</sup>	-0.10 <sup>ns</sup>
28	<b>Chl a+b</b>	0.04 <sup>ns</sup>	0.94**	-0.11 <sup>ns</sup>	0.31 <sup>ns</sup>	-0.07 <sup>ns</sup>
29	<b>Chl a/b</b>	0.37 <sup>ns</sup>	0.69 <sup>ns</sup>	0.30 <sup>ns</sup>	0.54 <sup>ns</sup>	0.08 <sup>ns</sup>
30	<b>Ψw</b>	-0.28 <sup>ns</sup>	0.87*	0.30 <sup>ns</sup>	-0.12 <sup>ns</sup>	-0.23 <sup>ns</sup>
31	<b>K<sub>F</sub></b>	-0.39 <sup>ns</sup>	0.76 <sup>ns</sup>	-0.39 <sup>ns</sup>	-0.30 <sup>ns</sup>	0.15 <sup>ns</sup>
32	<b>AF</b>	0.86*	0.03 <sup>ns</sup>	0.40 <sup>ns</sup>	-0.32 <sup>ns</sup>	0.06 <sup>ns</sup>
33	<b>AFE</b>	-0.42 <sup>ns</sup>	-0.60 <sup>ns</sup>	0.36 <sup>ns</sup>	0.03 <sup>ns</sup>	0.57 <sup>ns</sup>
34	<b>TLE</b>	0.32 <sup>ns</sup>	0.82*	-0.09 <sup>ns</sup>	0.46 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>

\*\*,\* e <sup>ns</sup> Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente, pelo teste de F.



**Fig. 11.** Análise de componentes principais do experimento com o fósforo (P), e agrupamento dos tratamentos por clusters hierárquicos pelo método de Ward em plantas de *H. stigonocarpa*.

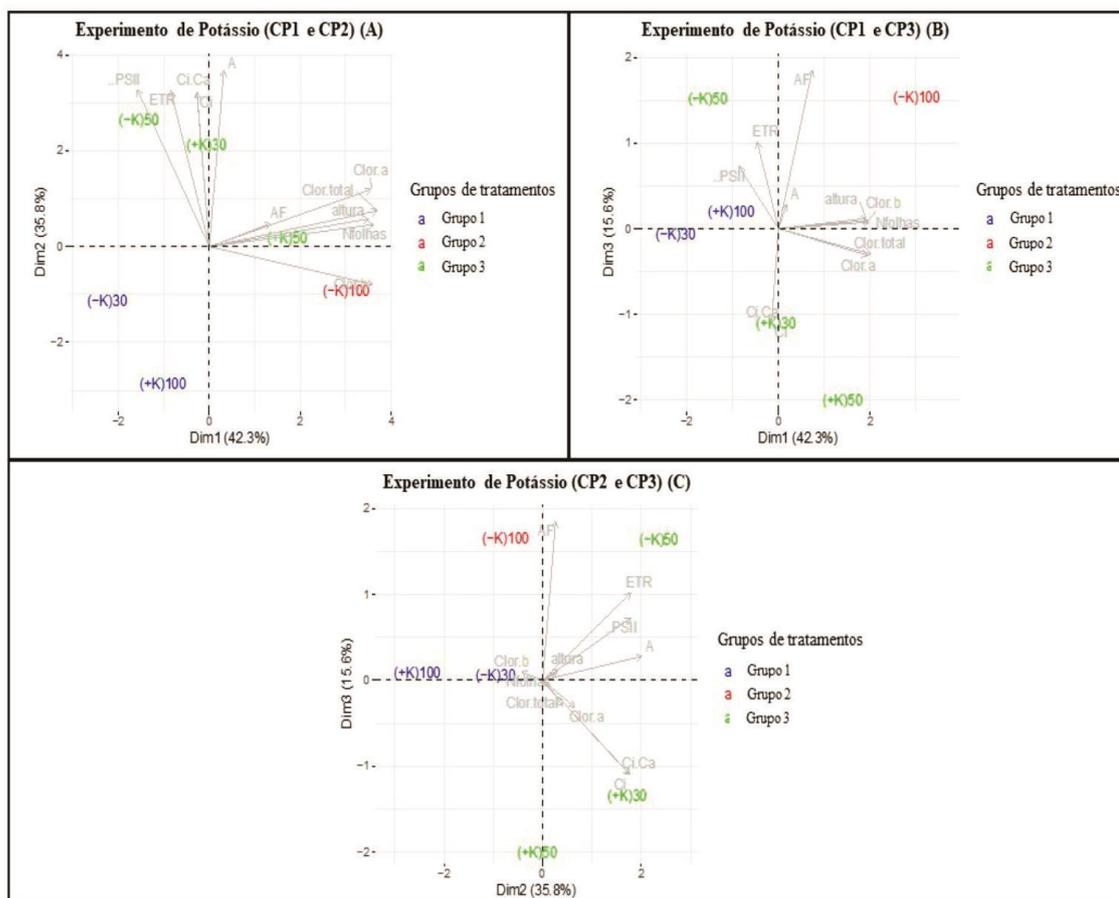
### 3.9. Experimento de potássio: correlação de Person e multivariada

Houve correlação significativa entre A, Ci, Ci/Ca,  $\Phi$ PSII e ETR e o Dim.1; altura, NF, Chl a, Chl b e Chl a+b e o Dim.2, entre AF e o Dim.4 (Tabela 4). 78,1% da variação dos dados da CP1 e CP2 (Fig. 12A) é explicada pelas correlações das variáveis significativas e, enquanto que para a CP1e CP3 são apenas 57,9% (Fig. 12B) e para a CP2 e CP3, 51,4% (Fig. 12C).

**Tabela 4.** Correlação de Pearson entre as coordenadas das componentes principais (CP) 1 e 5 com os valores obtidos para cada variável avaliada estandardizada do experimento com potássio em plantas de *H. stigonocarpa*.

	Variáveis	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
1	<b>altura</b>	0.20 <sup>ns</sup>	0.92**	0.23 <sup>ns</sup>	0.05 <sup>ns</sup>	-0.23 <sup>ns</sup>
2	<b>diâmetro</b>	0.61 <sup>ns</sup>	0.56 <sup>ns</sup>	0.31 <sup>ns</sup>	0.46 <sup>ns</sup>	-0.05 <sup>ns</sup>
3	<b>NF</b>	0.17 <sup>ns</sup>	0.94**	0.25 <sup>ns</sup>	0.06 <sup>ns</sup>	-0.14 <sup>ns</sup>
4	<b>AP/DC</b>	0.60 <sup>ns</sup>	0.64 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>	-0.44 <sup>ns</sup>	-0.19 <sup>ns</sup>
5	<b>TCR altura</b>	0.42 <sup>ns</sup>	0.69 <sup>ns</sup>	0.13 <sup>ns</sup>	0.41 <sup>ns</sup>	0.40 <sup>ns</sup>
6	<b>TCR caule</b>	0.19 <sup>ns</sup>	0.74 <sup>ns</sup>	0.37 <sup>ns</sup>	0.51 <sup>ns</sup>	-0.12 <sup>ns</sup>
7	<b>MSF</b>	0.81 <sup>ns</sup>	-0.20 <sup>ns</sup>	-0.49 <sup>ns</sup>	0.23 <sup>ns</sup>	-0.12 <sup>ns</sup>
8	<b>MSC</b>	0.73 <sup>ns</sup>	-0.28 <sup>ns</sup>	-0.59 <sup>ns</sup>	0.09 <sup>ns</sup>	0.17 <sup>ns</sup>
9	<b>MSR</b>	0.75 <sup>ns</sup>	-0.59 <sup>ns</sup>	-0.15 <sup>ns</sup>	0.19 <sup>ns</sup>	0.16 <sup>ns</sup>
10	<b>MSPA</b>	0.74 <sup>ns</sup>	-0.27 <sup>ns</sup>	-0.59 <sup>ns</sup>	0.18 <sup>ns</sup>	-0.05 <sup>ns</sup>
11	<b>MST</b>	0.77 <sup>ns</sup>	-0.48 <sup>ns</sup>	-0.37 <sup>ns</sup>	0.20 <sup>ns</sup>	0.06 <sup>ns</sup>
12	<b>R/PA</b>	0.54 <sup>ns</sup>	-0.74 <sup>ns</sup>	0.29 <sup>ns</sup>	0.17 <sup>ns</sup>	-0.19 <sup>ns</sup>
13	<b>RMF</b>	0.51 <sup>ns</sup>	0.70 <sup>ns</sup>	0.41 <sup>ns</sup>	0.28 <sup>ns</sup>	-0.05 <sup>ns</sup>
14	<b>RMC</b>	0.77 <sup>ns</sup>	0.35 <sup>ns</sup>	0.25 <sup>ns</sup>	-0.37 <sup>ns</sup>	-0.28 <sup>ns</sup>
15	<b>RMR</b>	0.62 <sup>ns</sup>	-0.55 <sup>ns</sup>	0.46 <sup>ns</sup>	0.30 <sup>ns</sup>	-0.11 <sup>ns</sup>
16	<b>A</b>	0.92**	0.12 <sup>ns</sup>	-0.31 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>	-0.19 <sup>ns</sup>
17	<b>E</b>	0.60 <sup>ns</sup>	0.39 <sup>ns</sup>	-0.47 <sup>ns</sup>	-0.52 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>
18	<b>gs</b>	0.79 <sup>ns</sup>	0.17 <sup>ns</sup>	-0.33 <sup>ns</sup>	-0.49 <sup>ns</sup>	0.09 <sup>ns</sup>
19	<b>Ci</b>	0.84*	-0.12 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	-0.40 <sup>ns</sup>	0.34 <sup>ns</sup>
20	<b>Ci/Ca</b>	0.84*	-0.12 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	-0.40 <sup>ns</sup>	0.34 <sup>ns</sup>
21	<b>A/Ci</b>	-0.61 <sup>ns</sup>	-0.59 <sup>ns</sup>	0.25 <sup>ns</sup>	-0.47 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>
22	<b>A/E</b>	-0.41 <sup>ns</sup>	-0.69 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	0.53 <sup>ns</sup>	0.25 <sup>ns</sup>
23	<b>A/gs</b>	-0.50 <sup>ns</sup>	-0.67 <sup>ns</sup>	0.15 <sup>ns</sup>	0.43 <sup>ns</sup>	0.31 <sup>ns</sup>
24	<b>ΦPSII</b>	0.81*	-0.40 <sup>ns</sup>	-0.27 <sup>ns</sup>	0.29 <sup>ns</sup>	-0.12 <sup>ns</sup>
25	<b>ETR</b>	0.83*	-0.22 <sup>ns</sup>	-0.19 <sup>ns</sup>	0.43 <sup>ns</sup>	-0.20 <sup>ns</sup>
26	<b>Chl a</b>	0.30 <sup>ns</sup>	0.90*	-0.11 <sup>ns</sup>	-0.12 <sup>ns</sup>	0.26 <sup>ns</sup>
27	<b>Chl b</b>	-0.21 <sup>ns</sup>	0.88*	0.02 <sup>ns</sup>	0.16 <sup>ns</sup>	0.39 <sup>ns</sup>
28	<b>Chl a+b</b>	0.19 <sup>ns</sup>	0.93**	-0.04 <sup>ns</sup>	-0.08 <sup>ns</sup>	0.30 <sup>ns</sup>
29	<b>Chl a/b</b>	0.66 <sup>ns</sup>	-0.22 <sup>ns</sup>	0.71 <sup>ns</sup>	-0.03 <sup>ns</sup>	-0.10 <sup>ns</sup>
30	<b>Ψw</b>	0.61 <sup>ns</sup>	-0.31 <sup>ns</sup>	0.72 <sup>ns</sup>	-0.01 <sup>ns</sup>	0.10 <sup>ns</sup>
31	<b>K<sub>F</sub></b>	0.46 <sup>ns</sup>	-0.77 <sup>ns</sup>	0.36 <sup>ns</sup>	-0.27 <sup>ns</sup>	0.04 <sup>ns</sup>
32	<b>AF</b>	0.08 <sup>ns</sup>	0.32 <sup>ns</sup>	-0.29 <sup>ns</sup>	0.90*	0.08 <sup>ns</sup>
33	<b>AFE</b>	0.61 <sup>ns</sup>	-0.53 <sup>ns</sup>	0.47 <sup>ns</sup>	-0.27 <sup>ns</sup>	0.24 <sup>ns</sup>
34	<b>TLE</b>	0.78 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>	0.58 <sup>ns</sup>	0.14 <sup>ns</sup>	0.17 <sup>ns</sup>

\*\*,\* e <sup>ns</sup> Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente, pelo teste de F.



**Fig. 12.** Análise de componentes principais do experimento com o potássio (K), e agrupamento dos tratamentos por clusters hierárquicos pelo método de Ward em plantas de *H. stigonocarpa*.

#### 4. DISCUSSÃO

A altura de plantas, diâmetro do caule, assim como a taxa de crescimento relativo dessas variáveis, aumentou tanto nas plantas com adubação suplementar em nitrogênio, fósforo e potássio, quanto nas plantas sem adubação suplementar expostas ao DH de 50% e no tratamento controle a 100% da CC. Esses resultados podem variar de espécie para espécie, dependendo do comportamento, disponibilidade de nutrientes e gravidade do estresse (Huang et al., 2018b). Portanto, a suplementação adequada de N, P ou K pode fazer com que a espécie se adapte melhor aos efeitos adversos do DH sobre crescimento e desenvolvimento das plantas (Tariq et al., 2017 e 2018).

A condutância estomática e a razão entre concentração  $C_i/C_a$  para as plantas com adubação suplementar em nitrogênio indicando que não há limitações estomáticas, como também foi observado o aumento das relações  $C_i/C_a$  e  $A/C_i$ , nas plantas bem nutridas com potássio nos DH de 30% e 50% da CC. Este melhor desempenho

bioquímico, ao suprimento de N, pode estar diretamente ligado a atividade enzimática da Rubisco, no Ciclo de Calvin, enzima relacionada à fotorrespiração. Considerado um dos principais mecanismos de fixação de CO<sub>2</sub> em plantas com metabolismo fotossintético C3 (Sage et al., 1987; Evans, 1989), predominante na espécie de estudo. Além disso, o nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sob condições de estresse hídrico também atua na sinalização celular do fechamento estomático (Huang et al., 2018a). Enquanto, o K<sup>+</sup>, combinado ao DH, não impediu de elevar a concentração interna de CO<sub>2</sub> dentro dos cloroplastos (folhas), mesmo que a g<sub>s</sub> não tenha sido afetada. Esse efeito pode ser atribuído ainda ao aumento do índice de Chl *a* e da AFE, indicando que a eficiência fotossintética não era o único condicionador para mitigar o estresse causado pelo DH. Esse aumento da fotossíntese líquida promovido pelo suprimento de K deve-se às funções osmoprotetoras para manter a turgescência celular, controle estomático e, conseqüentemente, o metabolismo fotossintético (Hasanuzzaman et al. 2018).

Os parâmetros de trocas gasosas com adubação suplementar em fósforo não foram influenciados pelas reposições hídricas. A falta de resposta do suprimento de P, na taxa fotossintética líquida pode ser um indicativo de fotoinibição pela não redução e transferência de elétrons à difusão de CO<sub>2</sub>. Tais alterações podem estar associadas, ainda, com a desregulação do controle estomático, com a indução do aumento da concentração de ácido abscísico (ABA), afeta negativamente a atividade da Rubisco (Reis et al., 2018), aumenta o processo de fotorrespiração, mecanismo de proteção para evitar os efeitos do DH e minimizar os danos nos fotossistemas (PSII e PSI) contra a fotoinibição (Voss et al., 2013). As variáveis de g<sub>s</sub>, Ci/Ca e A/Ci, sem adubação suplementar, responderam nos maiores níveis de reposições hídricas de 50% e 100% da CC, ao ampliar o DH em 30% foi considerado um fator de estresse para as plantas de *H. stigonocarpa*. Esses resultados estão de acordo com os relatados anteriormente por Costa et al., (2015) para mesma espécie de estudo, sob condições de DH.

O aumento do rendimento quântico efetivo do ΦPSII, e a cadeia de transporte de elétrons do ETR, indicando máxima eficiência fotoquímica nas plantas com adubação suplementar em nitrogênio e potássio exposta ao DH de 30%. Diferentemente do observado para as plantas adubadas com fósforo responderam as reposições hídricas de 50% e 100% da CC. Essa diferença pode estar relacionada aos efeitos dos nutrientes, uma vez que, a redução do NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, pode servir como dissipador de elétrons contra a fotoinibição do fotossistema I e II, sob condições limitadas de água (Yi et al., 2014). O potássio acumulado no vacúolo desempenhou papel importante tanto nos processos de

carboxilação e transporte de elétrons nos cloroplastos através do ajustamento osmótico (Zahoor et al., 2017). As plantas adubadas com fósforo não tiveram limitação em relação a síntese de ATP e NADPH, após exposição aos regimes testados (50% e 100%), porém, levou à fotoinibição, como indicado pela falta de resposta dos parâmetros de trocas gasosas e, em consequência, a alterações no metabolismo do carbono (Liu et al. 2015).

Os DH de 30% e 50%, permitiram os melhores valores dos parâmetros da fluorescência da clorofila *a*, nas plantas sem adubação suplementar. Isso pode ser explicado devido a espécie estudada ser adaptada até certo ponto à alta intensidade luminosa, alta temperatura e baixa umidade relativa, são condições ambientais frequentes em áreas nativas de Cerrado, e também pode estar relacionado diretamente com o grupo sucessional, consistente com que se espera para as espécies tidas como clímax (Costa et al., 2015).

A produção de biomassa e as razões alométricas se mostraram significativas e correlacionadas em plantas com e sem adubação suplementar de nitrogênio nas reposições hídricas máximas de 50% e 100% da CC. A MSF, RMF e NF aumentou nas plantas com adubação suplementação em potássio nos DH de 30% e 50% e sem adubação suplementes nas máximas reposições hídricas de 50% e 100% da CC. A RMF houve efeito significativo, apenas para as plantas sem adubação suplementar em fósforo no DH de 30%, permitindo o crescimento, mas não a produção biomassa, justificando a ausência de resposta das variáveis fisiológicas, conforme discutido anteriormente. Uma explicação para essa resposta se deve ao maior acúmulo desses íons de P e K nas folhas, sem contribuir para a partição de biomassa das plantas de *H. stigonocarpa* (Poorter et al., 2011; Eziz al., 2017).

As plantas sem adubação suplementar e com suplementação de nitrogênio e fósforo, independente do regime hídrico aplicado afetaram positivamente o  $\Psi_w$  nas folhas, mas não a condutividade hidráulica foliar. Sob estresse hídrico, o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), pode aumentar a atividade de aquaporinas nas raízes (Ding et al., 2015). O aumento dos níveis de aquaporina permite que as plantas tenham uma capacidade adicional para lidar com o déficit hídrico para manter o potencial hídrico foliar (Lian et al., 2004; Liu et al., 2013; Huang et al., 2018a). Já plantas bem nutridas em P pode aumentar o sistema radicular sob condições de estresse para melhor captação de água, como mecanismo de defesa contra os efeitos do DH (Comas et al., 2013; Tariq et al., 2017 e 2018). Essa é uma resposta direta, a maior eficiência instantânea ( $A/E$ ) e

intrínseca ( $A/g_s$ ) de absorção, transporte e utilização da água, conforme observado nas plantas de *H. stigonocarpa* submetidas aos DH de 30% e 50% da CC.

Não constatou-se resposta significativa para  $\Psi_w$  e  $K_F$ , nas plantas bem nutridas de potássio indicando que a exposição prolongada ao DH afetou negativamente a manutenção do turgor celular e o ajuste osmótico nos tecidos. Para lidar com essa situação de estresse, as plantas de *H. stigonocarpa* possivelmente direcionaram à energia absorvida na etapa fotoquímica ( $\Phi_{PSII}$  e ETR) para aumentar a difusão de  $CO_2$  da razão  $C_i/C_a$  e  $A/C_i$ , contribuindo para a TCR da altura. O que indicam o efeito protetor do  $K^+$  sobre o controle estomático, nas trocas gasosas para mitigar os feitos do DH (Wang et al., 2013).

A falta de resposta da taxa de liberação de eletrólitos entre os fatores “estados nutricionais” e “reposições hídricas”, ao contrário do esperado, não promoveu danos na membrana celular. Isso significa que o excesso de energia radiante não está sendo direcionado ao extravasamento do conteúdo celular, subsequente à saída de íons da célula (Dexter et al., 1932). A ausência de danos na membrana celular pode estar relacionada a presença de mecanismos de defesas como o  $NH_4^+$ , responsável por atuar como estressor oxidativo leve, induzindo a ativação de enzimas antioxidantes envolvidas na proteção das plantas contra estresse hídrico (Fernández-Crespo et al., 2012 e 2014). O cálcio (Ca) do superfosfato triplo fonte aplicada nos tratamentos de P, pode ter atuado como sinalizador bioquímico responsáveis por manter a estabilização de membrana da parede celular e na regulação do metabolismo através da cálcio-calmodulina (Sanders et al., 2002; Zou et al., 2010; Aliniaiefard et al., 2020). O potássio também está envolvido na ativação enzimática contra diversos estresses abiótico na detoxificação de Espécies Reativas de Oxigênio (EROs), responsáveis por desencadear à peroxidação lipídica da membrana (Hasanuzzaman et al., 2018).

Quanto à hipótese levantada no problema da pesquisa apontou que plantas de *Hymenaea stigonocarpa*, bem nutridas em nitrogênio (dose:  $300 \text{ g m}^{-3}$  de N: ureia), fósforo (dose:  $600 \text{ g m}^{-3}$  de P: superfosfato triplo) e potássio (dose:  $80 \text{ g m}^{-3}$  de K: cloreto de potássio) apresentaram maior tolerância ao impedir os efeitos deletérios dos DH de 30% e 50% da CC. Os resultados, ainda, demonstraram que plantas sem adubação suplementar combinado ao DH de 30% reduziu drasticamente o crescimento, eficiência fotossintética e a produção de biomassa, sugerindo que o DH teve apenas efeito secundário, sendo o +N, +P e +K foram os determinas primários na proteção desta espécie, nessas condições de estudo.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados, apresentados neste estudo, permitiram identificar as doses ideais para mitigar os efeitos deletérios do déficit hídrico: 30% e 50%, conforme verificado na taxa de crescimento relativo, fotossíntese e relações hídricas das plantas de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. Ex Hayne. As plantas sem adubação suplementar promoveram alterações no comportamento morfofisiológico e nas relações hídricas máximas testadas de 50% a 100% da capacidade de campo dos vasos.

## 6. AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela concessão da bolsa, ao Laboratório de Hidráulica e Irrigação, Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais, Laboratório de Química Agrícola e o Laboratório de Análise de Solo e Tecido Foliar. Ao IF Goiano – Campus Rio Verde, pela oportunidade de qualificação profissional e crescimento pessoal.

## 7. REFERÊNCIAS

- Aliniaiefard S., Shomali A., Seifikalhor M., Lastochkina O., 2020. Calcium Signaling in Plants Under Drought. In: Hasanuzzaman M., Tanveer M. (eds) Salt and Drought Stress Tolerance in Plants. Signaling and Communication in Plants. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40277-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40277-8_10)
- Ahanger, M.A., Morad-Talab, N., Abd-Allah, E.F., Ahmad, P., Hajiboland, R., 2016. Plant growth under drought stress: Significance of mineral nutrients. Water Stress and Crop Plants: A Sustainable Approach 2, 649–668. <https://doi.org/10.1002/9781119054450.ch37>
- Benincasa, M.M.P., 2003. Análise de crescimento de plantas. Jaboticabal, SP, FUNEP, 41p.
- Brodribb, T.J., Holbrook, N.M., 2003. Changes in leaf hydraulic conductance during leaf shedding in seasonally dry tropical forest. New Phytologist 158, 295–303. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00736.x>
- Comas, L.H, Becker, S.R., Cruz, V.M.V., Byrne, P.F., Dierig, D.A., 2013. Root traits contributing to plant productivity under drought. Frontiers in Plant Science 4,1–16. <http://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442>
- Costa, A.C., Rezende-Silva, S.L., Megguer, C.A., Moura, L.M.F., Rosa, M., Silva, A.A., 2015. The effect of irradiance and water restriction on photosynthesis in young jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*) plants. Photosynthetica 53,

118–127. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0085-6>

- Ding, L., Gao, C., Li, Y., Li, Y., Zhu, Y., Xu, G., Shen, Q., Kaldenhoff, R., Kai, L., Guo, S., 2015. The enhanced drought tolerance of rice plants under ammonium is related to aquaporin (AQP). *Plant Science* 234, 14–21. <http://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.01.016>
- Dexter, S.T., Tottinham, W.E.; Graber, L.F., 1932. Investigations of the hardiness of plants by measurement of electrical conductivity. *Plant Physiology* 7, 63–78. <http://doi.org/10.1104/pp.7.1.63>
- Evans, J.R., 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. *Oecologia*, 78, 9–19. <https://doi.org/10.1007/BF00377192>
- Eziz, A., Yan, Z., Tian, D., Han., W., Tang, Z., Fang, J., 2017. Drought effect on plant biomass allocation: A meta-analysis. *Ecology and evolution* 7, 11002-11010. <https://doi.org/10.1002/ece3.3630>
- Fernández-Crespo, E., Camanes, G., García-Agustín, P., 2012. Ammonium enhances resistance to salinity stress in citrus plants. *Journal of plant physiology* 169, 1183–1191. <http://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.04.011>
- Fernández-Crespo, E., Gómez-Pastor, R., Scalschi, L., Llorens, E., Camañes, G., García-Agustín, P., 2014. NH<sub>4</sub><sup>+</sup> induces antioxidant cellular machinery and provides resistance to salt stress in citrus plants. *Trees* 28, 1693–1704. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1078-y>
- Ferreira, D.F., 2014. Sisvar: A Guide for Its Bootstrap Procedures in Multiple Comparisons. *Ciência e Agrotecnologia* 38, 109-112. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M.B., Nahar, K., Hossain, M.S., Mahmud, J.A., Hossen, M.S., Masud, A.A.C., Moumita, Fujita, M., 2018. Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy* 8, 1–29. <http://doi.org/10.3390/agronomy8030031>
- Huang, L., Li, M., Shao, Y., Sun, T., Li, C., Ma, F., 2018a. Ammonium uptake increases in response to PEG-induced drought stress in *Malus hupehensis*. *Environmental and Experimental Botany* 151, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.04.007>
- Huang, L., Li, M., Zhou, K., Sun, T., Hu, L., Li, C., Ma, F., 2018b. Uptake and metabolism of ammonium and nitrate in response to drought stress in *Malus prunifolia*. *Plant Physiology and Biochemistry* 127, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.031>
- Jadoski, S.O., Lopes, E.C, Maggi, M.F., Suchoronczek, A., Saito, L.R., Denega, S., 2012. Método de determinação da área foliar do cultivar de batata Ágata a partir de dimensões lineares. *Semina: Ciências Agrárias*, 33, 2545–2554. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33Supl1p2545>

- Kassambara, A., Mundt, F., 2020. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.
- Le, S., Josse, J., Husson, F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software* 25, 1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>.
- Lian, H.L., Yu, X., Ye, Q., Ding, X.S., Kitagawa, Y., Kwak, S.S., Su, W.A., Tang, Z.C., 2004. The role of aquaporin RWC3 in drought avoidance in rice. *Plant Cell Physiol.* 45, 481–489. <http://dx.doi.org/10.1093/pcp/pch058>
- Liu, C., Li, C., Liang, D., Ma, F., Wang, S., Wang P., Wang R., 2013. Aquaporin expression in response to water-deficit stress in two *Malus* species: relationship with physiological status and drought tolerance. *Plant Growth Regulation*, 70, 187–197. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9791-x>
- Liu, C., Wang, Y., Pan, K., Jin, Y., Li, W., Zhang, L., 2015. Effects of phosphorus application on photosynthetic carbon and nitrogen metabolism, water use efficiency and growth of dwarf bamboo (*Fargesia rufa*) subjected to water deficit. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.07.018>
- Liu, Y., Zhang, J., Qin, Y., 2020. How global warming alter future maize yield and water use efficiency in China. *Technological Forecasting and Social Change*, 160, 120229. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120229>
- Oliveira, F.G.S., Araújo, C.S., Rolim, L.A., Barbosa-Filho, J.M., Almeida, J.R.G.S., 2018. The Genus *Hymenaea* (Fabaceae): A Chemical and Pharmacological Review. *Studies in Natural Products Chemistry* 58, 339–388. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64056-7.00012-X>
- Orsi, P.R., Bonamin, F., Severi, J.A., Santos, R.C., Vilegas, W., Hiruma-Lima, C.A., STASI, L.C., 2012. *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne: A Brazilian medicinal plant with gastric and duodenal anti-ulcer and antidiarrheal effects in experimental rodent models. *Journal of Ethnopharmacology* 143, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.06.001>
- Pimentel, C., Sarr, B., Diouf, O., Abboud, A.C.S., Macauley, H.R., 2002. Tolerância protoplasmática foliar à seca, em dois genótipos de caupi cultivados em campo. *Revista Universidade Rural Série Ciências da Vida* 22, 07–14.
- Poorter, H., Niklas K.J., Reich, P.B., Oleksyn, J., Poot, P., Mommer, L., 2012. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist* 193, 30–50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
- R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

- Raij, B.V., 1981. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato.
- Reis, L.C., Foresti, A., Scalon, S.P.Q., Dresch, D.M., Pereira, Z. V., 2018. Effect of water deficit and abscisic acid on photosynthetic and antioxidant metabolism in seedlings of *Calophyllum brasiliense* (CAMBESS.). *Cerne* 24, 387–396. <https://doi.org/10.1590/01047760201824042603>
- Sage, R.F., Pearcy, R.W., Seemann J.R., 1987. The Nitrogen Use Efficiency of C3 and C4 Plants. *Plant Physiology* 85, 355–359. <https://doi.org/10.1104/pp.85.2.355>
- Sanders, D., Pelloux, J., Brownlee, C., Harper, J.F., 2002. Calcium at the Crossroads of Signaling. *The Plant Cell* 14, S401–S417. <https://doi.org/10.1105/tpc.002899>
- Santos, L.C.R., Costa, E., Leal, P.A.M., Nardelli, E.M.V., Souza, G.S.A., 2011. Ambientes protegidos e substratos com doses de composto orgânico comercial e solo na formação de mudas de Jatobazeiro em Aquidauana-MS. *Engenharia Agrícola* 31, 249–259. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000200005>.
- Silva, P.O., Carlos, L., Menezes-Silva, P.E., Costa, A.M., Rodrigues, C.R., Loram-Lourenço, L., Dias, J.S., 2019. Morphophysiological and nutritional behavior of *Hymenaea stigonocarpa* mart. Ex hayne (fabaceae) seedlings submitted to liming. *Revista Arvore* 43, 1–9. <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000300005>
- Silva, P.O., Carlos, L., Menezes-Silva, P.E., Costa, A.M., Barbosa, K.P., 2020. Physiological and morphological behavior of *Hymenaea stigonocarpa* seedlings submitted to Phosphorus. *Floresta e Ambiente* 27, 1–9. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.093317>
- Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O.A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., Sun, X., Song, D., Chen, W., Zhang, A., Wu, X., Zhang, L., Mingrui, D., Xiong, Q., Liu, C., 2017. Phosphorous application improves drought tolerance of *Phoebe zhennan*. *Frontiers in Plant Science* 8, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01561>
- Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O. A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., Zhang, L., Wu, X., Chen, W., Song, D., Huang, D., Xue, T., Zhang, A., 2018. Phosphorous fertilization alleviates drought effects on *Alnus cremastogyne* by regulating its antioxidant and osmotic potential. *Scientific Reports* 8, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24038-2>
- UNFCCC, 2015. Adoption of the Paris Agreement. In: Conference of the Parties. Paris, France. United Nations Framework Convention on Climate Change, pp. 1–32.
- Vasquez-Tello, A., Zuily-Fodil, Y., Pham Thi, A.T., Vieira da Silva, J.B., 1990. Electrolyte and Pi leakages and soluble sugar content as physiological tests for screening resistance to water stress in *Phaseolus* and *Vigna* species. *Journal of Experimental Botany* 41, 827–832. <https://doi.org/10.1093/jxb/41.7.827>

- Voss, I., Sunil, B., Scheibe, R., Raghavendra, A.S., 2013. Emerging concept for the role of photorespiration as an important part of abiotic stress response. *Plant Biology* 15, 713–722. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00710.x>
- Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., Guo, S., 2013. The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences* 14, 7370–7390. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>
- Yi, X.P., Zhang, Y.L., Yao, H.S., Zhang, X.J., Luo, H.H., Gou, L., Zhang, W.F., 2014. Alternative electron sinks are crucial for conferring photoprotection in field-grown cotton under water deficit during flowering and boll setting stages. *Functional Plant Biology* 41, 737–747. <https://doi.org/10.1071/FP13269>
- Zahoor, R., Zhao, W., Abid, M., Dong, H., Zhou, Z., 2017. Potassium application regulates nitrogen metabolism and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) functional leaf under drought stress. *Journal of Plant Physiology* 215, 30 – 38. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.05.001>
- Zou, J.J., Wei, F.J., Wang, C., Wu, J.J., Ratnasekera, D., Liu, W.X., Wu, W.H., 2010. Arabidopsis calcium-dependent protein kinase cpk10 functions in abscisic acid- and Ca<sup>2+</sup>-mediated stomatal regulation in response to drought stress. *Plant Physiology* 154, 1232–1243. <https://doi.org/10.1104/pp.110.157545>

## CONCLUSÃO GERAL

As doses de  $300 \text{ g m}^{-3}$  de nitrogênio,  $600 \text{ g m}^{-3}$  de fósforo e  $80 \text{ g m}^{-3}$  de potássio promoveram efeitos nas respostas morfoanatômicas, fisiológicos, nos índices de pigmentos e nutricionais das mudas de *Hymenaea stigonocarpa*. Os resultados deste estudo, ainda, demonstraram que as plantas com adubação suplementar em nitrogenada, fosfatada e potássica foram eficientes em mitigar os efeitos deletérios do estresse hídrico, mantendo a taxa de crescimento relativo, eficiência fotossintética, as razões alométricas da biomassa das plantas de *H. stigonocarpa*, potencial hídrico foliar e a integridade da membrana celular. As plantas sem adubação suplementar exerceram influência no desempenho morfofisiológico, assim como nas relações hídricas obtidas no DH de 50% e no tratamento controle de 100% da CC.