

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**



**EFEITOS DA ADUBAÇÃO POTÁSSICA NAS RESPOSTAS  
FOTOSSINTÉTICAS E NUTRICIONAIS DE GENÓTIPOS DE CACAU À  
DEFICIÊNCIA HÍDRICA NO SOLO.**

**FELIPE LOPES NEVES**

**ILHÉUS – BAHIA - BRASIL**

**FELIPE LOPES NEVES**

**EFEITOS DA ADUBAÇÃO POTÁSSICA NAS RESPOSTAS  
FOTOSSINTÉTICAS E NUTRICIONAIS DE GENÓTIPOS DE CACAU À  
DEFICIÊNCIA HÍDRICA NO SOLO.**

**Dissertação apresentada à Universidade  
Estadual de Santa Cruz, como parte das  
exigências para obtenção do título de Mestre em  
Produção Vegetal.**

**Área de Concentração: Cultivos em  
Ambiente Tropical Úmido.**

**Orientador: Prof. Dr. Alex-Alan Furtado de  
Almeida.**

**Coorientador: Prof. Dr. José Olímpio de  
Souza Júnior.**

**ILHÉUS – BAHIA – BRASIL**

**FELIPE LOPES NEVES**

**RESPOSTAS FOTOSSINTÉTICAS E NUTRICIONAIS DE GENÓTIPOS DE CACAU  
À INTERAÇÃO ENTRE POTÁSSIO E TOLERÂNCIA A DEFICIÊNCIA HÍDRICA NO  
SOLO.**

**Ilhéus, 06 de fevereiro de 2014**

---

**Dr. Marco Antônio Galeas Aguillar  
(CEPLAC - ESFIP)**

---

**Prof. Dr. Fábio Pinto Gomes  
(DCB-UESC)**

---

**Prof. Dr. Alex-Alan Furtado de Almeida  
(DCB-UESC)  
(Orientador)**

## **DEDICATÓRIA**

**Dedico este trabalho aos meus pais Anisio e Neide e à minha namorada Juliane, por todo o incentivo e amor incondicionais dedicados.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus causa primária de todas as coisas, que fortalece e anima o espírito em toda a nossa jornada de provações por este planeta. Obrigado.

A minha família pelo apoio em todas as etapas de minha vida.

Ao professor e orientador Alex-Alan Furtado de Almeida pelos conselhos, sugestões, incentivo, orientação, paciência, confiança, além dos ensinamentos acadêmicos e de vida aprendidos durante esse período.

Ao professor José Olímpio de Souza Jr. pelos conselhos, sugestões durante todo o período do experimento

Ao professor Fábio Pinto Gomes pela ajuda na interpretação dos dados de potencial hídrico.

Ao professor Arlicélio de Queiroz Paiva por sua orientação na montagem do experimento.

Ao professor Raphael da Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo apoio durante a minha passagem pela universidade.

Aos amigos de quarto do alojamento Posinho da UFV Natanael e Robson pelo companheirismo durante os dias de minha estadia na universidade.

Aos técnicos do laboratório de Fertilidade do solo da Universidade Federal de Viçosa, seu Carlos, Lula, Carlinhos e Jorge pela boa vontade nos ensinamentos, e pelas orientações na realização das análises de solo e material vegetal.

Aos técnicos de laboratório da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Pablo e Gerson pela ajuda nos laboratórios durante a condução do experimento

Ao Marcelo da casa de vegetação pelo apoio nas atividades realizadas durante o experimento.

À Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), pela doação dos frutos utilizados no experimento, representada pelos pesquisadores Dr. José Luis Pires e Dr. Raúl René Valle.

Aos amigos do mestrado Viviane, Daniela, Jordany, Giovana, Nathália, Nelson, Breno, Carol, Suzam e Lorena, pelos momentos passados juntos, as feijoadas, idas à praia, etc. Em especial ao amigo Joedson pela ajuda na montagem do experimento e no “levantamento de peso” dos vasos durante as pesagens.

A Nairane pelos momentos de conversa, de trocas de ideias e amizade.

A Naira pela amizade, pela ajuda na montagem, condução e finalização do experimento, e por ter tolerado os trabalhos “exaustivos” por um copo de energético.

A Juliane pelo amor, carinho, dedicação e por todos os dias, especialmente os finais de semana e feriados, passados no calor da “nossa casa” de vegetação, pesando vasos e regando as plantas.

Ao amigo Jean pela ajuda nas análises em laboratório e casa de vegetação.

Ao amigo Tércio pelo auxílio nas análises estatísticas.

A Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), pelas formações concedidas, todo o conhecimento adquirido e as oportunidades profissionais que surgiram em minha vida.

A FAPESB pela concessão da bolsa de estudo.

## ÍNDICE

LISTA DE ABREVIACÕES.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xx
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. A cacauicultura e os estresses abióticos .....	4
2.2. Respostas fisiológicas ao estresse hídrico.....	5
2.3. Potássio na planta.....	7
2.4. Diferenças genóticas na absorção e utilização de potássio .....	9
2.5. Fluorescência da clorofila .....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	133
3.1. Material vegetal .....	133
3.2. Análise do solo e condições de cultivo .....	144
3.3. Aplicação dos tratamentos .....	199
3.4. Trocas gasosas foliares .....	199
3.5. Teor de umidade no solo.....	Erro! Indicador não definido.20
3.6. Emissão de fluorescência .....	20
3.7. Macro e micronutrientes minerais na planta e no solo.....	21
3.8. Delineamento experimental.....	22
4. RESULTADOS .....	23
4.1. Trocas gasosas foliares de genótipos em resposta ao déficit hídrico no solo e às doses de K e às suas interações.....	233
4.2. Respostas nutricionais de genótipos de cacau ao déficit hídrico no solo e às doses de potássio .....	333

4.2.1. Macro e micronutrientes minerais na folha.....	33
4.2.2. Macro e micronutrientes minerais na raiz.....	399
4.2.3. Macro e micronutrientes minerais no solo.....	44
<b>4.3. Emissão de fluorescência .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.51</b>
<b>5. DISCUSSÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>5.1. Respostas das trocas gasosas foliares de genótipos de cacau ao déficit hídrico no solo e às doses de potássio .....</b>	<b>54</b>
<b>5.2. Macro e micronutrientes minerais na folha .....</b>	<b>58</b>
<b>5.3. Macro e micronutrientes minerais na raiz.....</b>	<b>60</b>
<b>5.4. Macro e micronutrientes minerais no solo .....</b>	<b>62</b>
<b>5.5. Parâmetros da emissão de fluorescência da clorofila a.....</b>	<b>64</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>677</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>

## LISTA DE ABREVIações

Abreviação	Variável/Parâmetro (unidade)
A	Taxa de fotossíntese líquida por unidade de área foliar ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).
gs	Condutância estomática ao vapor de água ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).
E	Taxa de transpiração ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).
A/E	Eficiência instantânea de uso da água ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ ).
A/gs	Eficiência intrínseca de uso da água ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$ ).
$\Psi_{\text{wsolo}}$	Potencial hídrico do solo.
CC	Capacidade de Campo
PS2	Fotossistema 2
DAS	Dias após a semeadura
BS	Biomassa Seca
UR	Umidade Relativa do ar
EROs	Espécies reativas de oxigênio
CEO	Centro de evolução do Oxigênio
$F_v$	Florescência variável.
$F_m$	Florescência máxima.
$F_v/F_m$	Rendimento quântico máximo do fotossistema 2 (PS2)

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Análise química do substrato. Valores de pH em água, KCl e CaCl - Relação 1:2,5; P - Na - K - Fe - Zn -Mn - Cu – Extrator Mehlich 1; Ca -Mg -Al - Extrator: KCl - 1mol L <sup>-1</sup> ; H + Al – Extrator acetato de cálcio 0,5mol L <sup>-1</sup> - pH 7,0; B - Extrator água quente; S - Extrator - fosfato monocálcico em ácido acético; Matéria orgânica (MO) = Carbono orgânico x 1,724 -Walkley-Black; ISNa - Índice de saturação de sódio; SB = Soma de bases trocáveis; CTC (t) - Capacidade de troca catiônica efetiva; CTC (T) - Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V= Índice de saturação de bases; m= Índice de saturação de alumínio; e P-rem= Fósforo remanescente.	Pág. 16
<b>Tabela 2-</b> Análise granulométrica do solo. Classificação Franco-rgiloso	17
<b>Tabela 3-</b> Recomendação de adubação para o plantio de <i>T. cacao</i> .	17
<b>Tabela 4-</b> Recomendação de adubação de cobertura com nitrogênio a partir dos 30 dias após o plantio, seguindo até os 60 dias.	17
<b>Tabela 5-</b> Recomendação de adubação de cobertura a partir dos 75 dias após o plantio.	17
<b>Tabela 6-</b> Recomendação de adubação com as doses de potássio.	18
<b>Tabela 7-</b> Classes de potencial hídrico do solo (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= - 0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) associadas aos respectivos intervalos de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ , - MPa), porcentagem de água no solo a partir da capacidade de campo [CC (%)], teor de água no solo (%).	18
<b>Tabela 8-</b> Probabilidade da variância para trocas gasosas foliares em dois genótipos de <i>T. cacao</i> (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm <sup>-3</sup> , 20 mg dm <sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm <sup>-3</sup> ] entre 170 a 180 dias de cultivo. (*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). (**) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,01). (ns) tratamentos não apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05).	24
<b>Tabela 9-</b> Níveis de significância da ANOVA para teores de macronutrientes minerais na biomassa seca foliar de dois genótipos de <i>T. cacao</i> (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm <sup>-3</sup> , 20 mg dm <sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm <sup>-3</sup> ] aos 180 dias de cultivo. (*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). (**) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,01). (ns) tratamentos não apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05).	34

**Tabela 10-** Níveis de significância da ANOVA para teores de micronutrientes minerais, mais o elemento benéfico sódio, em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,01). (ns) tratamentos não apresentam diferença significativa pelo teste de F (p<0,05). 38

**Tabela 11-** Níveis de significância da ANOVA para teores de macronutrientes minerais na raiz de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,01). (ns) tratamentos não apresentam diferença significativa pelo teste de F (p<0,05). 40

**Tabela 12-** Níveis de significância da ANOVA para teores de micronutrientes minerais na raiz, mais o elemento sódio, em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,01). (ns) tratamentos não apresentam diferença pelo teste F (p<0,05). 43

**Tabela 13-** Níveis de significância da ANOVA para teores de macronutrientes minerais e de Al<sup>3+</sup> no solo e pH do solo cultivado com dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,01). (ns) tratamentos não apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). 45

**Tabela 14-** Níveis de significância da ANOVA para teores de micronutrientes minerais no solo, mais o elemento sódio, cultivado com dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste de F (p<0,01). (ns) tratamentos não apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). 50

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1-** Genótipos de *T. cacao* utilizados no experimento. PA – 13 (A) CC-40 (B). 14
- Figura 2-** Curva de retenção de água no solo. 15
- Figura 3-** Lona plástica cobrindo os vasos, visando minimizar o efeito da evaporação do solo. 18
- Figura 4-** Curvas de umidade do solo (%) em função do potencial hídrico do solo [ $\Psi_{wsolo}$  (- MPa)] cultivado com dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos ao déficit hídrico no solo e a três doses de potássio no solo [ $10 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  (controle) e  $40 \text{ mg dm}^{-3}$ ], utilizando todas as repetições ao final do experimento. 25
- Figura 5-** Taxa fotossintética líquida por unidade de área foliar [ $A$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )] e condutância estomática ao vapor de água [ $g_s$  ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )] em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [ $10 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  (controle) e  $40 \text{ mg dm}^{-3}$ ] entre 170 a 180 dias de cultivo. Os símbolos representam as classes. Valores médios de 10 e 14 repetições. 26
- Figura 6-** Condutância estomática ao vapor de água [ $g_s$  ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )] (A e B, respectivamente) e taxa fotossintética líquida por unidade de área foliar [ $A$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )] (C e D, respectivamente) em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= -0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [ $10 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  (controle) e  $40 \text{ mg dm}^{-3}$ ] entre 170 a 180 dias de cultivo. Os símbolos representam as classes. Valores médios de 10 e 14 repetições. 28
- Figura 7-** Condutância estomática ao vapor de água [ $g_s$  ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )] e taxa de transpiração foliar [ $E$  ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )] em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [ $10 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  (controle) e  $40 \text{ mg dm}^{-3}$ ] entre 170 a 180 dias de cultivo. Os símbolos representam as classes. Valores médios de 10 e 14 repetições. 29
- Figura 8-** Interações entre genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13), doses de potássio no solo [ $10 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  (controle) e  $40 \text{ mg dm}^{-3}$ ] e classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) para a variável fotossíntese líquida por unidade de área foliar [ $A$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )] avaliada entre 170 a 180 dias de cultivo. (A). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam os genótipos dentro de cada dose e classe pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Médias seguidas por letras minúsculas comparam as doses dentro de cada 30

genótipo e classe pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Médias seguidas por letras em vermelho comparam as classes dentro de cada genótipo e dose pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

**Figura 9-** Condutância estomática ao vapor de água [ $(gs\ mol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1})$ ], avaliada entre 170 a 180 dias de cultivo, em função de doses de potássio no solo [10  $mg\ dm^{-3}$ , 20  $mg\ dm^{-3}$  (controle) e 40  $mg\ dm^{-3}$ ] (A). Condutância estomática ao vapor de água [ $(gs\ mol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1})$ ] em função de genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) e de classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) (B). Letras maiúsculas comparam as médias das doses de potássio pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ) (A). Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos dentro de cada classe pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ) (B). Letras minúsculas comparam as médias de um mesmo genótipo entre as classes pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ) (B). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 31

**Figura 10-** Eficiências intrínsecas ( $A/g_s$ ) (A) e instantâneas ( $A/E = WUE$ ) do uso da água (B) em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10  $mg\ dm^{-3}$ , 20  $mg\ dm^{-3}$  (controle) e 40  $mg\ dm^{-3}$ ] entre 170 a 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos dentro de cada dose (A) e os genótipos (B) pelo teste de Skott-Knott ( $p < 0,05$ ). Letras em minúsculo comparam as médias de um mesmo genótipo entre as diferentes doses (A) pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 32

**Figura 11 -** Transpiração em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias entre as classes pelo teste de Skott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições 33

**Figura 12-** Teores de nitrogênio (N) (A), potássio (K) (B), cálcio (Ca) (C) e magnésio (Mg) em folhas de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10  $mg\ dm^{-3}$ , 20  $mg\ dm^{-3}$  (controle) e 40  $mg\ dm^{-3}$ ] (D) aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 35

**Figura 13-** Teores de cálcio Ca (A) e magnésio (Mg) foliar (B) em função das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos teores de Ca entre as classes pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão 36

da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

**Figura 14-** Teor de potássio (K) foliar em função de doses de K no solo em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos teores de K foliar entre as doses de K aplicadas no solo [10 mg dm<sup>-3</sup> 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>], pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

37

**Figura 15-** Teor de manganês (Mn) em folhas de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

39

**Figura 16-** Teor de potássio (K) em raiz de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo (**A**). Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Teor de K na raiz (**B**), em função de doses de K aplicadas no solo [10 mg dm<sup>-3</sup> 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) 40 mg dm<sup>-3</sup>]. Letras maiúsculas comparam as médias dos teores de K na raiz entre as doses de K aplicadas no solo, pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

41

**Figura 17-** Teor de cálcio (Ca) em raiz de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

42

**Figura 18-** Teores de manganês (Mn) (**A**), zinco (Zn) (**B**) e Fe (**C**) em raiz de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

44

**Figura 19-** Valores de pH do solo em função das doses de potássio (K) [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aplicadas no solo. Letras maiúsculas

45

comparam as médias das doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

**Figura 20-** Teor de potássio (K) no solo cultivado com dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 46

**Figura 21-** Teor de potássio (K) no solo em função de doses de K aplicadas no solo [10 mg dm<sup>-3</sup> 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias das doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 47

**Figura 22-** Teor de potássio (K) no solo em função das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias das doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 48

**Figura 23-** Teor de cálcio (Ca) no solo em função de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias das doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 48

**Figura 24-** Teor de potássio (K) no solo em função das doses de K aplicadas no solo [10 mg dm<sup>-3</sup> 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias das doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 49

**Figura 25-** Teores de ferro (Fe) no solo (**A**) em função de doses de potássio (K) aplicadas no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Teor de zinco (Zn) no solo (**B**) cultivado com dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos teores de Zn entre os genótipos, pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 51

**Figura 26-** Fluorescência variável ( $F_v$ ) em nível foliar de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam os genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 52

**Figura 27-** Fluorescência máxima ( $F_m$ ) em nível foliar de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam os genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 52

**Figura 28-** Rendimento quântico potencial máximo do fotossistema 2 (PS2) ( $F_v/F_m$ ) em nível foliar de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos em cada dose. Letras minúsculas comparam as médias de um mesmo genótipo nas diferentes doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições. 53

## RESUMO

NEVES, Felipe Lopes, M.S., Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA, Fevereiro de 2014. **Efeitos da adubação potássica nas respostas fotossintéticas e nutricionais de genótipos de cacau à deficiência hídrica no solo.** Orientador: Alex- Alan Furtado de Almeida. Co-orientador: José Olímpio de Souza Júnior.

*Theobroma cacao* L. é uma espécie perene de grande importância econômica mundial, cultivada quase que exclusivamente para fabricação de chocolate. Embora o cacau seja tipicamente cultivado em áreas de alta precipitação anual, algumas regiões de cultivo possuem, em determinadas áreas, solos rasos, com baixa capacidade de armazenamento de água; e outras estão propensas a precipitações pluviais irregulares, que podem se intensificar com o aquecimento global, uma das causas principais das variações de produtividade do cacauzeiro, considerada uma espécie sensível à deficiência hídrica no solo. O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar os efeitos da adubação potássica nas respostas fotossintéticas e nutricionais de genótipos *T. cacao* à deficiência hídrica no solo. Avaliaram-se os genótipos PA-13 tolerante a seca e CC-40 intolerante à seca; obtidos a partir de sementes, cujos frutos foram provenientes de flores autopolinizadas. Fez-se a semeadura em vasos plásticos de 12 L contendo areia e solo como substratos, onde as plantas permaneceram por 180 dias após a semeadura. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com os tratamentos arranjos no esquema fatorial 2x3x4, correspondentes a dois genótipos de *T. cacao* (PA-13 e CC-40), três doses de potássio [10, 20 (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] solo e quatro classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{W_{solo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; e IV= -0,25 a -0,51 MPa), com cinco repetições e uma planta por unidade experimental. Avaliaram-se as trocas gasosas e a emissão de fluorescência da clorofila em nível foliar, aos 180 dias de cultivo, e os teores de macro e micronutrientes minerais no solo e nas folhas e raízes das plantas de ambos os genótipos de *T. cacao*, submetidos aos diversos tratamentos. Observou-se que o genótipo PA-13 apresentou os maiores valores de fotossíntese líquida por unidade de área foliar (*A*), em comparação ao genótipo CC-40, nas classes III e IV de  $\Psi_{W_{solo}}$ , associado com as doses de 20 e 40 mg dm<sup>-3</sup> de K no solo. Verificou-se diferenças intergenotípicas significativas ( $p < 0,05$ ) para as eficiências intrínseca e instantânea do uso de água, cujo menor valor foi apresentado pelo genótipo PA-13, na menor dose de K aplicada ao solo. As doses de 20 e 40 mg dm<sup>-3</sup> de K no solo contribuíram para diminuição da condutância estomática ao vapor de água (*gs*) em ambos os genótipos de cacau avaliados. As classes de  $\Psi_{W_{solo}}$  não influenciaram significativamente ( $p < 0,05$ ) a redução de *gs* para o genótipo PA-13. Em contrapartida, para o genótipo CC-40, houve redução de *gs* da classe I para a classe II. Com a diminuição do  $\Psi_{W_{solo}}$  houve redução da *E* independente dos genótipos das doses de K aplicadas. Observou-se diferença

intergenotípica significativa ( $p < 0,05$ ) para os teores dos macronutrientes N, Ca e Mg em nível foliar, sendo os maiores valores encontrados para o genótipo PA-13. Entretanto, para genótipo CC-40 o K foi o macronutriente que se apresentou com o maior teor em nível foliar. Dos micronutrientes avaliados em nível foliar, apenas o Mn apresentou diferença intragenotípica significativa ( $p < 0,05$ ), cujo maior teor foi encontrado para o genótipo PA-13. Para os teores de macronutrientes no tecido radicular, as diferenças intergenotípicas significativas ( $p < 0,05$ ) foram observadas apenas para K e Ca, cujos maiores valores foram apresentados pelo genótipo PA-13. Houve variação intergenotípica para os teores de Mn e Zn em nível radicular, sendo o genótipo PA-13 foi o que apresentou os maiores teores desses micronutrientes. O genótipo PA-13 apresentou uma maior fluorescência variável. Em contrapartida, CC-40 apresentou uma maior fluorescência máxima independente das classes de  $\Psi_{W_{solo}}$  e das doses de K aplicadas. Entretanto, o rendimento quântico do fotossistema 2 foi maior para o genótipo PA-13 na maior dose de potássio aplicada no solo. O incremento das doses de K no solo proporcionou um aumento dos teores de K tanto nas folhas como nas raízes das plantas de ambos os genótipos de cacau avaliados, e elevação do pH do solo nas doses de 20 e 40 ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) solo. Em suma, a maior tolerância do genótipo PA-13 à deficiência hídrica no solo, em relação ao genótipo CC-40, se deve em parte ao maior acúmulo de nutrientes minerais nos tecidos foliares e radiculares, sugerindo o seu potencial para utilização em programas de melhoramento.

## ABSTRACT

NEVES , Felipe Lopes , MS , State University of Santa Cruz , Ilhéus , BA , February 2014. **Effects of manure potassica photosynthetic the answers and nutrition of cacao genotypes to water stress on the ground.** Advisor: Alex- Alan Furtado de Almeida. Co-advisor: José Olympio de Souza Junior .

*Theobroma cacao* L. is a perennial species of great economic importance worldwide, grown almost exclusively for the manufacture of chocolate. Although cocoa is typically grown in areas of high annual rainfall, some growing regions have, in certain areas, shallow soils with low water storage capacity, and others are prone to irregular rainfall, which can intensify with warming overall, one of the main causes of productivity changes of cacao, considered a species sensitive to water deficiency in the soil. This study aimed to evaluate the effects of potassium fertilization on photosynthetic and nutritional responses of genotypes *T. cacao* to water deficit in the soil. Evaluated the PA -13 (drought tolerant) and CC- 40 genotypes (intolerant to drought), with genetic traits for drought resistance differentials; obtained from seeds, fruits harvested from self-pollinated flowers. There was sowing in plastic pots of 12 L containing substrates such as sand and soil, where the plants remained for 180 days after sowing. The experimental design was a completely randomized design with treatments arranged in a factorial 2x3x4 , corresponding to two genotypes of *T. cacao* (PA -13 and CC- 40), three doses of potassium [10 , 20 (control ) and 40 (mg dm<sup>-3</sup>) soil and four classes of soil water potential ( $\Psi_{W_{soil}}$ ) (I = - 0.01 to -0.03 MPa, II = -0.04 to -0.07 MPa, III = -0.11 to -0.19 MPa, and IV = -0.25 to -0.51 MPa), with five replicates and one plant per experimental unit. We evaluated gas exchange and chlorophyll fluorescence emission at leaf level, between 170 and 180 days of cultivation, and the levels of macro and micronutrient contents of soil and leaves and roots of plants of both genotypes of *T. cacao*, subjected to various treatments after 180 days of cultivation. It was observed that the genotype PA-13 had the highest values of net photosynthesis per unit leaf area (*A*) compared to CC- 40 genotype classes III and IV  $\Psi_{W_{soil}}$  associated with doses of 20 and 40 mg dm<sup>-3</sup> of K in the soil . There was intergenotypes significant differences ( $p < 0.05$ ) for the intrinsic and instantaneous water use efficiencies, lower value which was presented by genotype PA -13, the lower dose of K applied to the soil . Doses of 20 and 40 mg dm<sup>-3</sup> of K in the soil contributed to decreased stomatal conductance to water vapor ( gas ) in both genotypes of cocoa evaluated. Classes  $\Psi_{W_{soil}}$  not significantly ( $p < 0.05$ ) influence the reduction gas for the genotype PA-13. In contrast, for the CC-40 genotype, decreased *g<sub>s</sub>* of class I to class II. With the decrease of classes was reduced  $\Psi_{W_{soil}}$  and regardless of genotype of K doses applied. A significant intergenotypic difference ( $p < 0.05$ ) for the contents of macronutrients N, Ca and Mg in the leaf level, with the highest values found for the PA -13 genotype. However, for CC-40 genotype was the K macronutrient that presented with the highest content in the leaf level. Micronutrients evaluated in leaf level, only Mn showed significant intragenotípica difference ( $p < 0.05$ ), with higher levels found in genotype PA-13. For the macronutrient content in root tissue, intergenotípicas significant differences ( $p < 0.05$ ) were observed only for K and Ca, higher values were presented by genotype PA -13. There was intergenotypic variation for Mn and Zn in root level, and the PA-13

genotype presented the highest levels of these micronutrients. The PA-13 genotype showed a higher variable fluorescence. In contrast, CC- 40 had a higher maximum fluorescence regardless of their classes  $\Psi_{W_{soil}}$  and K rates applied . However, the quantum efficiency of photosystem 2 was higher for the PA-13 genotype at the highest dose applied of potassium in the soil. The increasing levels of K in the soil resulted in an increase of K concentration on leaves as in roots of both cacao genotypes evaluated, and increased soil pH at doses of 20 and 40 ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) soil. In short, the greater tolerance of the PA-13 genotype to water deficit in the soil, in relation to genotype CC-40, is due in part to the greater accumulation of mineral nutrients in leaf and root tissues, confirming their potential for use in programs improvement.

## 1. INTRODUÇÃO

Os episódios de seca no mundo vêm sendo agravados pelo aumento da radiação solar e temperatura do ar, em virtude das mudanças climáticas globais, promovidas pelo aumento do efeito estufa. Muitos cultivos de plantas em todo o mundo já sofrem com a falta de água (MORISON et al., 2008). A água deverá ser considerada, até o final da próxima década, como recurso estratégico e insumo mais importante para o desenvolvimento econômico, principalmente dos países essencialmente agrícolas como o Brasil (FRITSCHE-NETO, 2011; BORÉM, 2005). Segundo o quarto relatório de avaliação do Grupo de Trabalho 1 (GT1) do “Painel Intergovernamental sobre Mudanças no Clima” (IPCC, 2007), está ocorrendo uma elevação da temperatura média global nos últimos anos e que ao longo deste século na América do Sul, particularmente, o Brasil, registrará aumentos de temperatura mais intensos na parte norte e nordeste e um pouco brandos no Sul. A seleção de genótipos de *Theobroma cacao* tolerantes a episódios de seca poderá fazer com que haja uma maior abrangência das áreas de cultivo em locais onde antes não seria possível o plantio da espécie com o objetivo de obter grandes produtividades. Contudo, poucos estudos têm avaliado a função dos nutrientes minerais nos mecanismos fisiológicos relacionados com a tolerância à seca (PASSOS, 1981).

Diversos aspectos fisiológicos e nutricionais das plantas podem ser explorados, buscando compreender como as plantas se comportam em respostas a determinados tipos de estresse. Do ponto de vista fisiológico, as variáveis de

trocas gasosas foliares, como fotossíntese líquida por unidade de área foliar ( $A$ ), condutância estomática ao vapor de água ( $g_s$ ) e transpiração ( $E$ ), são fundamentais para compreender as possíveis alterações na assimilação do carbono e na eficiência do uso da água em condições de deficiência hídrica no solo, uma vez que há necessidade de selecionar genótipos de *T. cacao* que economizem água, em condições de baixos valores de potencial hídrico no solo, sem comprometer significativamente a produção de biomassa. A redução da água disponível no solo pode levar a diversos efeitos negativos sobre a fisiologia de *T. cacao*, afetando em última análise os processos de fotossíntese e de respiração, conduzindo a um balanço negativo de carbono, o que pode levar à redução da produção comercial da cultura.

Apesar de a existência de muitos trabalhos avaliando as respostas à seca em diferentes espécies vegetais, poucos comparam genótipos ou variedades contrastantes (XIAO et al., 2009b; CELLIER et al., 1998) e, menos ainda, determinando o nível crítico de déficit hídrico para as espécies objeto de estudo (LEI et al., 2006; XIAO, 2009a). A deficiência hídrica ocorre quando a taxa de transpiração foliar excede a taxa de absorção de água pelo sistema radicular, e esta deficiência pode ser consequência da baixa disponibilidade de água no solo, bem como da presença de solos salinos e da ocorrência de temperaturas muito baixas (BRAY, 1997).

O aspecto nutricional é importante na manutenção das funções metabólicas em condições ideais. Tem-se observado, para vários cultivos, que plantas bem nutridas com potássio (K) mostraram-se mais tolerantes aos efeitos adversos do estresse hídrico (BOSSHART; UEXKULL, 1987). O potássio, um dos elementos essenciais às plantas, é absorvido em maior quantidade que qualquer outro mineral, exceto nitrogênio (N) (TISDALE; NELSON, 1975). Orchard (1978) demonstrou, em plantas jovens de *T. cacao*, que alta dose de K ( $5 \text{ mmol L}^{-1}$ ) promove aumento na área foliar sem afetar a produção de biomassa da planta inteira. Este mesmo autor verificou ainda que existe uma relação inversa entre taxa transpiratória ( $E$ ) e dose de K. O acúmulo de potássio e fósforo nos tecidos foliares auxilia no ajuste osmótico e na manutenção da turgescência foliar em valores de potencial hídrico foliar menores do que  $-1,5 \text{ MPa}$  (ALMEIDA, et al., 2002b)

Poucos trabalhos têm avaliado a função dos nutrientes minerais nos mecanismos fisiológicos que compõem a resistência ao déficit hídrico (PASSOS, 1981). O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar os efeitos da adubação potássica nas respostas fotossintéticas e nutricionais de genótipos *T. cacao* submetidos à deficiência hídrica no solo e avaliar os efeitos da adubação potássica e do déficit hídrico no solo sobre o crescimento, as trocas gasosas foliares e o teor de macro e de micronutrientes minerais na raiz e folha em dois genótipos de cacau contrastantes para tolerância à seca.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. O cacau e os estresses abióticos

O cacau (*Theobroma cacao* L.) tem como local de origem geográfica a América do Sul, onde várias populações silvestres são encontrados da Amazônia à região Guianense (ALMEIDA; VALLE, 2007c; 2009d). Considerado um dos cultivos perenes mais importantes do mundo, com uma produção mundial estimada de 3,94 milhões de toneladas em 2012/13 (ICCO, 2013) é cultivado predominantemente nos trópicos da América Central e Sul, Ásia e África (MARITA et al., 2001) e comercialmente explorado para a produção de amêndoas destinadas principalmente à fabricação de chocolate. O Brasil é o sexto maior país em produção mundial de cacau, com uma produção estimada no ano de 2013 de 248.500 toneladas em uma área 680.484 hectares, sendo os países Costa do Marfim, Indonésia, Gana, Nigéria e Camarões os principais produtores mundiais (AGRIANUAL, 2013).

No sul da Bahia, principal região produtora de cacau do Brasil, o cultivo de *T. cacao* é realizado predominantemente em condições de 'Cabruca', sistema onde se cultiva o cacau sob espécies lenhosas de grande porte da Mata Atlântica raleada, utilizadas como sombreamento. Além disso, o cacau é cultivado, em menor escala, com *Erythrina fusca* ou *E. glauca* como árvores de sombra ou com espécies arbóreas ou frutíferas de valor econômico (ALMEIDA; VALLE, 2007c; 2009d), algumas vezes associado com cultivos alimentares, como

*Musa* sp. ou *Manihot esculenta* (Mandioca). Recentemente, introduziu-se o cultivo de *T. cacao* a pleno sol numa região semiárida do estado da Bahia, município de Mucugê, região da Chapada Diamantina, com sistema de fertirrigação por gotejamento, e com alta produtividade, visto que se trata de uma espécie de sol, tolerante ao sombreamento (ALMEIDA; VALLE, 2007c; 2009d).

As oscilações climáticas, principalmente as relacionadas à quantidade e à distribuição das chuvas, têm sido uma das causas principais das variações de produtividade de *T. cacao* (ALVIM, 1977b; BALASIMHA, 1988a). Logo, esta espécie é considerada muito sensível à deficiência hídrica no solo. Além de afetar a produtividade, a escassez de chuva contribui para a morte de plantas, principalmente quando a lavoura encontra-se em solos com características físicas associadas à baixa capacidade de armazenamento de água disponível (SOUZA JR.; MENEZES, 2000).

## **2.2. Respostas fisiológicas ao estresse hídrico**

Para melhorar o desempenho das árvores de *T. cacao* em regiões com períodos de seca prolongados é necessária a identificação e a seleção de caracteres que contribuem com a tolerância à seca ou com a eficiência do uso de água. As plantas apresentam vários mecanismos de sobrevivência sob condições de seca, os quais podem ser explorados para identificar genótipos tolerantes que mantêm uma boa produção de frutos em condições de baixa disponibilidade de água no solo, como (i) eficiência de extração de água no solo, (ii) ajustamentos osmótico e elástico, (iii) controle da abertura e fechamento dos estômatos, (iv) curvatura foliar, (v) ajustamento de área foliar, (vi) cutícula foliar espessa, (vii) dissipação de energia em nível foliar, (viii) mudanças na composição de pigmentos cloroplastídicos e vacuolares (ix) alteração na razão raiz-parte aérea, (x) alteração na expressão gênica, incluindo eficiência das aquaporinas, etc (KOZLOWSKI, 1997a, 2002b).

Mesmo sendo respostas necessárias para a aclimação da planta ao estresse hídrico, o fechamento estomático e a redução de área foliar são mecanismos que podem reduzir o crescimento e limitar a produtividade, pois

provocam, respectivamente, redução na assimilação de CO<sub>2</sub> e na interceptação de luz (LUDLOW ; MUCHOW, 1990; MATTOS et al., 1999).

O déficit hídrico é um dos fatores ambientais mais importantes que podem regular o crescimento e desenvolvimento, limitando a produção (JONES; CORLETT, 1992). De acordo com Miller et al. (2010), a deficiência hídrica, especialmente sob alta intensidade de luz ou em combinação com outros tipos de estresse, afeta a fotossíntese e aumenta a fotorrespiração, alterando a homeostase celular e causando um aumento na produção das espécies reativas de oxigênio (ERO). Além disso, seca associada a altas temperaturas causam danos significativos na integridade das membranas celulares e promove a peroxidação lipídica, que em combinação aumenta as perturbações fisiológicas das plantas, a exemplo da assimilação fotossintética de CO<sub>2</sub> e atividade fotoquímica (SILVA et al., 2010a).

As respostas ao estresse hídrico variam de forma intra e interespecífica. Por exemplo, as espécies *Quercus ilex* (Azinheiras) e *Q. suber* (Sobreiro) apresentam graus diferentes de tolerância ao estresse hídrico (VAZ et al., 2010). Ao avaliarem duas espécies de *Populus cathayana* Rehder, uma originária de região seca e outra de região úmida (XIAO et al., 2009b), observaram reduções na fotossíntese líquida (*A*), condutância estomática ao vapor de água (*gs*) e concentração interna de CO<sub>2</sub> (*C<sub>i</sub>*) em nível foliar. No entanto, a população de clima seco manteve os valores de trocas gasosas foliares significativamente mais elevados se comparados à população de clima úmido. Isso indica variabilidade natural da mesma espécie, sendo que a população de clima seco possui mais tolerância e aclimatação a seca.

Deficiência hídrica afeta também a turgidez celular e a abertura e fechamento de estômatos na folha, resultando em diminuição das taxas de transpiração e assimilação de CO<sub>2</sub> e inibição do metabolismo celular (SOUZA et al., 2004; SANTOS et al., 2006; WASEEM et al., 2011). Sob reduzida taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>, é afetado o equilíbrio entre a atividade fotoquímica do fotossistema 2 (PS2) e o requerimento de elétrons para a fotossíntese, gerando uma superexcitação no sistema fotossintético e danos fotoinibitórios nos centros de reação do PS2 (SOUZA et al., 2004; SANTOS et al., 2006). À medida que a deficiência hídrica aumenta, a redução da fotossíntese deixa de ser atribuída

apenas à redução da abertura estomática e restrição difusiva de CO<sub>2</sub>, e passa a ser relacionada também aos mecanismos das etapas fotoquímica e bioquímica (IRVING e ROBINSON, 2006; KANECHI et al., 1996).

Estudos conduzidos *in vivo* tem mostrado que o estresse hídrico causa dano considerável aos centros de evolução do oxigênio (CEO) (SKOTNICA et al., 2000; KAWAKAMI et al., 2009) assim como a degradação do polipeptídeo D1 o que acaba inativando os centro de reação do fotossistema 2 (LIU et al., 2006; ZLATEV, 2009)

A abertura estomática em folhas de *T. cacao* está relacionada também com umidade relativa do ar (UR), pois os seus estômatos permanecem mais abertos em alta do que em baixa UR (SENA GOMES et al., 1987). Por outro lado, o fechamento estomático não controla eficientemente a perda de água, provavelmente devido a uma alta transpiração cuticular (RAJA HARUN; HARDWICK, 1988). Segundo estes autores, folhas de *T. cacao* não apresentam altos valores de *gs* sob estresse hídrico e baixa UR. Entretanto, genótipos de *T. cacao*, com um mecanismo eficiente de regulação estomática, mostram decréscimo em perda de água por meio da transpiração sob déficit hídrico, considerado uma estratégia de adaptação importante da espécie à seca (BALASIMHA, 1988a).

### **2.3. Potássio na planta**

O potássio (K) é um cátion univalente com raio iônico hidratado de 0,331 nm e é um macroelemento essencial na nutrição mineral das plantas. Este elemento metálico é necessário para várias reações metabólicas por causa de sua capacidade de ativar uma grande variedade de enzimas. A síntese de proteínas ribossomais é outro processo chave que requer elevadas concentrações de K. O acúmulo de açúcares redutores e o esgotamento de ácidos orgânicos e aminoácidos carregados negativamente são descritos como consequências diretas da deficiência de K (MAATHUIS, 2009). É evidente o papel dominante de K na manutenção da homeostase celular e nos processos de transporte de solutos via xilema e floema. Um exemplo inclui a abertura e fechamento de estômatos através da absorção e liberação de K o que afeta

bastante o equilíbrio hídrico da planta. O íon K encontra-se predominantemente como cátion livre ou como cátion adsorvido e pode facilmente ser deslocado das células ou dos tecidos vegetais (LINDHAUER, 1985). Esta alta mobilidade nas plantas explica as principais funções e características de K como o principal cátion que atua na neutralização de cargas e como o mais importante e ativo componente inorgânico osmótico (CLARKSON; HANSON, 1980).

O próprio funcionamento dos estômatos depende de um suprimento adequado de K, o qual se move para dentro das células-guarda. Estas acumulam água e intumescem, causando abertura dos estômatos, permitindo o movimento livre dos gases para dentro e para fora da célula. Quando o suprimento de água é baixo, K é bombeado para fora das células-guarda e os poros se fecham firmemente para evitar perda de água. Se o suprimento de potássio é inadequado, os estômatos ficam lentos, demoram a responder e o vapor d'água é perdido (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Para manter o pH elevado no estroma sob iluminação, ocorre a entrada adicional de  $K^+$  no citosol mediado pelo fluxo contrário de  $H^+$  através do envelope dos cloroplastos (WU et al., 1991). Este fluxo é prejudicado sob estresse hídrico. Durante a desidratação de cloroplastos isolados perde-se grande quantidade de K e diminui a fotossíntese. Entretanto, este decréscimo pode ser superado por altas concentrações de K extracloroplastídicas (PÍER; BERKOWITZ, 1987). A importância de repor K nas folhas de plantas expostas a estresse hídrico ou salinidade está ligada a necessidade de manter altas concentrações de  $K^+$  no estroma (SEM GUPTA et al., 1989).

Nas células da raiz, o K diminui o potencial hídrico e possibilita a entrada de água. As células parenquimáticas do xilema exsudam K dentro dos vasos xilemáticos, fazendo com que o potencial hídrico diminua e que, conseqüentemente, a entrada da água seja possível o que acaba criando a pressão raídicular (ABDUL, et al., 2011). Em relação à seiva de plantas de *T. cacao*, o teor de K corresponde a aproximadamente, 70% do total dos nutrientes, variando pouco no decorrer do ano (MARTINS, 1976). Segundo Alvim e Grangier Jr., (1966), o K é o nutriente mineral que apresenta, normalmente, maiores concentrações e acúmulos nos tecidos de *T. cacao*.

Há genótipos eficientes na absorção e utilização do K do solo. Essas eficiências de absorção e utilização estão interligadas (ZHANG et al., 2007). Diferenças entre clones de *T. cacao* com relação à absorção de K são um fato comprovado (ASONAMING, 1972). Há associação entre o acúmulo de K e P em nível foliar e o ajustamento osmótico em plantas de *T. cacao* submetidas à deficiência hídrica no solo (ALMEIDA et al., 2002b). Segundo estes mesmos autores, foram encontradas diferenças intergenotípicas no ajustamento osmótico para SPA-5, SIAL-70 e TSH-516, quando impostos rapidamente ao estresse hídrico. Por outro lado, em plantas túrgidas de *Coffea arabica* houve um aumento na concentração de amido acompanhado de acúmulo de K nas folhas (MALAVOLTA et al., 1974).

#### **2.4. Diferenças genotípicas na absorção e utilização do K**

Variações consideráveis na eficiência de absorção e utilização de K entre genótipos existentes de uma grande variedade de espécies vegetais já foram identificadas. Dentre as espécies se destacam *Phaseolus vulgaris* (Feijão) (SHEA et al., 1968), *Glycine max* (Soja) (SALE; CAMPBELL, 1987), *Solanum lycopersicum* (Tomate) (CHEN; GABELMAN, 1995a; FIGDORE et al., 1989), *Zea mays* (Milho) (FARINA et al., 1983), *Triticum aestivum* (Trigo) (DAMON; RENGEL, 2007; WOODEND et al., 1987), *Hordeum vulgare* (Cevada) (PETTERSSON; JENSÉN, 1983) e *Oryza sativum* (Arroz) (YANG et al., 2004). Dessa forma, é razoável supor que a variação genotípica na utilização e eficiência do K existe dentro de todas as principais espécies cultivadas. Apesar de os numerosos estudos que têm identificado diferenças inter e intraespecíficas na eficiência do uso de K, poucos fizeram avaliações detalhadas das diferenças observadas e, ou abordaram a seleção de reprodução, herança ou marcadores moleculares associados aos mecanismos de eficiência de utilização de K (RANGE; DAMON, 2008).

A eficiência de absorção de K é regida por mecanismos que dependem da arquitetura da raiz, da alta capacidade de absorção na superfície dessa raiz, bem como da capacidade de disponibilizar K não trocável por meio dos exsudados radiculares (RANGEL e DAMON, 2008). Segundo estes autores, a eficiência de

utilização é baseada em uma eficaz translocação de K entre os organelos, as células e os órgãos, além da capacidade de utilizar outros íons como substitutos do K.

Para *Solanum lycopersicum* (Tomate), Chen e Gabelman (2000b) confirmaram a eficiência da proliferação do comprimento radicular na absorção de K, devido a alta absorção líquida de K, juntamente com o baixo pH da rizosfera. No entanto, essa alta absorção de K foi atribuída à mobilização deste elemento na rizosfera pelos exsudatos radiculares, criando alta concentração de K na solução do solo e no apoplasto das células radiculares, em vez de uma elevada capacidade de absorção pela superfície das raízes.

Diferenças genótípicas na capacidade de utilização de K podem ser atribuídas às diferenças no (i) particionamento e redistribuição de K em nível celular ou na planta toda; (ii) substituição de K por outros íons; (iii) e, ou particionamento dos recursos para uma produção mais econômica (GERLOFF, 1987; SATTELMACHER et al., 1994). A concentração de K no citosol e no vacúolo varia com o tipo de célula, bem como a idade da planta (FRIECHE et al., 1994). De acordo com estes autores, as diferenças nos requisitos de K nos tecidos são geralmente atribuídas às diferenças de requerimento nos vacúolos e no apoplasto; e a utilização eficiente de K, durante a fase vegetativa, pode se traduzir em uma produção mais econômica.

A diferença genotípica no índice de colheita influencia a eficiência com que o K pode ser utilizado para a produção de grãos, mais até do que a capacidade para produzir biomassa, por exemplo, em *T. aestivum* (Trigo). (WOODEND; GLASS 1993). Potássio é altamente móvel nas plantas e diferenças intergenótípicas, com relação à eficiência de utilização de K, têm sido atribuídas às diferenças na capacidade de translocação em nível celular e na planta toda. A capacidade de translocar K entre os organelos celulares pode também ser um importante e eficiente mecanismo de utilização de K (DUNLOP; TOMKINS 1976).

## **2.5. Fluorescência da clorofila**

A clorofila *a* é um pigmento verde azulado, encontrado em plantas e cianobactérias, que participa diretamente da fotossíntese. A emissão de

fluorescência da clorofila *a* é um fenômeno quântico do próprio aparato fotossintético (GOVINDJEE, 2004). A emissão de fluorescência da clorofila *a* é uma medida da eficiência fotossintética e fornece informações importantes sobre a relação estrutural e funcional dos centros de reação do fotossistema 2 (PS 2). Sua medição é utilizada para avaliação de estresse em plantas ou danos causados ao aparato fotossintético, tornando uma ferramenta importante para estudos de monitoramento. Desta forma, é muito utilizada em pesquisas agrônomicas, florestais, marinhas, ecotoxicológicas, dentre outras (GONÇALVES et al., 2010).

Mudanças na cinética de emissão da fluorescência da clorofila fornecem informações detalhadas sobre a estrutura e função do aparelho fotossintético especialmente sobre PS 2 (STRASSER, et al., 1995). A análise da fluorescência é largamente utilizada para avaliação da capacidade fotossintética alterada por estresses bióticos ou abióticos (CLIJSTERS; VAN ASSCHE, 1985; ALLAKHVERDIEV; MURATA, 2004). Diferenças inter e intragenotípicas foram observadas durante a ontogenia foliar em dois genótipos de *T. cacao* (Catongo e SCA-6 x 'Catongo') infectados com *Moniliophthora perniciosa*, agente causal da vassoura-de-bruxa (ALMEIDA et al., 2001a).

Uma das vantagens do uso deste método é o fato de a medição não ser destrutiva, sendo possível realizar tanto em condições de laboratório quanto em campo. Tornou-se uma técnica efetiva para quantificar o efeito do estresse ambiental sobre as funções de captura e utilização da irradiância pelas plantas (ADAMS et al., 1999; RICHARDSON e BERLYN, 2002).

Vários estudos têm avaliado a relação da fluorescência da clorofila com a fotossíntese e o estado fisiológico das plantas (LICHTENTHALER, 1992; FRANKART et al, 2003; YUSUF et al, 2010). Vários autores (BAKER, 1991a; KRAUSE, 1991b; WEIS, 1991; KRAUSE; WINTER, 1996) relatam que a razão entre as fluorescências expressa a eficiência de captura da energia de excitação pelos centros de reação abertos de PS2. Quando há excesso de energia, essa pode ser dissipada na forma de fluorescência (KRAUSE, 1986a).

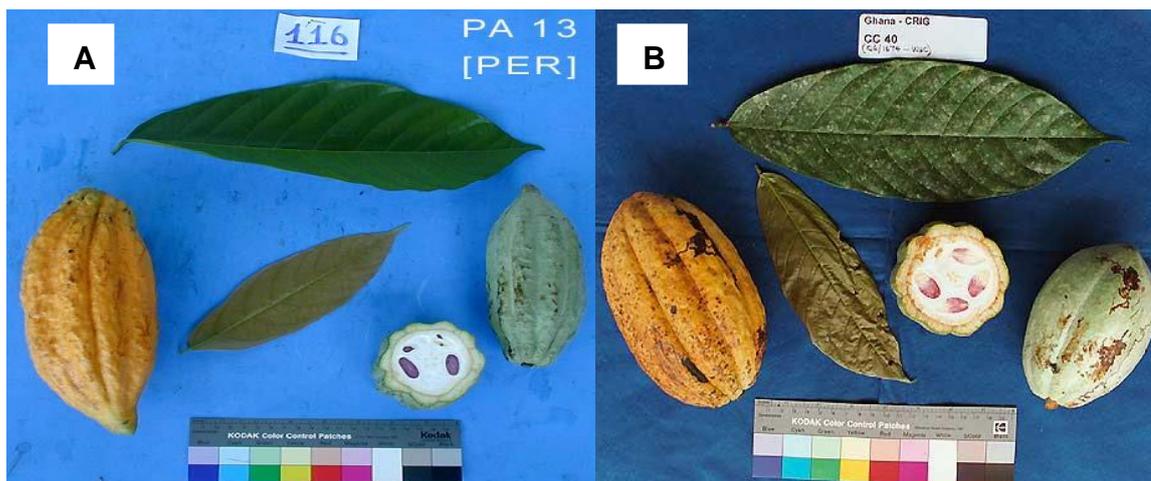
A cinética de emissão de fluorescência é um dos principais métodos para investigar a função de PS2 e suas reações às mudanças no ambiente e condições de crescimento (KALAJI et al., 2004). Sob condições de seca, a análise

da fluorescência *in vivo* tem sido enormemente utilizada para avaliar as respostas fisiológicas das plantas, devido a sua alta sensibilidade em identificar alterações induzidas no sistema fotossintético, especialmente no PS2 (MEHTA *et al.*, 2010). O estresse hídrico causa não apenas um dano substancial aos pigmentos fotossintéticos, mas também causa uma deterioração das membranas tilacóides (HUSEYNOVA *et al.*, 2009; ANJUM *et al.*, 2011; KANNAN, 2011). A razão  $F_v/F_m$  medida a 60°C pode ser um teste rápido e sensível para identificar genótipos altamente tolerantes às condições de seca, típicos de ambientes mediterrâneos (ELHANI *et al.*, 2000).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Material vegetal

Foram utilizados dois genótipos de *T. cacao* contrastantes em relação à resistência à seca (PA-13 e CC-40). Os dois genótipos tiveram suas flores polinizadas manualmente para que não houvesse polinização cruzada. O genótipo PA-13 (Figura 1 **A**) teve o seu pólen misturado ao pólen de *Herrania umbratica* para evitar a autoincompatibilidade. Em experimentos preliminares (SANTOS, 2012), verificou-se que plântulas derivadas deste genótipo são mais resistentes ao déficit hídrico no solo. O genótipo PA-13 é originário do Peru, pertence ao grupo forastero, possui (i) moderada resistência à ação do fungo *Phytophthora palmivora*; (ii) fruto e semente pequeno; (iii) autoincompatível; (iv) fonte de resistência e tolerância à seca. O genótipo CC-40 (Figura 1 **B**) é originário da Costa Rica, possui (i) moderada resistência à ação do fungo *Moniliophthora roreri*; (ii) fruto e semente pequenos; (ii) autocompatível.



**Figura 1** - Genótipos de *T. cacao* utilizados no experimento. PA – 13 (A) e CC – 40 (B).  
Foto: Coccoagen DB CIRAD online.

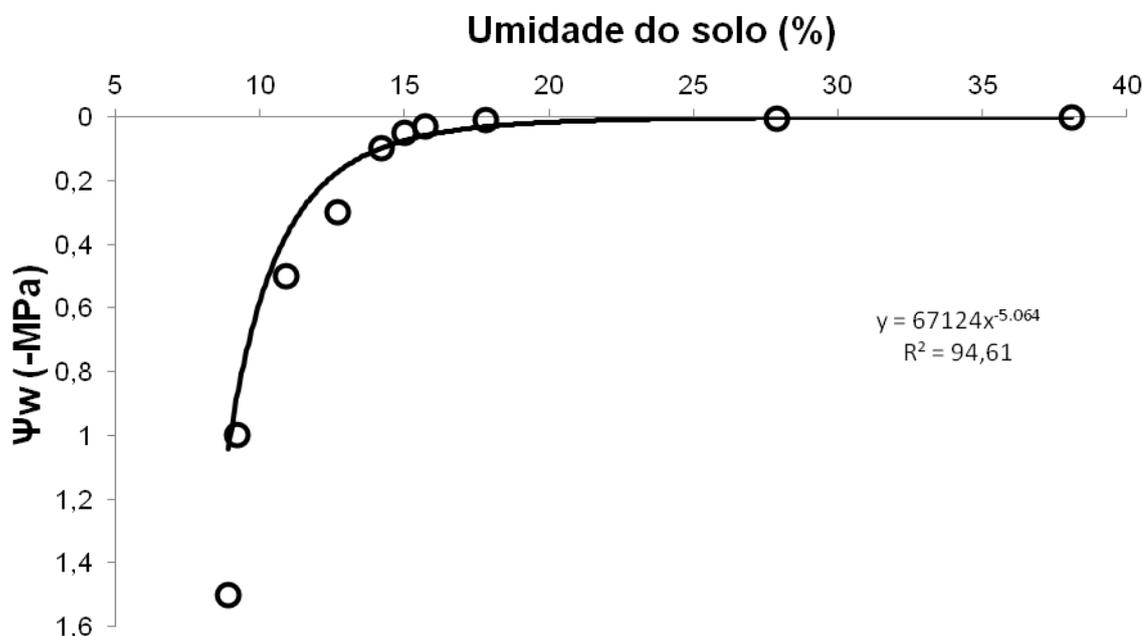
### 3.2. Análise do solo e condições de cultivo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no *campus* da Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC, localizada no município de Ilhéus, BA (14°47'00" S, 39°02'00" W). O clima local é do tipo Af, segundo a classificação de Köppen-Geiger, com precipitação média anual em torno de 1800 mm e distribuição irregular, as temperaturas médias anuais variam entre 22,1°C a 26°C, sendo maiores e com menor amplitude térmica na faixa costeira.

Foram utilizados vasos plásticos com capacidade para 12 dm<sup>-3</sup> preenchidos com a mistura (solo + areia na proporção de 2:1 v/v) sendo 8 dm<sup>-3</sup> de solo e 4 dm<sup>-3</sup> de areia. Cada componente do substrato foi pesado conforme a sua proporção na mistura, para que ao final, cada vaso mantivesse um peso total de 16 kgf. Nesse momento foram coletas amostras do substrato e enviadas à Universidade Federal de Viçosa para a determinação da curva de retenção de água no solo (Figura 2), análise da composição química (Tabela 1) e granulométrica (Tabela 2). A partir dos resultados da análise química foi realizada a calagem elevando a saturação por bases a 80% adicionando 21,36 g de calcário dolomítico em cada vaso. Foi realizada uma adubação de plantio (Tabela 3), uma adubação de cobertura com nitrogênio iniciada aos 30 dias após o plantio seguindo até os 60 dias após o plantio (Tabela 4) e adubações de cobertura quinzenais, num total de 14 adubações, dos microelementos minerais e uma nova dose de nitrogênio até o

final do experimento (Tabela 5). Os tratamentos com as doses de potássio tiveram seu início aos 45 dias após o plantio e seguiram até o fim do experimento (Tabela 6). A irrigação foi realizada de modo a manter todos os vasos na capacidade de campo (CC) até os três meses de cultivo, quando se iniciou o controle da aplicação da água nos tratamentos para a manutenção do potencial hídrico do solo nas classes desejadas para cada tratamento de seca (Tabela 7).

Foram utilizadas sementes provenientes de frutos de dois genótipos contrastantes para seca de plantas matrizes do Banco Ativo de Germoplasma (BAG) do Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC) da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC). Essas sementes foram plantadas diretamente nos vasos e, dois meses após a emergência, os vasos foram cobertos com lona plástica preta para minimizar os efeitos da evaporação da água do solo (Figura 3).



**Figura 2** - Curva de retenção de água no solo.

**Tabela 1** – Análise química do solo. Valores de pH em água, KCl e CaCl - Relação 1:2,5; P - Na - K - Fe - Zn -Mn - Cu – Extrator Mehlich 1; Ca -Mg -Al - Extrator: KCl - 1mol L<sup>-1</sup>; H + Al – Extrator acetato de cálcio 0,5mol L<sup>-1</sup> - pH 7,0; B - Extrator água quente; S - Extrator - fosfato monocálcico em ácido acético; Matéria orgânica (MO) = Carbono orgânico x 1,724 -Walkley-Black; ISNa - Índice de saturação de sódio; SB = Soma de bases trocáveis; CTC (t) - Capacidade de troca catiônica efetiva; CTC (T) - Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V= Índice de saturação de bases; m= Índice de saturação de alumínio; e P-rem= Fósforo remanescente.

pH		5,32
Ca	(cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,31
Mg		2,27
P		0,30
K		11,0
S		14,6
B	(mg dm <sup>-3</sup> )	0,17
Cu		1,21
Fe		254,80
Mn		9,00
Zn		3,53
Al <sup>+3</sup>		4,20
H + Al		7,40
SB	(cmolc dm <sup>-3</sup> )	2,92
(t)		7,12
(T)		10,32
V		28,30
m	(%)	59,00
ISNa		4,39
MO	(dag kg <sup>-1</sup> )	0,52
P-rem	(mg L <sup>-1</sup> )	10,40

**Tabela 2** - Análise granulométrica do solo. Classificação franco-argiloso.

Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila
(g kg <sup>-1</sup> )			
190	130	370	310

**Tabela 3** – Recomendação de adubação para o plantio de *T. cacao*.

Nutriente	Dose (mg dm <sup>-3</sup> )	Fonte	Quantidade (mg vaso <sup>-1</sup> )*
P	400	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Comercial)	26.285,0
B	0,4	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (PA)**	27,5
Cu	1,0	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O (PA)	47,2
Zn	3,0	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O (PA)	158,4
Mo	0,15	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> .4H <sub>2</sub> O (PA)	3,3

\*Vaso contendo 12 dm<sup>-3</sup> de solo. \*\* (PA) – Puro para análise.

**Tabela 4** – Recomendação de adubação de cobertura com nitrogênio a partir dos 30 dias após a semeadura seguindo até os 60 dias.

Nutriente	Dose (mg dm <sup>-3</sup> )	Fonte	Quantidade (mg vaso <sup>-1</sup> )*
N	25	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (Comercial)	909,1

\*Vaso contendo 12 dm<sup>-3</sup> de solo.

**Tabela 5** – Recomendação de adubação de cobertura a partir dos 75 dias após o plantio.

Nutriente	Dose (mg dm <sup>-3</sup> )	Fonte	Quantidade (mg vaso <sup>-1</sup> )*
N	50	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (Comercial)	1818,2
B	0,6	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (PA)**	6,9
Cu	0,8	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O (PA)	9,4
Zn	2,2	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O (PA)	26,4
Mo	0,1	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> .4H <sub>2</sub> O (PA)	0,7

\*Vaso contendo 12 dm<sup>-3</sup> de solo. \*\* (PA) – Puro para análise.

**Tabela 6** – Recomendação de adubação com as doses de potássio.

Nutriente	Dose (mg dm <sup>-1</sup> )	Fonte	Quantidade (mg vaso <sup>-1</sup> )*
K	10	KCl (PA)**	228,8
K	20	KCl (PA)	457,7
K	40	KCl (PA)	915,3

\*Vaso contendo 12 dm<sup>-3</sup> de solo. \*\*(PA) – Puro para análise.

**Tabela 7** - Classes de potencial hídrico do solo (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= - 0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) associadas aos respectivos intervalos de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ , - MPa), porcentagem de água no solo a partir da capacidade de campo [CC (%)], teor de água no solo (%) e o peso final de cada vaso (kg).

Classes	Intervalos de $\Psi_{\text{wsolo}}$ (-MPa)	(%) CC	Teor de água no solo (%)
I	0,01 – 0,03	70 - 59	21,76 - 18,34
II	0,04 – 0,07	56 - 50	17,41 - 15,54
III	0,11 – 0,19	46 - 41	14,30 - 12,74
IV	0,25 – 0,51	39 - 34	12,12 - 10,57

\*Peso do solo seco de cada vaso = 16 kg.



**Figura 3** – Vista parcial do experimento mostrando a lona plástica cobrindo os vasos, visando minimizar o efeito da evaporação do solo.

### 3.3. Aplicação dos tratamentos

Após a germinação das sementes, as plantas foram mantidas com o potencial hídrico do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) próximo à capacidade de campo, que teve o seu teor de umidade estimado em 31%, que correspondeu a um  $\Psi_{\text{wsolo}}$  de -0,002 MPa, pelo período de dois meses. Aos 45 dias após a semeadura (DAS), iniciaram-se a aplicação dos tratamentos de adubação do solo com as três doses de K, correspondentes a [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>], consideradas como doses sub-ótima; ideal (controle), utilizada nas recomendações de adubação usuais; e superior a ideal, respectivamente. Foram realizadas adubações quinzenais pelo período de 6 meses.

Após aplicação de K, cinco plantas de cada genótipo e tratamento, foram submetidas a quatro classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) a partir da capacidade de campo, (Classe I= - 0,01 a - 0,03 MPa; Classe II= -0,04 a - 0,07 MPa; Classe III= - 0,11 a - 0,19 MPa; e Classe IV= - 0,25 a - 0,51 MPa), por meio da suspensão gradativa da irrigação, perfazendo um total de 120 plantas. Os vasos foram cobertos com lona plástica preta para minimizar a perda de água do solo por evaporação (Figura 3). O controle da quantidade de água aplicada manualmente em cada tratamento se deu por meio de pesagens diárias dos vasos, seguido pela reposição da água transpirada pelas plantas, utilizando água de chuva, mantendo-se o peso estimado de cada vaso (Tabela 7), calculado de acordo com a curva de retenção de água no solo.

### 3.4. Trocas gasosas foliares

As medições de trocas gasosas foliares foram realizadas a partir do quarto mês após o início da aplicação dos tratamentos (doses de K), juntamente com as adubações no solo e da implantação das quatro classes de regime hídrico no solo, utilizando-se o medidor de fotossíntese portátil LI-6400 (Li-Cor Inc., Nebraska, USA), equipado com uma fonte de luz artificial. As medições pontuais foram realizadas em folhas maduras e completamente expandidas (2ª ou 3ª folha) a partir do ápice do ramo, entre 8 e 10 h, em cinco plantas (repetições biológicas) e três leituras em cada indivíduo. Durante as medições, a irradiância foi mantida

constante em  $800 \text{ } (\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ . As taxas de fotossíntese líquida por unidade de área foliar ( $A$ ), a condutância estomática ao vapor de água ( $g_s$ ), a taxa transpiratória foliar ( $E$ ) foram estimadas a partir dos valores da variação de  $\text{CO}_2$  e da umidade do ar no interior da câmara, determinados pelo analisador de gases a infravermelho do referido aparelho. O tempo mínimo, pré-estabelecido para a estabilização das leituras foi de 30 s e o máximo, para salvar cada leitura, de 60 s. O coeficiente de variação (CV) máximo admitido para salvar cada leitura foi de 0,3%. Além da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), foram mantidos constantes a temperatura do bloco a  $26^\circ\text{C}$  e o  $\text{CO}_2$  ( $380 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ) no interior da câmara foliar. Foram estimadas as mudanças de  $A$  em função de  $g_s$ , a eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) e a eficiência instantânea do uso da água ( $WUE = A/E$ ). A razão  $A/g_s$  constitui um parâmetro de grande importância para a definição dos critérios de utilização de água (FLEXAS et al., 2004; ROMERO; BOTÍA, 2006).

### **3.5. Teor de umidade no solo**

O teor de umidade do solo foi determinado por meio do método gravimétrico, utilizando-se uma balança semi-analítica. Para tal, a disponibilidade de água no solo, em cada classe de  $\Psi_{\text{wsolo}}$ , foi medida ao final do experimento por meio da coleta de amostras de solo, com auxílio de um trado, na camada de 0 a 20 cm em todas as unidades experimentais. Para a obtenção da percentagem de água no solo, procedeu-se a sua pesagem após permanência por um período de 48 h em estufa de circulação forçada de ar a  $105^\circ\text{C}$ . A partir da curva de retenção de água no solo (Figura 2), pode-se estimar o  $\Psi_{\text{wsolo}}$  em cada classe ao final do experimento.

### **3.6. Emissão de fluorescência**

As medições da emissão de fluorescência da clorofila foram feitas nas mesmas folhas utilizadas para as medições de trocas gasosas, usando-se um fluorômetro portátil (*Pocket PEA Chlorophyll Fluorimeter* - v 1.10 - Hansatech

Instruments, Norfolk, UK), entre 10 e 11 h. As folhas selecionadas foram adaptadas ao escuro durante um período de, no mínimo, 20 min, para reflexão da radiação solar incidente, decréscimo da temperatura foliar e oxidação de todo o sistema de transporte fotossintético de elétrons, utilizando-se cliques apropriados. Após a adaptação ao escuro, as folhas foram expostas a um pulso saturante de luz ( $3500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , comprimento de onda de 650 nm, por 1 s), e os sinais de emissão de fluorescência foram registrados no sistema de aquisição de dados do Pocket PEA, utilizando um *software* específico. Dentre os parâmetros obtidos, foram avaliados somente as fluorescências variável ( $F_v$ ) e máxima ( $F_m$ ) e o rendimento quântico máximo de PS2 ( $F_v/F_m$ ).

### **3.7. Macro e micronutrientes nutrientes minerais na planta e no solo**

Aos 180 dias após a aplicação dos tratamentos, todas as folhas e raízes das plantas por tratamento foram colhidas, armazenadas separadamente em sacos de papel, e secas em estufa de circulação forçada de ar a 75 °C até massa constante. Posteriormente, o material vegetal foi moído em moinho do tipo Willey e armazenado em sacos de papel. Para a determinação do teor de macro e micronutrientes minerais, os sacos contendo a biomassa seca, foram colocados novamente na mesma estufa e temperatura por 24 h. Fez-se a pesagem de 0,5 g de cada amostra, usando balança analítica. Em seguida, as amostras foram colocadas em frascos de vidro e submetidas à digestão nítrico-perclórica para determinação dos teores de Ca, Mg, Fe, Zn, Mn e Cu por espectrofotometria de absorção atômica, P por colorimetria, e K e Na por fotometria de emissão de chama. Para N fez-se digestão sulfúrica e determinou o seu teor usando o método de Kjeldahl (EMBRAPA, 1997).

O solo foi coletado e colocado para secar ao ar em seguida foi destorroado e peneirado em peneira de 2 mm utilizando a metodologia de (DEFELIPO e RIBEIRO, 1997). As análises foram realizadas no laboratório de Fertilidade do solo da Universidade Federal de Viçosa.

### **3.8. Delineamento experimental**

O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação em delineamento experimental inteiramente casualizado em arranjo fatorial 2x3x4 com 24 tratamentos, referentes aos 2 genótipos de cacau (PA-13 e CC-40), três doses de potássio [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] quatro classes de potenciais hídricos no solo [ I (-0,01 a -0,03 MPa), II (-0,04 a 0,07 MPa), III (-0,11 a -0,19 MPa) e IV (-0,25 a -0,51 MPa)] e com cinco repetições, sendo cada repetição continha uma planta por unidade experimental. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de média de Scott-Knott (p< 0,05), quando pertinente.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Trocas gasosas foliares de genótipos em resposta ao déficit hídrico no solo e às doses de K e às suas interações

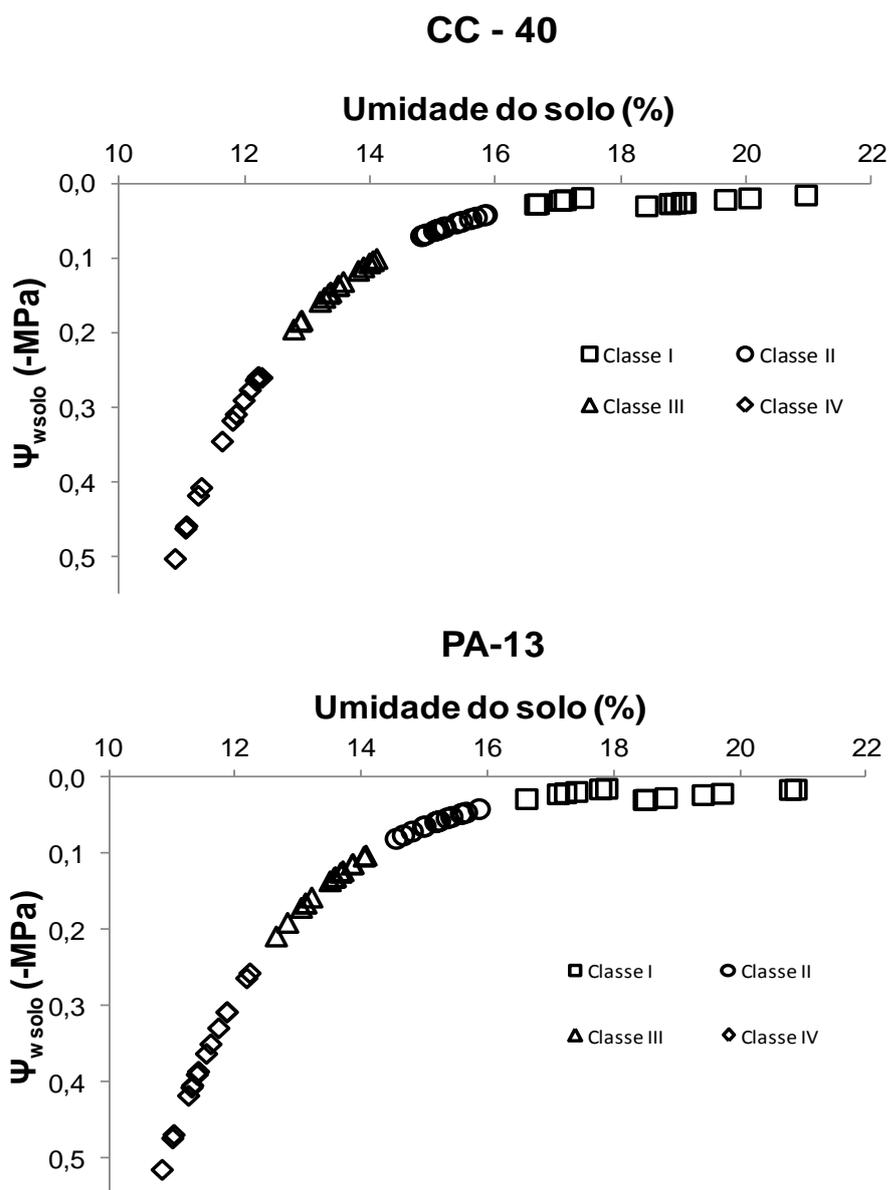
De acordo como o resumo da probabilidade da variância para os parâmetros taxa fotossintética líquida por unidade de área foliar [ $A$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )], condutância estomática ao vapor de água [ $g_s$  ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )], eficiências intrínseca [ $A/g_s$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ )] e instantânea do uso da água [ $A/E$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ )] e taxa transpiratória [ $E$  ( $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )] (Tabela 8), observou-se que houve uma interação tripla entre as fontes de variação genótipo, dose e classe para a variável fotossíntese a 1% de significância pelo teste F. A condutância estomática apresentou interação entres os genótipos e as classes a 1% de significância. A eficiência intrínseca do uso da água foi significatva para a interação genótipo x dose ( $p < 0,05$ ) pelo teste F. A eficiência instatânea do uso da água apresentou forte variação apenas entre os genótipos ( $p < 0,01$ ) e a transpiração variou apenas para classe.

**Tabela 8** – Probabilidade de F (ANOVA) para trocas gasosas foliares aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa a 5% de probabilidade pelo teste F. (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa a 1% de probabilidade pelo teste F. ns tratamentos não apresentam diferença significativa a 5% de probabilidade pelo teste F.

FV	GL	<b>A</b>	<b>gs</b>	<b>A/gs</b>	<b>A/E</b>	<b>E</b>
Genótipo (G)	1	0,0432**	0,6596 <sup>ns</sup>	0,0470*	0,0044**	0,3391 <sup>ns</sup>
Dose (D)	2	0,0001**	0,0387*	0,7842 <sup>ns</sup>	0,7400 <sup>ns</sup>	0,1598 <sup>ns</sup>
Classe (C)	3	0,0000**	0,0000**	0,2628 <sup>ns</sup>	0,1495 <sup>ns</sup>	0,0000**
G x D	2	0,1029 <sup>ns</sup>	0,8641 <sup>ns</sup>	0,0133*	0,2033 <sup>ns</sup>	0,2617 <sup>ns</sup>
G x C	3	0,0057**	0,0027**	0,1893 <sup>ns</sup>	0,6431 <sup>ns</sup>	0,0700 <sup>ns</sup>
D x C	6	0,0118*	0,1850 <sup>ns</sup>	0,4492 <sup>ns</sup>	0,1844 <sup>ns</sup>	0,2486 <sup>ns</sup>
G x D x C	6	0,0008**	0,1323 <sup>ns</sup>	0,7742 <sup>ns</sup>	0,4824 <sup>ns</sup>	0,2660 <sup>ns</sup>
Erro	96					
Total	119					
cv (%)		28,49	44,38	33,03	31,13	42,22

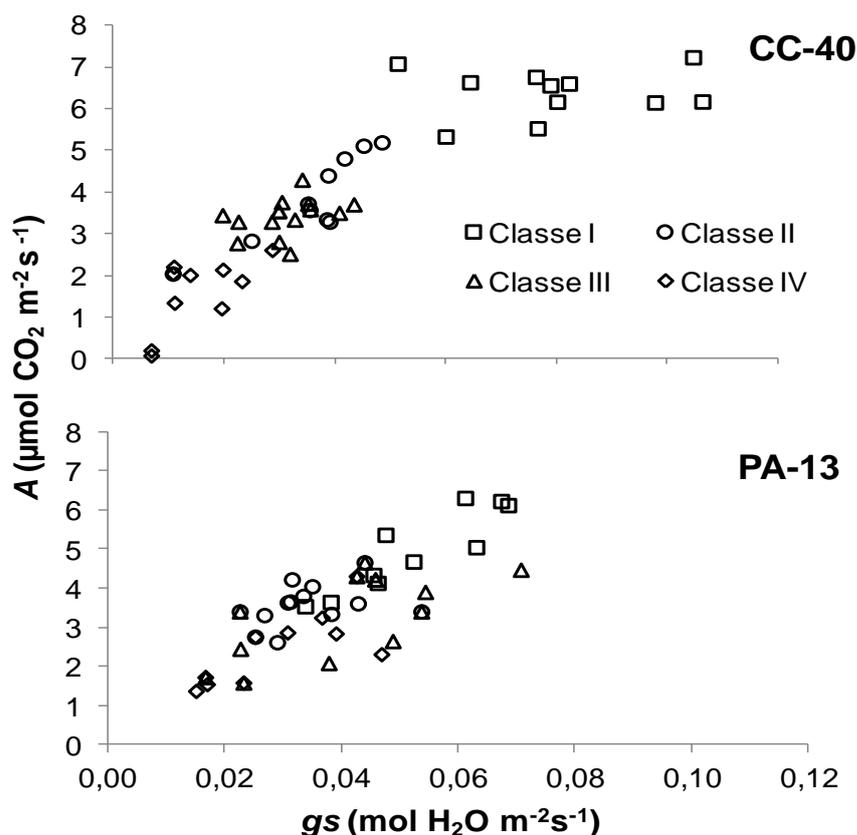
**A**=( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); **gs**= ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); **A/gs**= ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ ); **A/E**= ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ ); **E**= ( $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );

Observou-se um comportamento semelhante na distribuição dos pontos entre as classes de potenciais hídricos do solo para os dois genótipos de *T. cacao* avaliados, quando comparadas as curvas de umidade do solo e  $\Psi_{\text{wSolo}}$  (-MPa) ao final do experimento. Os pontos são o agrupamento de todas as amostras de solo em cada classe de  $\Psi_{\text{wSolo}}$ , apresentando a dispersão dos dados (Figura 4).



**Figura 4** – Curvas de umidade do solo (%) em função do potencial hídrico do solo [ $\Psi_{wsolo}$  (- MPa)] cultivado com dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos ao déficit hídrico no solo e independente das doses de potássio no solo, utilizando todas as repetições ao final do experimento.

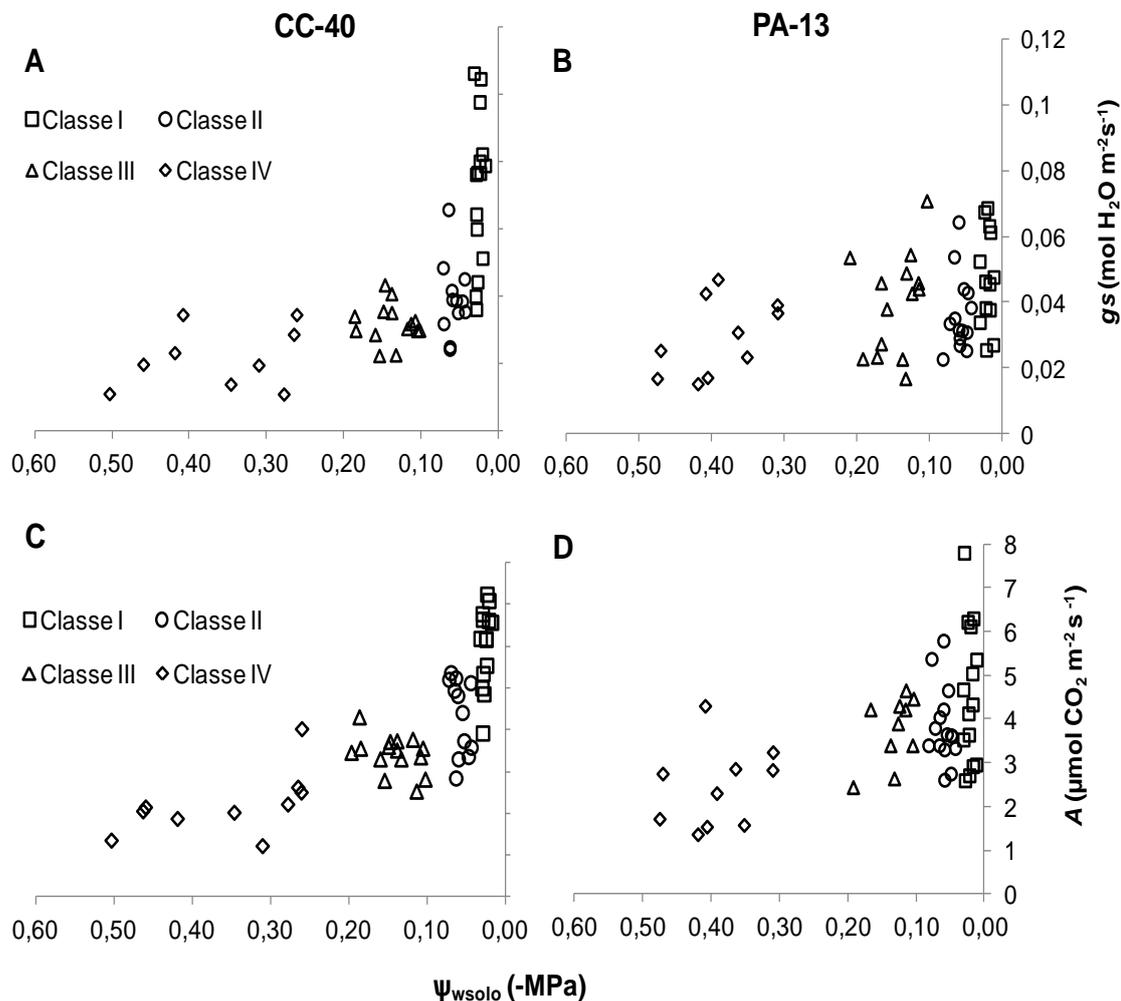
Houve uma maior tendência de concentração das classes de  $\Psi_{wsolo}$  (-MPa) para o genótipo PA-13 em relação às variáveis de trocas gasosas foliares como *A* e *gs*, quando comparado ao genótipo CC-40, que apresentou uma distinção entre as classes para essas variáveis (Figura 5).



**Figura 5** – Taxa fotossintética líquida por unidade de área foliar [ $A$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )] em função da condutância estomática ao vapor de água [ $g_s$  ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )] em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) independente das doses. Os símbolos representam as classes. Valores médios de 10 e 14 repetições.

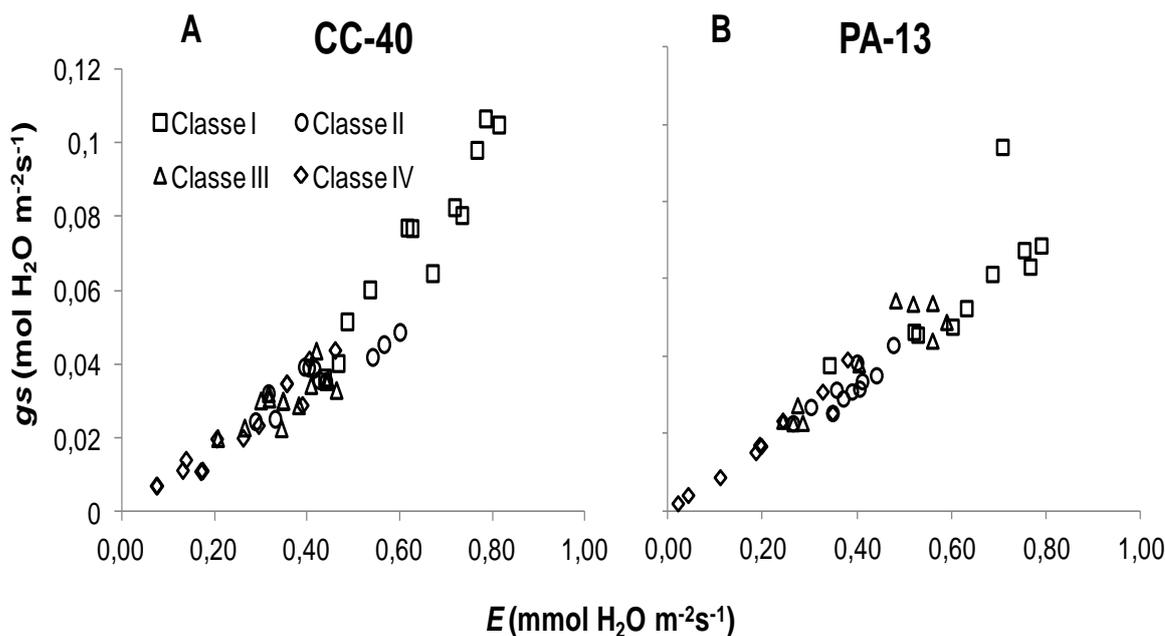
As classes I, II, III e IV mostraram-se bem distintas para o genótipo CC-40 para a variável  $g_s$  em função  $\Psi_{\text{wsolo}}$ , cujos valores de  $g_s$  decresceram com a diminuição de  $\Psi_{\text{wsolo}}$ . O menor valor de  $g_s$  para este genótipo foi de  $0,02$  ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) na classe III e o maior valor foi de  $0,106$  ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) na classe I. Destaque para as diferenças entre as classes I e IV (Figura 6 A). Para o genótipo PA-13 não se observaram distinções entre as três primeiras classes, verificou-se apenas uma clara manutenção da dispersão dos valores de  $g_s$  entre as classes I, II e III, sendo que na classe IV houve apenas um leve decréscimo de  $g_s$ , quando comparado com a classe I (Figura 6 B). O menor valor de  $g_s$  observado para o genótipo PA-13 foi de  $0,002$  ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) na classe IV enquanto o maior valor foi de  $0,116$  ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) na classe II. Observaram-se diferenças nos valores de  $A$  com o decréscimo de  $\Psi_{\text{wsolo}}$ , que se tornaram evidentes, entre os dois genótipos avaliados, com o decréscimo das classes de  $\Psi_{\text{wsolo}}$ , principalmente a

partir da classe IV (- 0,25 MPa a - 0,51 MPa) (Figura 6). Para o genótipo CC-40, verificou-se uma queda acentuada nos valores de A em função do  $\Psi_{\text{wsolo}}$  mais negativo [classe de potencial IV (-0,25 a -0,51 MPa)] (Figura 6 **C**). O maior valor de fotossíntese para o genótipo CC-40 foi de 8,72 ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) na classe I e o menor foi de 0,07 ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) na classe IV. Entretanto, para o genótipo PA-13, tido como tolerante ao déficit hídrico no solo, observou-se certa concentração de valores de A entre as classes III (- 0,11 a - 0,19 MPa) e IV (- 0,25 a - 0,51 MPa), respectivamente (Figura 6 **D**). O genótipo PA-13 apresentou na classe I maior valor de A 7,79 ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) enquanto que o menor valor foi de 1,18 ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) na classe III.



**Figura 6** – Condutância estomática ao vapor de água [ $gs (mol H_2O m^{-2} s^{-1})$ ] (**A** e **B**, respectivamente) e taxa fotossintética líquida por unidade de área foliar [ $A (\mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1})$ ] (**C** e **D**, respectivamente) em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= -0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [ $10 mg dm^{-3}$ ,  $20 mg dm^{-3}$  (controle) e  $40 mg dm^{-3}$ ] aos 180 dias de cultivo. Os símbolos representam as classes. Valores médios de 10 e 14.

Verificou-se uma tendência quadrática dos valores de  $gs \times E$  para as classes do genótipo CC-40, enquanto que para o genótipo CC-40 esses valores seguiram uma tendência linear (Figura 7 **A** e **B**).

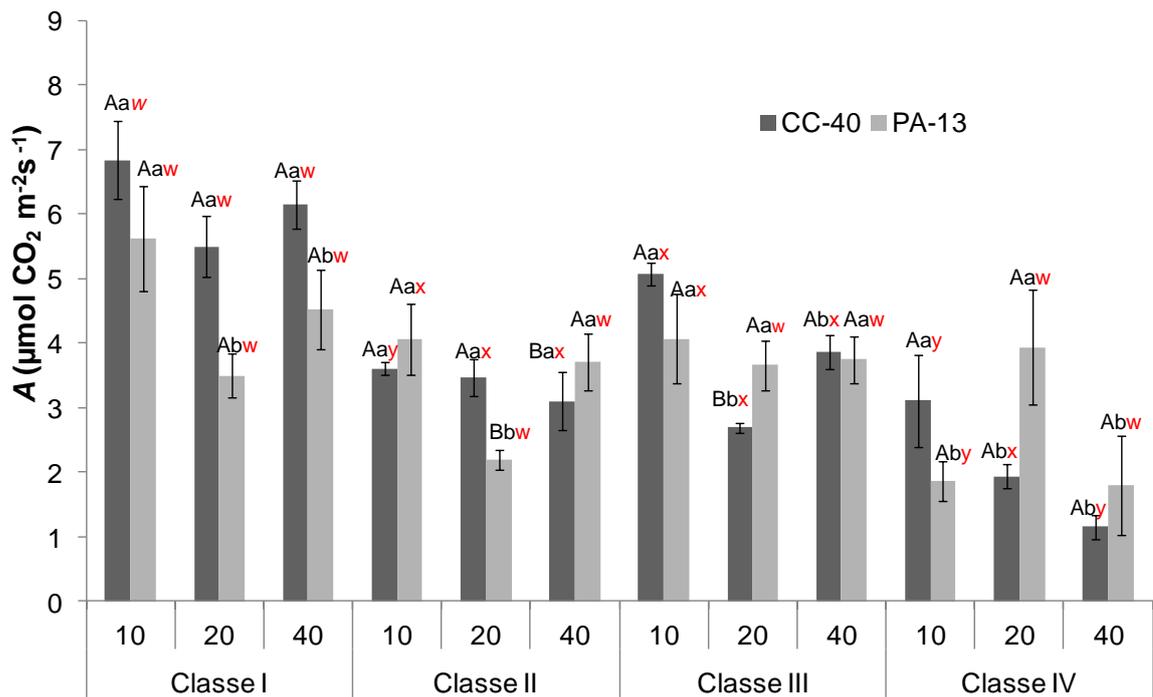


**Figura 7-** Condutância estomática ao vapor de água [ $gs \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ] e taxa de transpiração foliar [ $E \text{ (mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ ] em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [ $10 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  (controle) e  $40 \text{ mg dm}^{-3}$ ] entre 170 a 180 dias de cultivo. Os símbolos representam as classes. Valores médios de 10 e 14 repetições.

Observou-se uma diminuição nos valores de  $A$  à medida que os valores de  $\Psi_{\text{wsolo}}$  das classes foram diminuindo para os dois genótipos (Figura 8). Verificou-se diferenças intergenotípicas para os valores de  $A$  apenas nas classes de  $\Psi_{\text{wsolo}}$  II e III (II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa), sendo que na classe II o maior valor de  $A$  ( $3,47 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) foi para, o genótipo CC-40, na dose correspondente a  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  de K no solo (controle) e o maior valor de  $A$  ( $3,70 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) para o genótipo PA-13 ocorreu na dose de  $40 \text{ mg K dm}^{-3}$  solo. Entretanto, na classe III o maior valor de  $A$  ( $3,66 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) foi obtido pelo genótipo PA-13 na dose de  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  de K no solo.

Houve também diferenças entre  $A$  e as doses de K, cujos maiores valores de  $A$  ( $5,07$  e  $3,10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  respectivamente) foram observados para o genótipo CC-40, nas classes III e IV e na dose correspondente a  $10 \text{ mg K dm}^{-3}$  solo (Figura 8). Para o genótipo PA-13, verificou-se diferença entre as doses na classe I, com o maior valor de  $A$  ( $5,62 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) para a dose de  $10 \text{ mg K dm}^{-3}$  solo; na classe II, com os maiores valores de  $A$  ( $4,05$  e  $3,70 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )

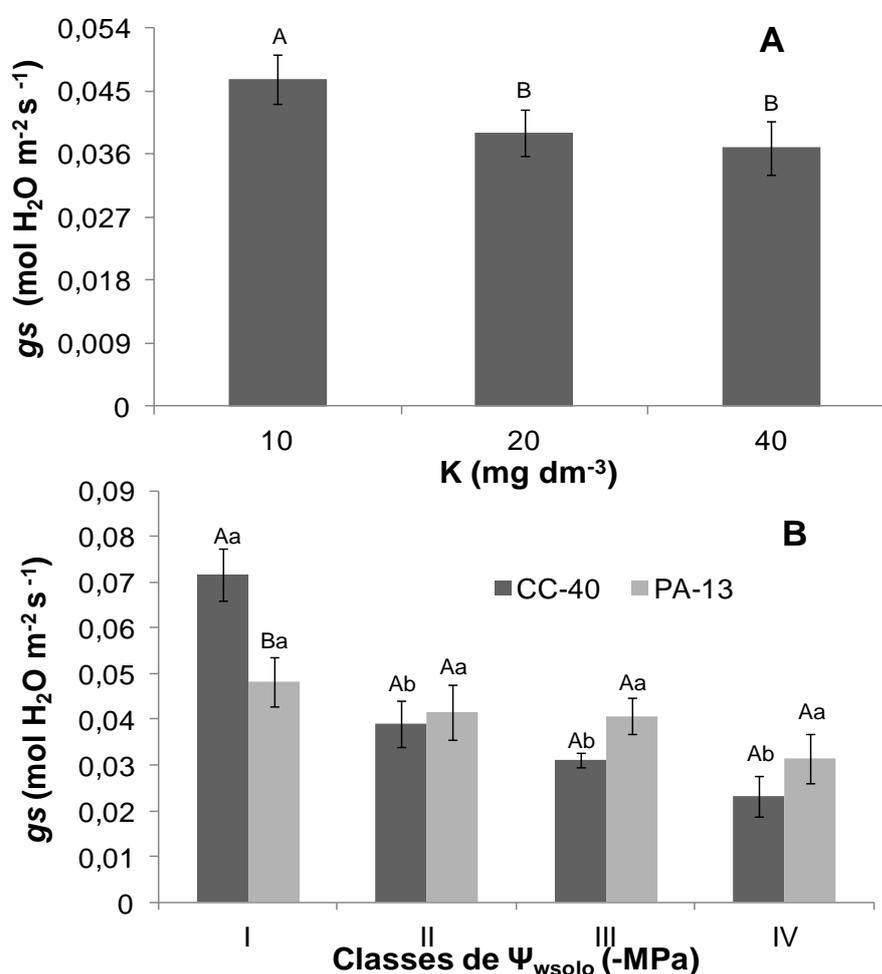
respectivamente) para as doses 10 e 40 mg K dm<sup>-3</sup> solo; e na classe IV, com maior valor de A (3,94 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) para a dose de 20 mg K dm<sup>-3</sup> solo. Diferenças entre as classes foram observadas para o genótipo CC-40, que apresentou maiores valores de A (6,84, 5,5 e 6,15 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> respectivamente) na classe I, em todas as doses, e menores valores (3,39 e 2,06 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) nas classes II e IV, nas doses 10 e 40 mg K dm<sup>-3</sup> solo, respectivamente (Figura 8).



**Figura 8** – Interações entre genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13), doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] e classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{w_{solo}}$ ) (I= -0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) para a variável fotossíntese líquida por unidade de área foliar [A (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)] avaliada entre 170 a 180 dias de cultivo. (A). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam os genótipos dentro de cada dose e classe pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Médias seguidas por letras minúsculas comparam as doses dentro de cada genótipo e classe pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Médias seguidas por letras em vermelho comparam as classes dentro de cada genótipo e dose pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

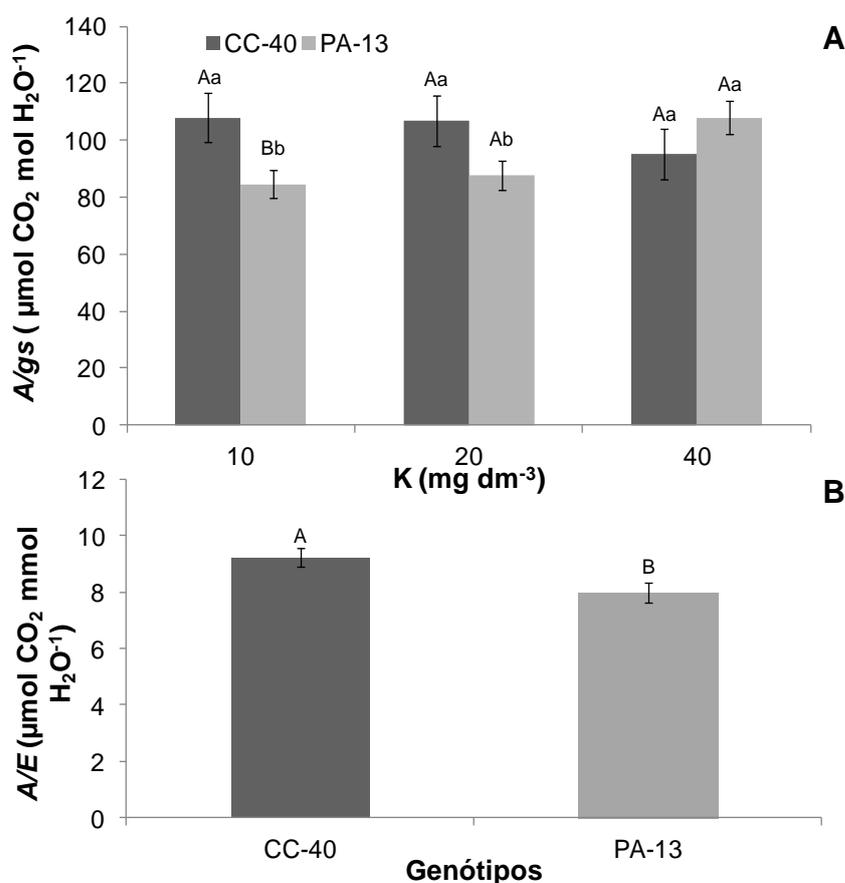
Os valores médios de  $g_s$ , nas doses 20 (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup> de K no solo, não diferiram significativamente ( $p < 0,05$ ) entre si (0,36 e 0,39 mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> respectivamente). Entretanto, em comparação com a menor dose de K aplicada (10 mg dm<sup>-3</sup> solo), houve uma redução nos valores de  $g_s$  (Figura 9 A). Em relação

às classes de  $\Psi_{\text{wsolo}}$ , verificou-se diferença intergenotípica apenas para a classe I (- 0,01 a - 0,03 MPa) (Figura 9 B), onde o genótipo CC-40 alcançou maior valor de  $g_s$  (0,071 mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) em relação ao genótipo PA-13 (0,048 mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Comparando-se o mesmo genótipo entre as classes, observou-se que o PA-13 manteve-se com o valor de  $g_s$  constante, enquanto que o CC-40 teve os valores de  $g_s$  reduzidos da classe I (- 0,01 a -0,03 MPa) para a classe II (-0,04 a -0,07 MPa). A partir daí, os valores de  $g_s$  não diferiram significativamente ( $p < 0,05$ ) entre si até a classe IV (-0,25 a -0,51 MPa) (Figura 9 B).



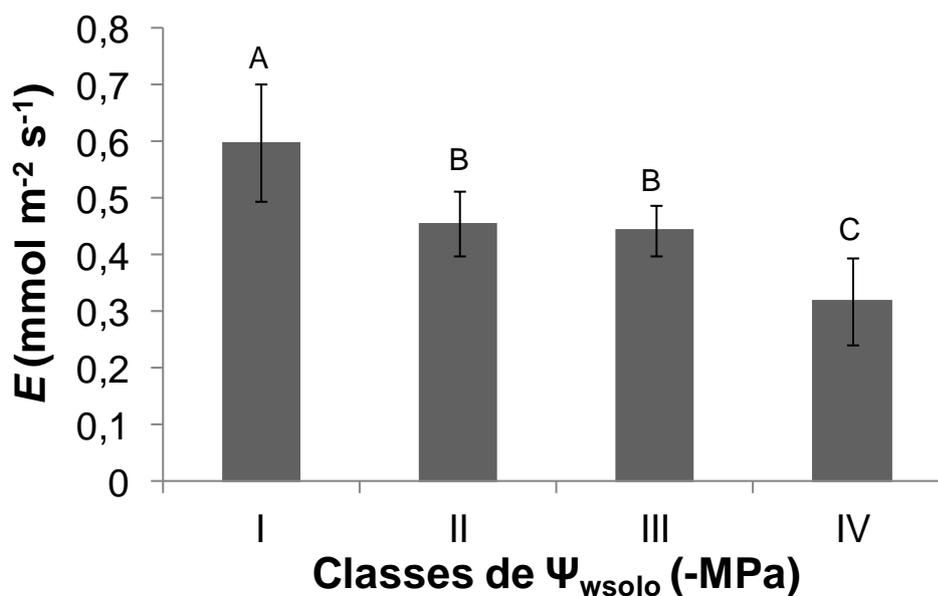
**Figura 9** – Condutância estomática ao vapor de água [( $g_s \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )], avaliada entre 170 a 180 dias de cultivo, em função de doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] (A). Condutância estomática ao vapor de água [( $g_s \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )] em função de genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) e de classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= - 0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) (B). Letras maiúsculas comparam as médias das doses de potássio pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ) (A). Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos dentro de cada classe pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ) (B). Letras minúsculas comparam as médias de um mesmo genótipo entre as classes pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ) (B). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

No tratamento correspondente a 10 mg K dm<sup>-3</sup> solo (Figura 10 **A**), o genótipo CC-40 apresentou valor de *A/g*s significativamente ( $p < 0,05$ ) maior do que o genótipo PA-13. Já nos tratamentos de 20 e 40 mg K dm<sup>-3</sup> solo não foi observada nenhuma diferença intergenotípica significativa ( $p < 0,05$ ) para a *A/g*s. Por outro lado, o valor de *A/E* foi superior para o genótipo CC-40, quando comparado ao PA-13 (Figura 10 **B**).



**Figura 10** – Eficiências intrínsecas (*A/g*s) (**A**) e instantâneas (*A/E*= WUE) do uso da água (**B**) em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= - 0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos dentro de cada dose (**A**) e os genótipos (**B**) pelo teste de Skott-Knott ( $p < 0,05$ ). Letras minúsculas comparam as médias de um mesmo genótipo entre as diferentes doses (**A**) pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

Verificou-se que nas classes II e III (-0,04 a -0,07 MPa; -0,11 a -0,19 MPa) respectivamente, os valores de  $E$  não apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ). Observou-se uma diminuição da transpiração à medida que as classes de  $\Psi_{\text{wsolo}}$  foram diminuindo (Figura 11). Os valores de  $E$  variaram de  $0,59 \pm 0,078 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-2}$  para a classe I até  $0,31 \pm 0,016 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-2}$  para a classe IV.



**Figura 11** – Transpiração em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias entre as classes pelo teste de Skott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

## 4.2. Respostas nutricionais de genótipos de cacau ao déficit hídrico no solo e às doses de potássio

### 4.2.1. Macro e micronutrientes minerais na folha

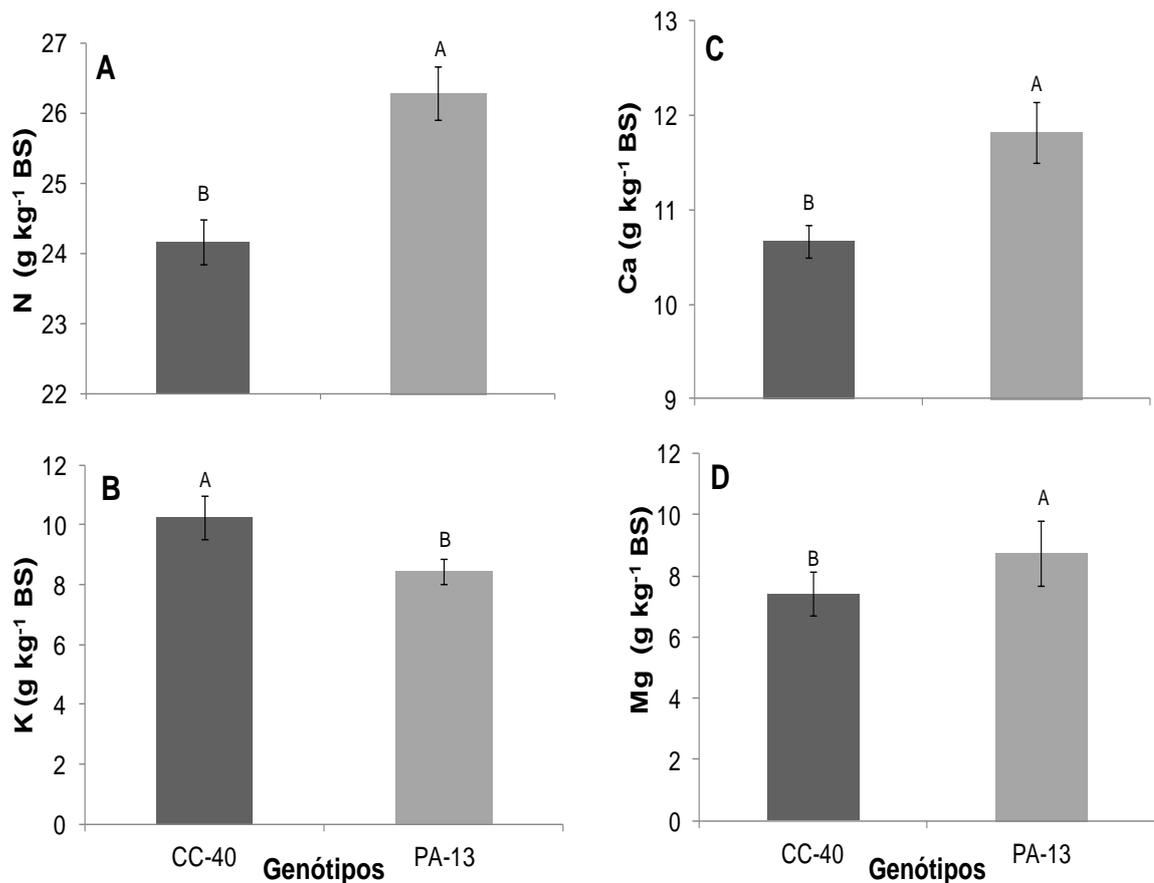
Ao analisar os níveis de significância para os macro e micronutrientes minerais na biomassa seca (BS) foliar (Tabela 9), para ambos os genótipos de *T. cacao* avaliados, observou-se, para a fonte de variação genótipo, que a maioria dos teores de macronutrientes minerais, exceto para o P, apresentou diferença significativa ( $p < 0,01$ ) pelo teste F. Além disso, verificou-se diferença significativa ( $p < 0,01$ ) no teor de K pelo teste F apenas para a variável dose. Por outro lado,

apenas os teores de Ca e Mg apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste F para a fonte de variação classe.

**Tabela 9** – Probabilidade de F (ANOVA) para teores de macronutrientes minerais na biomassa seca foliar de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F ( $p < 0,05$ ). (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F ( $p < 0,01$ ). (ns) tratamentos não apresentam diferença significativa pelo teste F ( $p < 0,05$ ).

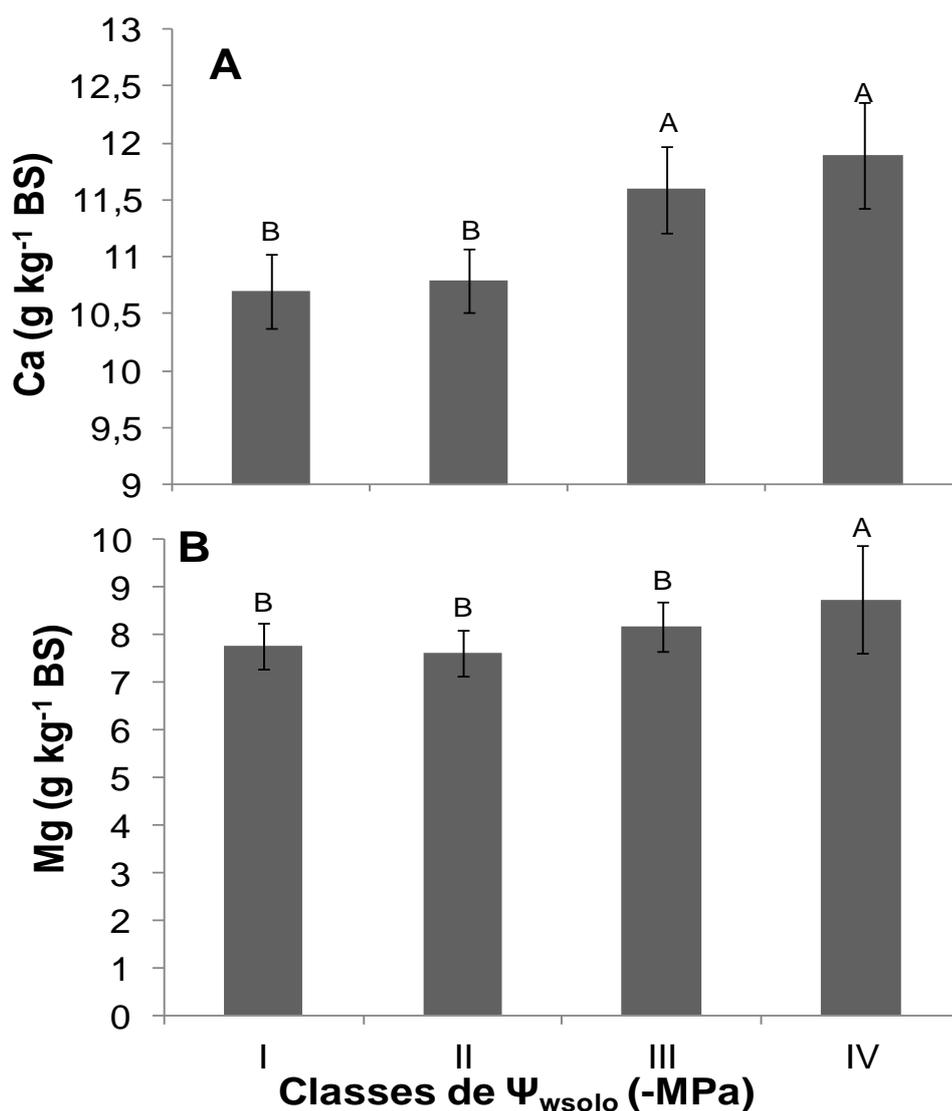
FV	GL	N	P	K	Ca	Mg
Genótipo (G)	1	0,0001**	0,2692 <sup>ns</sup>	0,0000**	0,0015**	0,0000**
Dose (D)	2	0,2849 <sup>ns</sup>	0,1990 <sup>ns</sup>	0,0000**	0,4419 <sup>ns</sup>	0,0646 <sup>ns</sup>
Classe (C)	3	0,5246 <sup>ns</sup>	0,0665 <sup>ns</sup>	0,0547 <sup>ns</sup>	0,0345*	0,0247*
G x D	2	0,5376 <sup>ns</sup>	0,4699 <sup>ns</sup>	0,0719 <sup>ns</sup>	0,2154 <sup>ns</sup>	0,6727 <sup>ns</sup>
G x C	3	0,1627 <sup>ns</sup>	0,4126 <sup>ns</sup>	0,1305 <sup>ns</sup>	0,1603 <sup>ns</sup>	0,0576 <sup>ns</sup>
D X C	6	0,2993 <sup>ns</sup>	0,7215 <sup>ns</sup>	0,2583 <sup>ns</sup>	0,1736 <sup>ns</sup>	0,1967 <sup>ns</sup>
G x D x C	6	0,1716 <sup>ns</sup>	0,3306 <sup>ns</sup>	0,0520 <sup>ns</sup>	0,1644 <sup>ns</sup>	0,3934 <sup>ns</sup>
Erro	96					
Total	119					
cv (%)		10,55	25,90	19,77	16,68	19,83

Houve diferenças intergenotípicas significativas ( $p < 0,05$ ) para os teores de N na biomassa seca (BS) foliar (Figura 12 **A**). Verificou-se, para o genótipo PA-13, tolerante ao déficit hídrico no solo, um aumento do teor de N em relação ao genótipo CC-40 (não tolerante). O genótipo PA-13 apresentou um teor de N correspondente a 26,3 g kg<sup>-1</sup> BS, ao passo que para o genótipo CC-40 o teor foliar de N foi de 24,2 g kg<sup>-1</sup> BS. Em contrapartida, o genótipo CC-40 apresentou o maior teor de K foliar (10,3 g kg<sup>-1</sup> BS), em relação ao PA-13 (8,4 g kg<sup>-1</sup> BS) (Figura 12 **B**). Por outro lado, para aos teores de Ca e Mg (Figura 12 **C** e **D**), os maiores valores foram observados para o genótipo PA-13 (11,9 e 8,7 g kg<sup>-1</sup> BS, respectivamente), enquanto que para o genótipo CC-40 os teores foliares de Ca e Mg foram de 10,7 e 7,4 g kg<sup>-1</sup> BS, respectivamente.



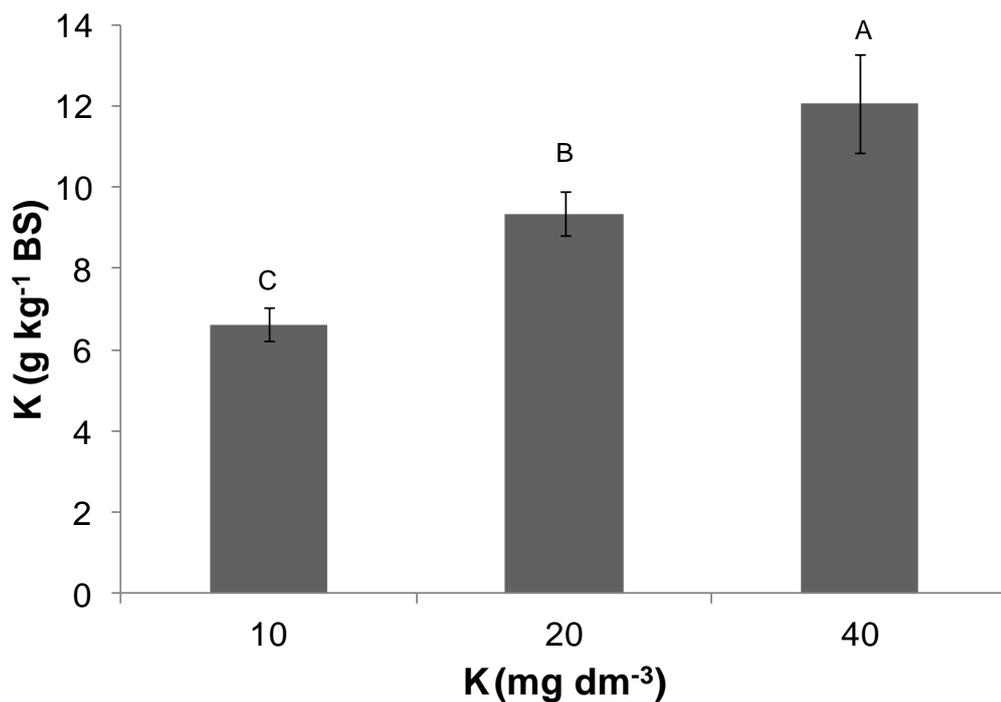
**Figura 12** – Teores de nitrogênio (N) (A), potássio (K) (B), cálcio (Ca) (C) e magnésio (Mg) em folhas de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] (D) aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

Verificou-se também um aumento dos teores de Ca e Mg foliar à medida que as classes de  $\Psi_{\text{wsolo}}$  foram ficando mais negativas. Esse aumento foi significativo ( $p < 0,05$ ), para o Ca nas classes III e IV (Figura 13 A). Já para o Mg, esse aumento foi observado apenas na classe com  $\Psi_{\text{wsolo}}$  mais negativo (classe IV) (Figura 13 B).



**Figura 13** – Teores de cálcio Ca (**A**) e magnésio (Mg) foliar (**B**) em função das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos teores de Ca entre as classes pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

Observou-se um aumento dos teores de K foliar, proporcional ao incremento das doses de K aplicadas em cada tratamento (Figura 14). Os teores de K foliar verificados nas doses correspondentes a 10, 20 e 40 mg K dm<sup>-3</sup> solo foram de 6,6; 9,4 e 12,1 g kg<sup>-1</sup> BS.



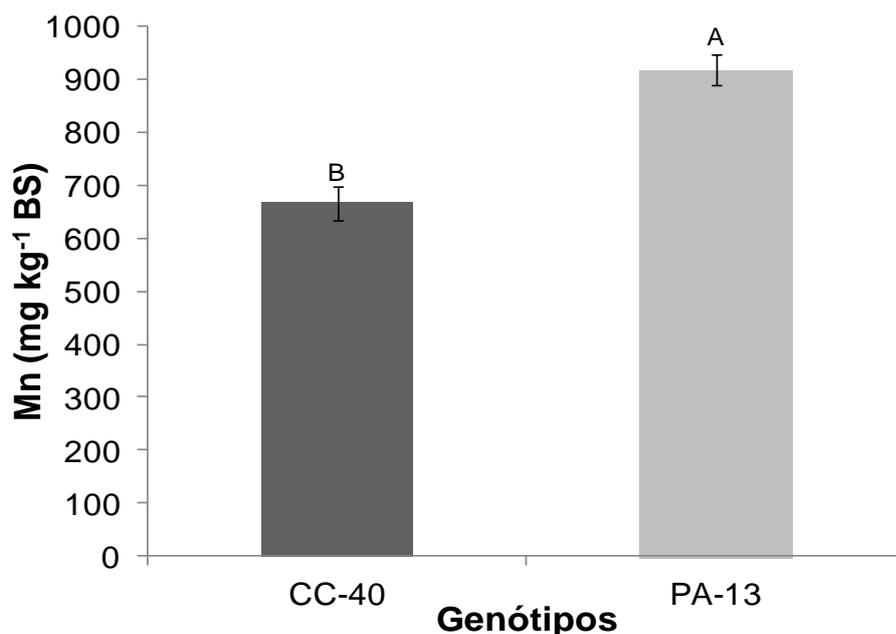
**Figura 14** – Teor de potássio (K) foliar em função de doses de K no solo em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= -0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos teores de K foliar entre as doses de K aplicadas no solo [10 mg dm<sup>-3</sup> 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>], pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

Independentemente de genótipo, não foram observados efeitos significativos ( $p < 0,05$ ), pelo teste F, nos teores dos micronutrientes Cu, Fe e Zn, e nem para o elemento benéfico Na, para dose e classe e para as interações entre esses fatores. Entretanto, verificou-se efeito intergenotípico significativo ( $p < 0,01$ ), pelo teste F, em relação ao teor de Mn (Tabela 10).

**Tabela 10** – Probabilidade de F (ANOVA) para teores de micronutrientes minerais na folha, mais o elemento sódio (Na), em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,01). (ns) tratamentos não apresentam diferença significativa pelo teste de F (p<0,05).

FV	GL	Mn	Cu	Fe	Zn	Na
Genótipo (G)	1	0,0000**	0,2850 <sup>ns</sup>	0,2046 <sup>ns</sup>	0,8071 <sup>ns</sup>	0,4022 <sup>ns</sup>
Dose (D)	2	0,8858 <sup>ns</sup>	0,9632 <sup>ns</sup>	0,9861 <sup>ns</sup>	0,5430 <sup>ns</sup>	0,5221 <sup>ns</sup>
Classe (C)	3	0,3043 <sup>ns</sup>	0,1392 <sup>ns</sup>	0,3480 <sup>ns</sup>	0,0699 <sup>ns</sup>	0,1204 <sup>ns</sup>
G x D	2	0,2590 <sup>ns</sup>	0,0520 <sup>ns</sup>	0,1140 <sup>ns</sup>	0,9790 <sup>ns</sup>	0,1191 <sup>ns</sup>
G x C	3	0,0755 <sup>ns</sup>	0,3055 <sup>ns</sup>	0,4305 <sup>ns</sup>	0,6733 <sup>ns</sup>	0,1080 <sup>ns</sup>
D x C	6	0,8535 <sup>ns</sup>	0,2938 <sup>ns</sup>	0,4263 <sup>ns</sup>	0,4024 <sup>ns</sup>	0,7245 <sup>ns</sup>
G x D x C	6	0,7216 <sup>ns</sup>	0,0511 <sup>ns</sup>	0,2175 <sup>ns</sup>	0,3129 <sup>ns</sup>	0,3600 <sup>ns</sup>
Erro	96					
Total	119					
cv (%)		30,23	24,90	23,50	28,35	40,53

Verificou-se que o genótipo PA-13 apresentou um maior teor de Mn (917,8 mg kg<sup>-1</sup> BS) nos tecidos foliares, quando comparado com o seu contrastante CC-40, cujo teor foliar foi de 666,1 mg kg<sup>-1</sup> BS, uma variação de cerca de 37,8 % entre os dois genótipos de *T. cacao* (Figura 15).



**Figura 15** – Teor de manganês (Mn) nas folhas de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

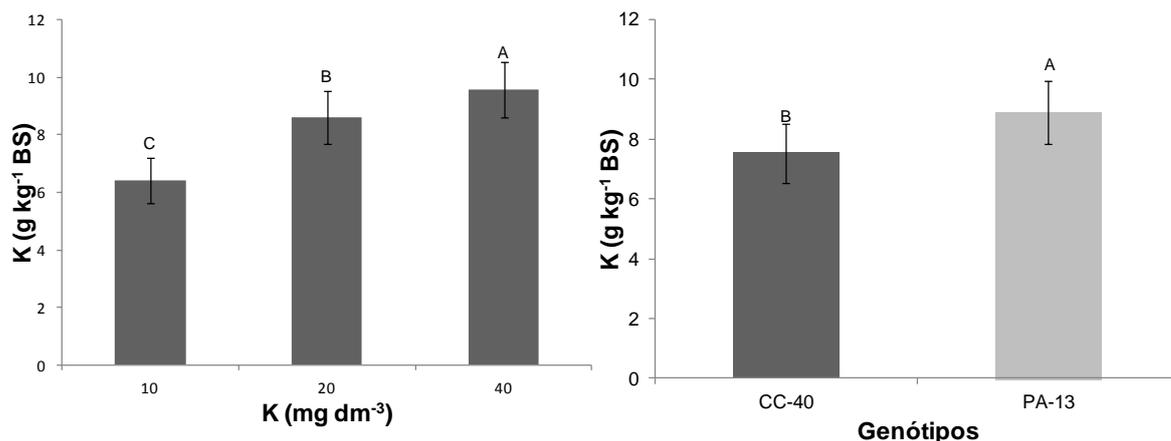
#### 4.2.2. Macro e micronutrientes minerais na raiz

Baseado nos níveis de significância para os macro e micronutrientes minerais na raiz (Tabela 11), verificou-se que não houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste F para os nutrientes N, P e Mg. Observou-se diferença significativa ( $p < 0,05$ ), pelo teste F, apenas para os teores de K, quando se comparou genótipo e dose. O mesmo fato se verificou também para o teor de Ca, cuja significância foi a 1% de probabilidade pelo teste F.

**Tabela 11** – Probabilidade de F (ANOVA) para teores de macronutrientes minerais na raiz de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,01). (ns) tratamentos não apresentam diferença significativa pelo teste de F (p<0,05).

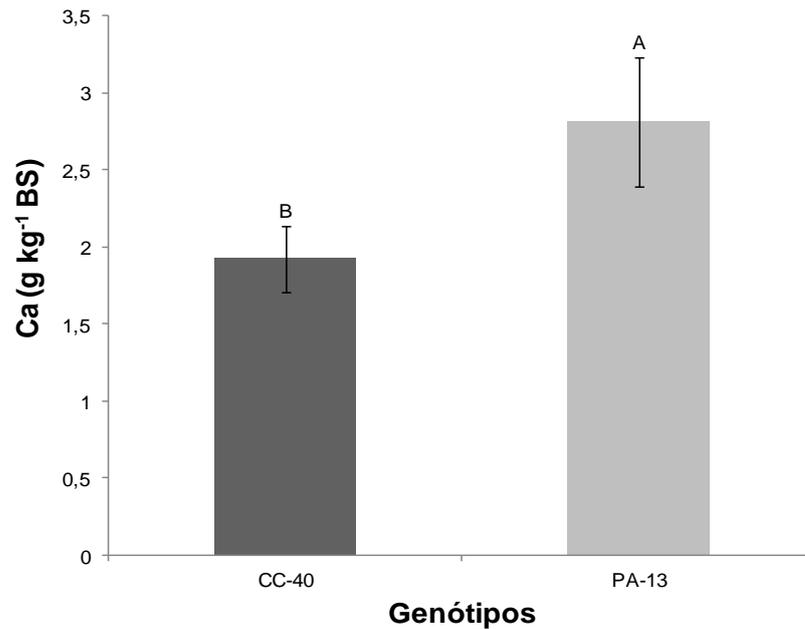
FV	GL	N	P	K	Ca	Mg
Genótipo (G)	1	0,7002 <sup>ns</sup>	0,2933 <sup>ns</sup>	0,0001 <sup>**</sup>	0,0000 <sup>**</sup>	0,5555 <sup>ns</sup>
Dose (D)	2	0,2267 <sup>ns</sup>	0,3563 <sup>ns</sup>	0,0000 <sup>**</sup>	0,0682 <sup>ns</sup>	0,0898 <sup>ns</sup>
Classe (C)	3	0,0620 <sup>ns</sup>	0,8980 <sup>ns</sup>	0,0510 <sup>ns</sup>	0,7634 <sup>ns</sup>	0,5623 <sup>ns</sup>
G x D	2	0,1343 <sup>ns</sup>	0,6343 <sup>ns</sup>	0,4107 <sup>ns</sup>	0,7890 <sup>ns</sup>	0,8608 <sup>ns</sup>
G x C	3	0,9192 <sup>ns</sup>	0,7576 <sup>ns</sup>	0,4789 <sup>ns</sup>	0,9731 <sup>ns</sup>	0,6737 <sup>ns</sup>
D x C	6	0,8367 <sup>ns</sup>	0,5668 <sup>ns</sup>	0,2963 <sup>ns</sup>	0,2713 <sup>ns</sup>	0,8634 <sup>ns</sup>
G x D x C	6	0,7812 <sup>ns</sup>	0,3375 <sup>ns</sup>	0,8158 <sup>ns</sup>	0,7326 <sup>ns</sup>	0,2182 <sup>ns</sup>
Erro	96					
Total	119					
cv (%)		20,20	51,66	22,64	32,10	32,06

Houve diferenças intergenotípicas significativas (p<0,05) para as doses de K aplicadas no solo e os teores de K radicular (Figura 16 **A** e **B**). Ao contrário do teor de K foliar, o genótipo CC-40 apresentou valores inferiores de K na raiz, quando comparado ao genótipo PA-13 (Figura 16 **A**). Para o genótipo CC-40, o teor de K radicular foi de 7,5 g kg<sup>-1</sup> BS, ao passo que para o PA-13 o teor foi de 8,9 g kg<sup>-1</sup> BS. O aumento das doses de K aplicadas no solo proporcionou um incremento dos teores de K na raiz, cujos valores foram de 6,4; 8,6 e 9,6 g kg<sup>-1</sup> BS, para as doses correspondentes a 10; 20 e 40 mg K kg<sup>-1</sup> solo, respectivamente (Figura 16 **B**).



**Figura 16** – Teor de potássio (K) na raiz de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo (**A**). Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Teor de K na raiz (**B**), em função de doses de K aplicadas no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>]. Letras maiúsculas comparam as médias dos teores de K na raiz entre as doses de K aplicadas no solo, pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições

Observou-se, também, diferença intergenotípica para o teor de Ca na biomassa seca de raiz (Figura 17). Verificou-se, que o genótipo PA-13 apresentou um maior teor de Ca (2,8 g kg<sup>-1</sup> BS) na raiz, em relação ao CC-40, cujo teor foi de 2,0 g kg<sup>-1</sup> BS.



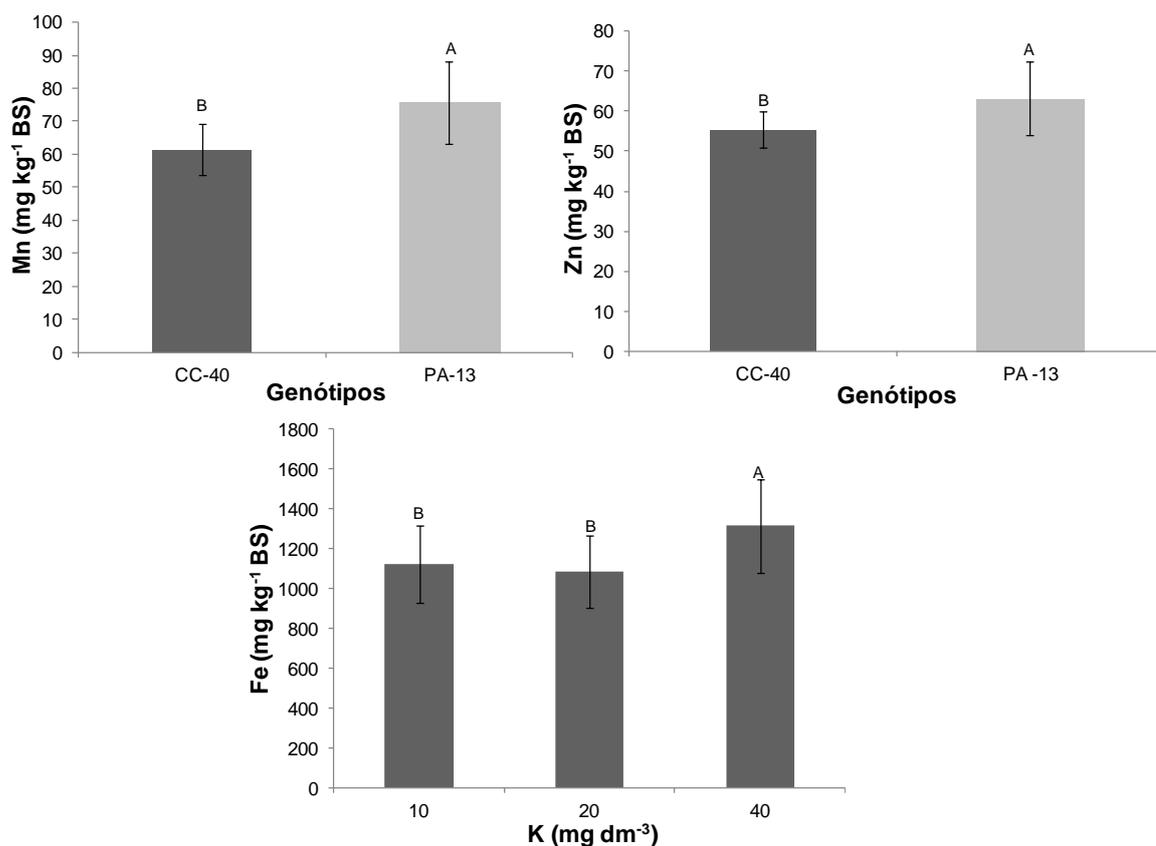
**Figura 17** – Teor de cálcio (Ca) na raiz de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

Os níveis de significância para os teores de micronutrientes minerais na raiz (Tabela 12) mostraram, pelo teste F, que os elementos que tiveram os seus teores influenciados pelas fontes de variação foram Mn ( $p < 0,01$ ), Fe ( $p < 0,05$ ) e Zn ( $p < 0,01$ ), ao passo que Cu e Na não apresentaram diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) pelo teste F.

**Tabela 12** – Probabilidade de F (ANOVA) para teores de micronutrientes minerais na raiz, mais o elemento sódio, em dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F ( $p < 0,05$ ). (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F ( $p < 0,01$ ). (ns) tratamentos não apresentam diferença pelo teste F ( $p < 0,05$ ).

FV	GL	Mn	Cu	Fe	Zn	Na
Genótipo (G)	1	0,0013**	0,3949 <sup>ns</sup>	0,5706 <sup>ns</sup>	0,0098**	0,3082 <sup>ns</sup>
Dose (D)	2	0,2805 <sup>ns</sup>	0,1370 <sup>ns</sup>	0,0421*	0,0640 <sup>ns</sup>	0,1724 <sup>ns</sup>
Classe (C)	3	0,3173 <sup>ns</sup>	0,7558 <sup>ns</sup>	0,5486 <sup>ns</sup>	0,0606 <sup>ns</sup>	0,1806 <sup>ns</sup>
G x D	2	0,2653 <sup>ns</sup>	0,6639 <sup>ns</sup>	0,0512 <sup>ns</sup>	0,3025 <sup>ns</sup>	0,8816 <sup>ns</sup>
G x C	3	0,7940 <sup>ns</sup>	0,9951 <sup>ns</sup>	0,0611 <sup>ns</sup>	0,7084 <sup>ns</sup>	0,0676 <sup>ns</sup>
D x C	6	0,3410 <sup>ns</sup>	0,9513 <sup>ns</sup>	0,2994 <sup>ns</sup>	0,6932 <sup>ns</sup>	0,5079 <sup>ns</sup>
G x D x C	6	0,9429 <sup>ns</sup>	0,0989 <sup>ns</sup>	0,5252 <sup>ns</sup>	0,9262 <sup>ns</sup>	0,1118 <sup>ns</sup>
Erro	96					
Total	119					
cv (%)		34,44	41,77	36,80	27,26	35,72

Observou-se que o genótipo PA-13 apresentou os maiores teores de Mn e Zn nos tecidos radiculares, cujos valores foram de 75,7 mg kg<sup>-1</sup> BS e 63,1 mg kg<sup>-1</sup> BS, respectivamente, quando comparado ao genótipo CC-40, que apresentou valores de 61,4 mg kg<sup>-1</sup> BS e 55,4 mg kg<sup>-1</sup> BS, respectivamente (Figura 18 **A** e **B**). Em contrapartida, o teor de Fe na raiz apresentou um aumento na maior dose de K aplicada ao solo (40 mg dm<sup>-3</sup>) (Figura 18 **C**), cujo teor foi de 1314,1 mg kg<sup>-1</sup> BS.



**Figura 18** - Teores de manganês (Mn) (A), zinco (Zn) (B) e Fe (C) em raiz de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

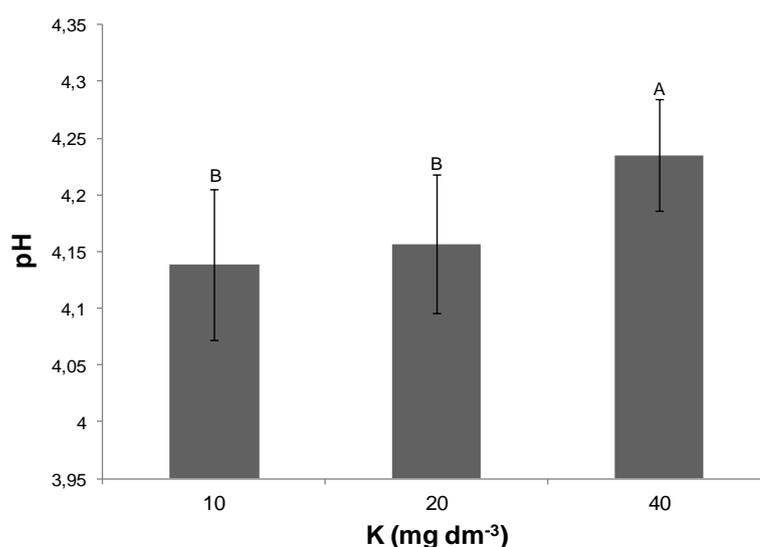
#### 4.2.3. Macro e micronutrientes minerais no solo

Ao observar os níveis de significância da variância (Tabela 13), verificou-se que a variável pH foi influenciada significativamente ( $p < 0,05$ ) pelo efeito de doses de K aplicadas ao solo. Este elemento metálico aplicado ao solo sofreu influência de genótipos, doses e classes, ao passo que o teor de Ca no solo foi influenciado pelos genótipos CC-40 e PA-13 e o teor de Al<sup>3+</sup> sofreu influência de doses de K aplicadas ao solo, a 1% de significância pelo teste F.

**Tabela 13** – Probabilidade de F (ANOVA) para teores de macronutrientes minerais e de  $Al^{3+}$  no solo e pH do solo cultivado com dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= - 0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg  $dm^{-3}$ , 20 mg  $dm^{-3}$  (controle) e 40 mg  $dm^{-3}$ ] aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F ( $p < 0,05$ ). (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F ( $p < 0,01$ ). (ns) tratamentos não apresentam diferença significativa pelo teste F ( $p < 0,05$ ).

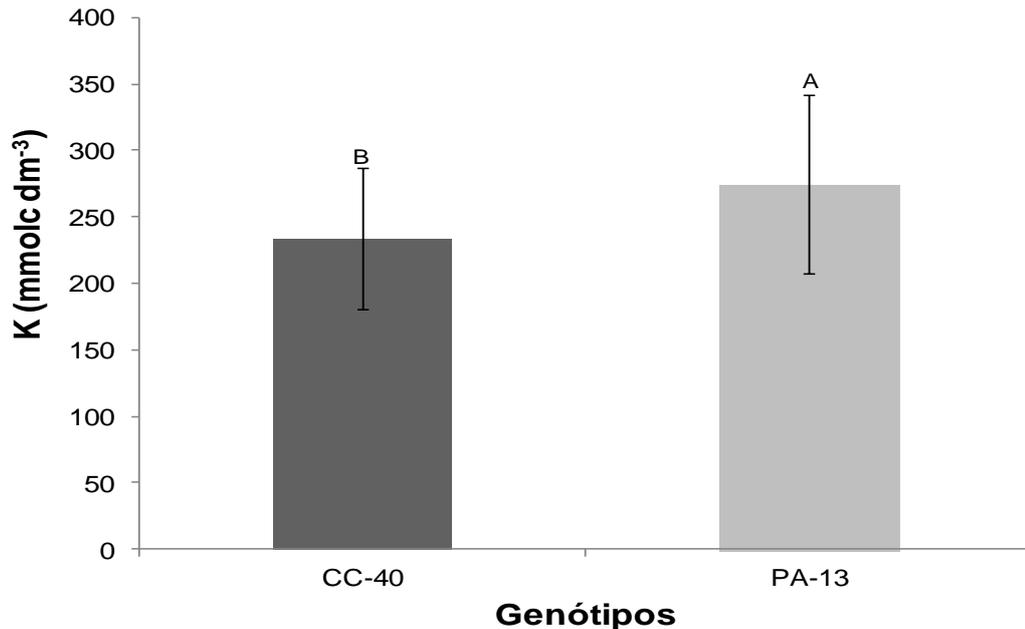
FV	GL	pH	P	K	Ca	Mg	$Al^{3+}$
Genótipo (G)	1	0,1756 <sup>ns</sup>	0,9209 <sup>ns</sup>	0,0007 <sup>**</sup>	0,0003 <sup>**</sup>	0,2682 <sup>ns</sup>	0,0638 <sup>ns</sup>
Dose (D)	2	0,0031 <sup>**</sup>	0,3969 <sup>ns</sup>	0,0000 <sup>**</sup>	0,9890 <sup>ns</sup>	0,1504 <sup>ns</sup>	0,0000 <sup>**</sup>
Classe (C)	3	0,1077 <sup>ns</sup>	0,1711 <sup>ns</sup>	0,0016 <sup>**</sup>	0,4455 <sup>ns</sup>	0,0512 <sup>ns</sup>	0,2503 <sup>ns</sup>
G x D	2	0,9775 <sup>ns</sup>	0,6168 <sup>ns</sup>	0,0512 <sup>ns</sup>	0,2198 <sup>ns</sup>	0,4758 <sup>ns</sup>	0,1385 <sup>ns</sup>
G x C	3	0,0546 <sup>ns</sup>	0,2009 <sup>ns</sup>	0,9902 <sup>ns</sup>	0,7719 <sup>ns</sup>	0,7646 <sup>ns</sup>	0,2478 <sup>ns</sup>
D x C	6	0,4516 <sup>ns</sup>	0,2946 <sup>ns</sup>	0,0510 <sup>ns</sup>	0,8006 <sup>ns</sup>	0,4567 <sup>ns</sup>	0,7913 <sup>ns</sup>
G x D x C	6	0,9424 <sup>ns</sup>	0,9361 <sup>ns</sup>	0,9653 <sup>ns</sup>	0,5510 <sup>ns</sup>	0,6867 <sup>ns</sup>	0,2137 <sup>ns</sup>
Erro	96						
Total	119						
cv (%)		3,14	20,91	25,14	47,49	37,83	28,38

Houve variação de pH no solo apenas para a maior dose de K aplicada (40 mg  $dm^{-3}$  solo), cujo valor apresentado foi de 4,2. As demais doses de K aplicadas ao solo não promoveram alterações significativas ( $p < 0,01$ ) no pH do solo (Figura 19).



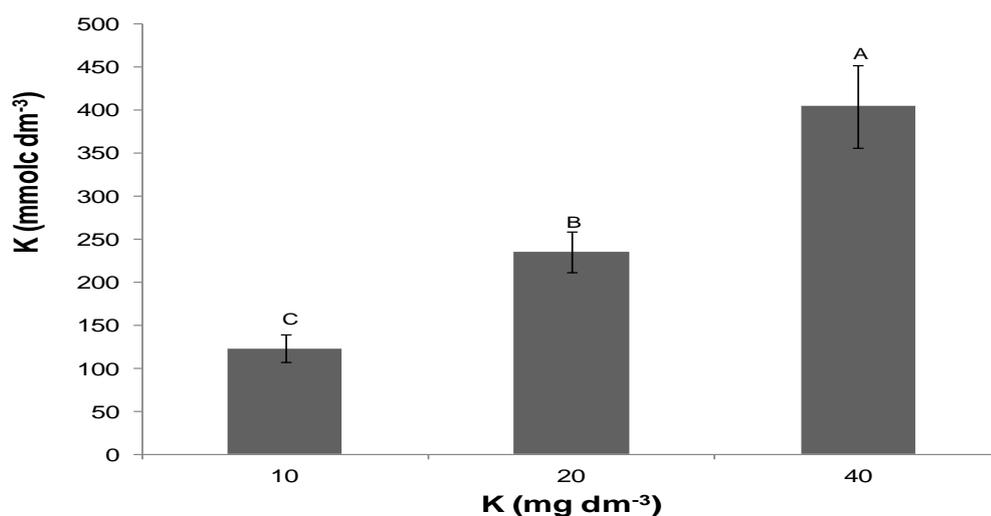
**Figura 19** - Valores de pH do solo em função das doses de potássio (K) [10 mg  $dm^{-3}$ , 20 mg  $dm^{-3}$  (controle) e 40 mg  $dm^{-3}$ ] aplicadas no solo. Letras maiúsculas comparam as médias das doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

Ao avaliar o teor de K no solo em função de genótipos, verificou-se a existência de diferença intragenotípica significativa ( $p < 0,05$ ) para o teor de K no solo. No solo cultivado com o genótipo PA-13, houve um maior acúmulo de K ( $278,5 \text{ mmolc dm}^{-3}$ ) em relação ao mesmo solo cultivado com genótipo CC-40, cujo teor de K foi de  $231,5 \text{ mmolc dm}^{-3}$  solo (Figura 20).



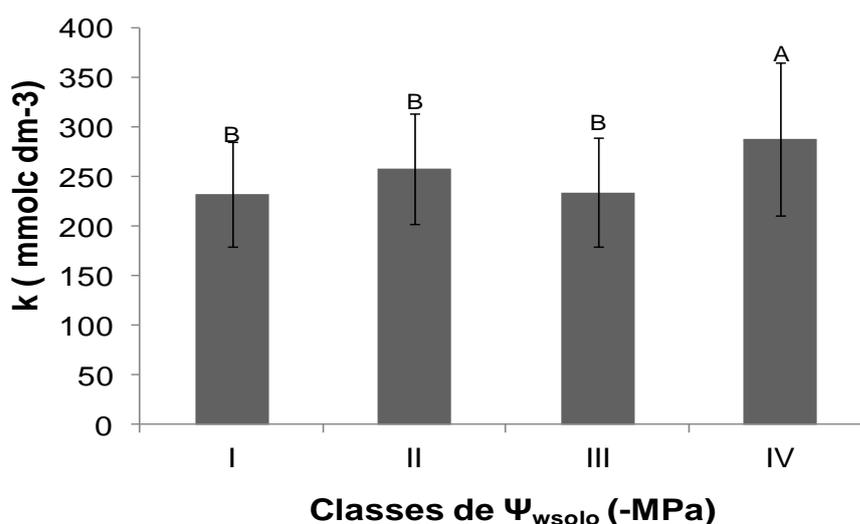
**Figura 20** – Teor de potássio (K) no solo cultivado com dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [ $10 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  (controle) e  $40 \text{ mg dm}^{-3}$ ] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

Os teores de K no solo variaram significativamente ( $p < 0,05$ ) conforme a dose aplicada. Na menor dose de K aplicada ( $10 \text{ mg dm}^{-3}$  solo), o teor médio de K residual no solo, ao final do experimento, foi de  $122,8 \text{ mmolc dm}^{-3}$ , ao passo que nas doses de 20 e  $40 \text{ mg dm}^{-3}$  solo, os teores médios de K residuais no solo foram de 234,9 e  $404,2 \text{ mmolc dm}^{-3}$ , respectivamente (Figura 21).



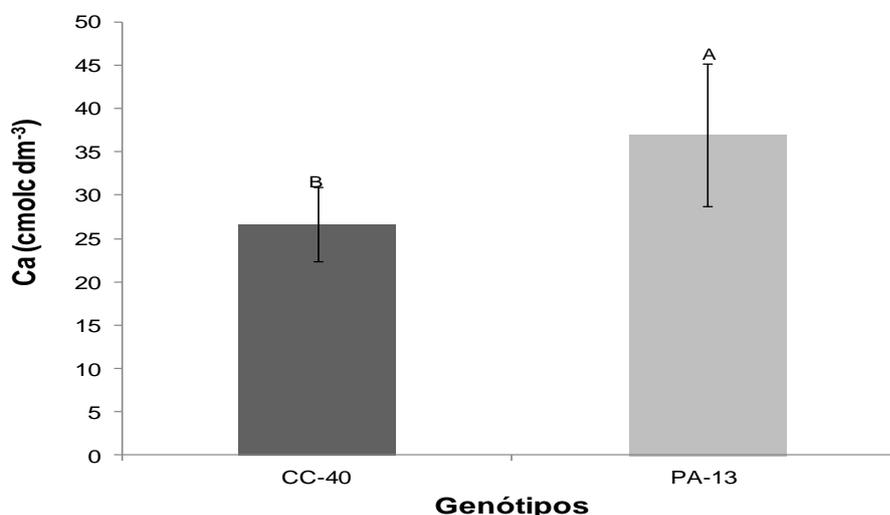
**Figura 21** – Teor de potássio (K) no solo em função de doses de K aplicadas no solo [10 mg dm<sup>-3</sup> 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias das doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

Houve, também, um aumento no teor de K no solo na classe que apresentou os valores mais negativos de  $\Psi_{\text{wsolo}}$  (classe IV), em relação às demais classes. Ao comparar o teor de K da classe IV com as classes I, II e III, verifica-se que houve um incremento de no teor de K no solo de 22%, 12% e 21 %, respectivamente (Figura 22).



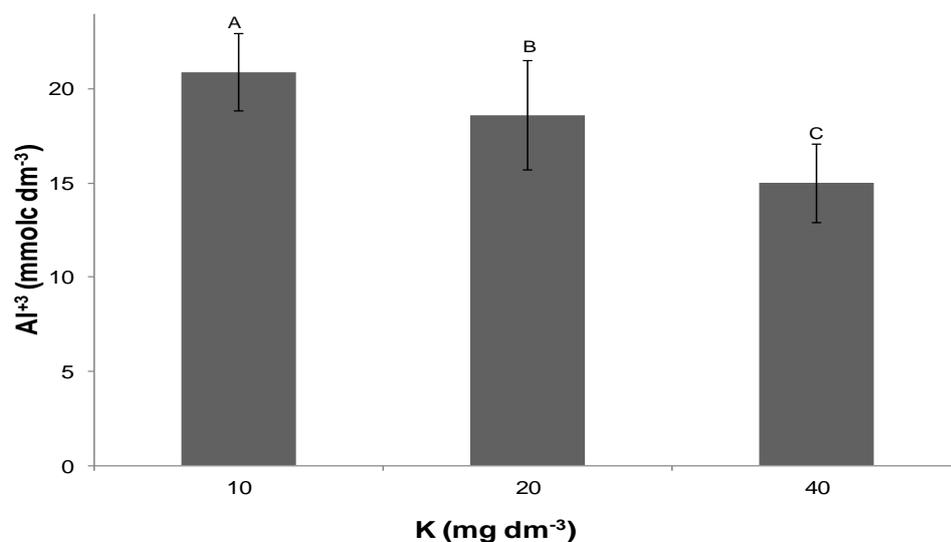
**Figura 22** – Teor de potássio (K) no solo em função das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias das doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

Verificou-se que o teor de Ca no solo foi significativo pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ) para o genótipo PA-13, em relação ao genótipo CC-40 (Figura 23).



**Figura 23** – Teor de cálcio (Ca) no solo em função de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= -0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias das doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

Observou-se um aumento significativo ( $p < 0,05$ ) do teor de  $Al^{3+}$  no solo, em função das doses de K, na dose correspondente a 10 mg K dm<sup>-3</sup> solo, cujo valor foi de 20,9 mmolc  $Al^{3+}$  dm<sup>-3</sup> solo; seguido pela dose controle (20 mg K dm<sup>-3</sup> solo), com um teor de 18,6 mmolc  $Al^{3+}$  dm<sup>-3</sup>; e pela dose 40 mg K dm<sup>-3</sup> solo, com um teor de 15,1 mmolc  $Al^{3+}$  dm<sup>-3</sup> (Figura 24).



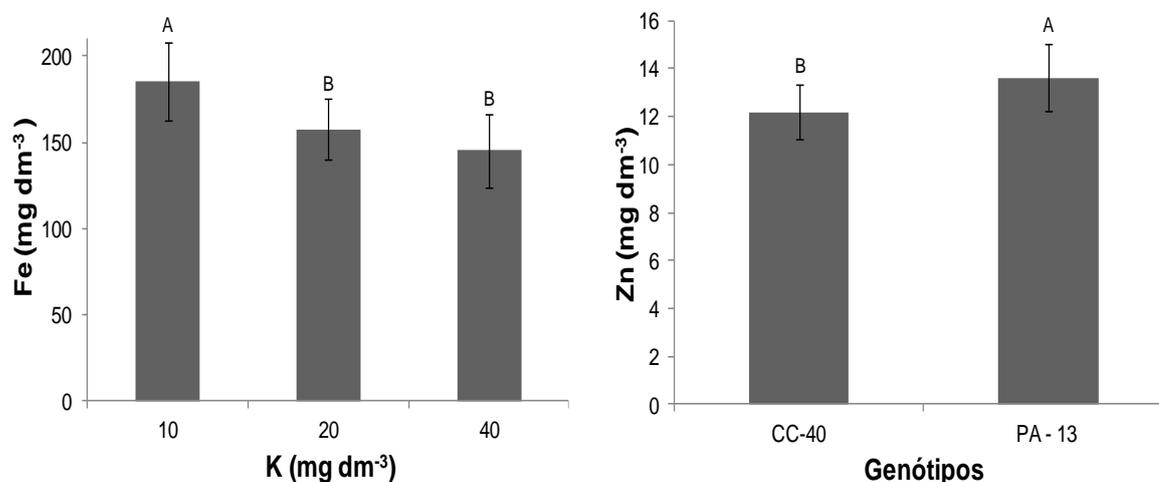
**Figura 24** – Teor de alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) no solo em função das doses de K aplicadas no solo [ $10 \text{ mg dm}^{-3}$   $20 \text{ mg dm}^{-3}$  (controle)  $40 \text{ mg dm}^{-3}$ ] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias das doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm \text{EP}$ ). Valores médios de 5 repetições.

Ao avaliar os níveis de significância da variância para os teores de micronutrientes no solo, observou-se que apenas os elementos Fe e Zn tiveram os seus valores variando em função de doses e de genótipos, respectivamente, a 1% significância pelo teste F (Tabela 14).

**Tabela 14** – Probabilidade de F (ANOVA) para teores de micronutrientes minerais no solo, mais o elemento sódio, cultivado com dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos do solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= - 0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. (\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste F (p<0,05). (\*\*) tratamentos apresentam diferença significativa pelo teste de F (p<0,01). (ns) tratamentos não apresentam diferença significativa pelo teste F(p<0,05).

FV	GL	Mn	Cu	Fe	Zn	Na
Genótipo (G)	1	0,1482 <sup>ns</sup>	0,9197 <sup>ns</sup>	0,3665 <sup>ns</sup>	0,0069 <sup>**</sup>	0,8075 <sup>ns</sup>
Dose (D)	2	0,6081 <sup>ns</sup>	0,8477 <sup>ns</sup>	0,0005 <sup>**</sup>	0,9625 <sup>ns</sup>	0,3923 <sup>ns</sup>
Classe (C)	3	0,7735 <sup>ns</sup>	0,0657 <sup>ns</sup>	0,1242 <sup>ns</sup>	0,0324 <sup>ns</sup>	0,7387 <sup>ns</sup>
G x D	2	0,4192 <sup>ns</sup>	0,6565 <sup>ns</sup>	0,1641 <sup>ns</sup>	0,9730 <sup>ns</sup>	0,9869 <sup>ns</sup>
G x C	3	0,6328 <sup>ns</sup>	0,2189 <sup>ns</sup>	0,5442 <sup>ns</sup>	0,8459 <sup>ns</sup>	0,2062 <sup>ns</sup>
D x C	6	0,9032 <sup>ns</sup>	0,1828 <sup>ns</sup>	0,3489 <sup>ns</sup>	0,5223 <sup>ns</sup>	0,7289 <sup>ns</sup>
G x D x C	6	0,5805 <sup>ns</sup>	0,4874 <sup>ns</sup>	0,5072 <sup>ns</sup>	0,4303 <sup>ns</sup>	0,6929 <sup>ns</sup>
Erro	96					
Total	119					
cv (%)		35,47	23,78	28,06	22,00	106,80

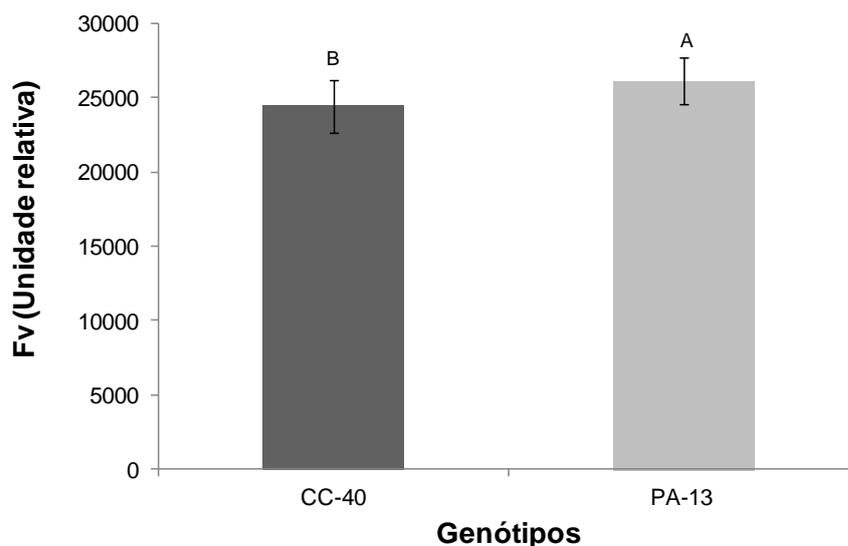
Verificou-se que o maior teor de Fe no solo foi encontrado na dose correspondente a 10 mg K dm<sup>-3</sup> solo, cujo valor foi de 186,4 mg dm<sup>-3</sup> solo, enquanto que nas doses de 20 e 40 mg K dm<sup>-3</sup> solo os teores foram de 157,7 e 145,1 mg Fe dm<sup>-3</sup> solo, respectivamente (Figura 25 **A**). Por outro lado, o teor de Zn variou discretamente entre os genótipos, sendo que o genótipo PA-13 apresentou um aumento significativo (p<0,05) de 5,6% em relação ao genótipo CC-40 (Figura 25 **B**).



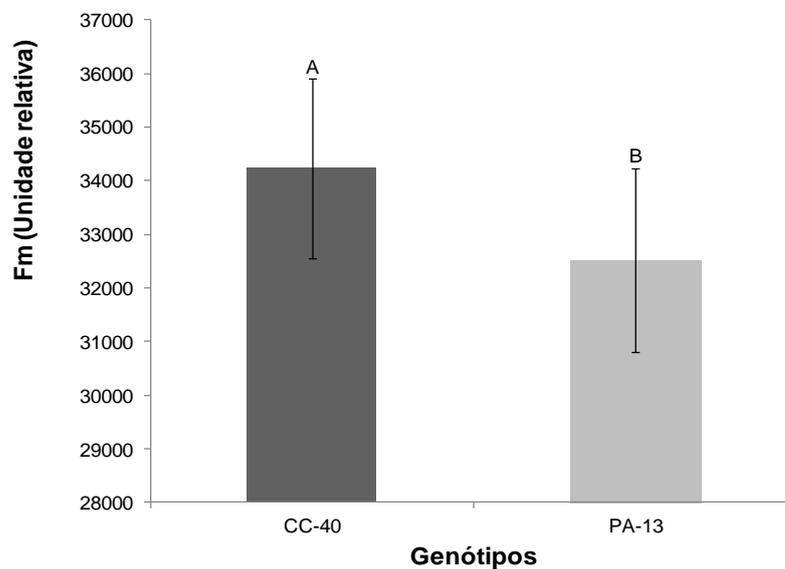
**Figura 25** – Teores de ferro (Fe) no solo (A) em função de doses de potássio (K) aplicadas no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Teor de zinco (Zn) no solo (B) cultivado com dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{wsolo}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos teores de Zn entre os genótipos, pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

#### 4.3. Emissão de fluorescência

Para os parâmetros de fluorescências variável ( $F_v$ ) e máxima ( $F_m$ ), as diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) foram apenas intergenotípicas. Verificou-se que o valor de  $F_v$  foi maior para o genótipo PA-13, em relação ao genótipo CC-40, cujo aumento foi de apenas 3,3%. O valor de  $F_v$  apresentado pelo genótipo PA-13 foi de 26129 (unidade relativa), enquanto que o do genótipo CC-40 foi de 24443 (unidade relativa) (Figura 26). Em contrapartida, o genótipo CC-40 apresentou um valor de  $F_m$  superior ao do genótipo PA-13, cujos valores foram de 34231 (unidade relativa) e 32516 (unidade relativa), respectivamente (Figura 27).

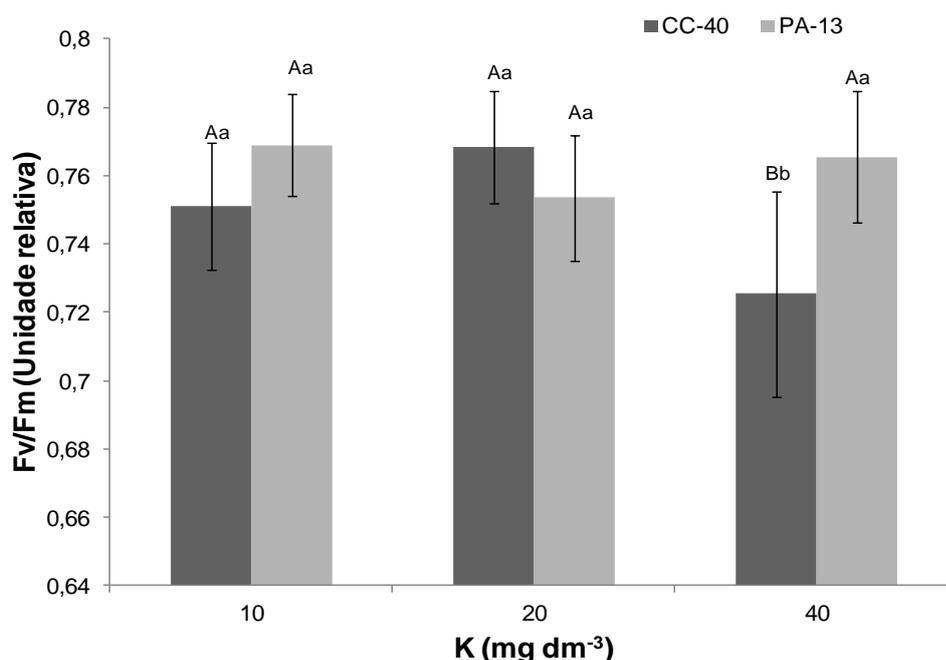


**Figura 26** – Fluorescência variável ( $F_v$ ) em nível foliar de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam os genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.



**Figura 27** – Fluorescência máxima ( $F_m$ ) em nível foliar de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= - 0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg dm<sup>-3</sup>, 20 mg dm<sup>-3</sup> (controle) e 40 mg dm<sup>-3</sup>] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam os genótipos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

Houve interação significativa ( $p < 0,05$ ) entre genótipo e dose de K aplicada no solo para o rendimento quântico máximo de PS2 ( $F_v/F_m$ ). Houve diferença intergenotípica significativa ( $p < 0,05$ ) apenas na dose correspondente a 40 mg K  $\text{dm}^{-3}$  solo (Figura 28). O genótipo CC-40 apresentou um valor de  $F_v/F_m$  de 0,72, enquanto que para o PA-13 o valor foi de 0,76, uma diferença de 2,7%.



**Figura 28** – Rendimento quântico potencial máximo do fotossistema 2 (PS2) ( $F_v/F_m$ ) em nível foliar de dois genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13) submetidos a quatro classes das classes de potenciais hídricos no solo ( $\Psi_{\text{wsolo}}$ ) (I= -0,01 a -0,03 MPa; II= -0,04 a -0,07 MPa; III= -0,11 a -0,19 MPa; IV= -0,25 a -0,51 MPa) e a três doses de potássio no solo [10 mg  $\text{dm}^{-3}$ , 20 mg  $\text{dm}^{-3}$  (controle) e 40 mg  $\text{dm}^{-3}$ ] aos 180 dias de cultivo. Letras maiúsculas comparam as médias dos genótipos em cada dose. Letras minúsculas comparam as médias de um mesmo genótipo nas diferentes doses pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Cada barra representa o erro padrão da média ( $\pm$  EP). Valores médios de 5 repetições.

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1. Respostas das trocas gasosas foliares de genótipos de cacau ao déficit hídrico no solo e às doses de potássio

As curvas de dispersão das classes de umidade e  $\Psi_{\text{wsolo}}$  para os dois genótipos (Figura 4) foram bem similares, mostrando que houve um controle dos potenciais hídricos do solo em cada classe. A dispersão das classes de  $\Psi_{\text{wsolo}}$ , para os dois genótipos de *T. cacao* avaliados, apresentando a variação de  $A$  em função de  $g_s$  (Figura 5), demonstrou que o genótipo PA-13 não apresentou uma clara diferenciação entre as classes de  $\Psi_{\text{wsolo}}$ , ao contrário do genótipo CC-40, o que indica a capacidade do genótipo PA-13 de manter os valores de  $A$  e  $g_s$  mais concentrados, sem distinção nas diferentes classes de  $\Psi_{\text{wsolo}}$ . Em condições de déficit hídrico as plantas normalmente apresentam um decréscimo paralelo de  $A$  e  $g_s$  (NI e PALLARDY, 1992). Um rápido fechamento estomático pode estar associado a uma rápida adaptação das plantas ao estresse hídrico (MENCUCCINI et al., 2000). Em trabalho realizado por Roza (2010) (dados não publicados) para *Jatropha curcas* L., a sensibilidade de  $g_s$  demonstrada frente a pequenas reduções da disponibilidade hídrica no substrato indicam uma forte regulação estomática permitindo à planta menor transpiração controlando a perda de água e diminuindo os possíveis danos a planta, apesar da redução da assimilação de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ).

Os valores de  $g_s$  apresentados na figura 6 A para o genótipo CC-40 estão de acordo com Nobel (1991), que afirmou que plantas lenhosas comumente apresentam valores de  $g_s$  nesta mesma faixa, quando os estômatos encontram-

se abertos. Esse valores também estão de acordo com os encontrados por Santana (2012) (dados não publicados) para *J. curcas*. Entretanto o genótipo PA-13 figura 6 **B** apresentou valores de  $g_s$  muito abaixo dos encontrados para o genótipo CC-40 porém, estes valores estão de acordo com os encontrados por Sapeta et al., (2013) para *J. curcas* em dois cultivares submetidos ao  $\Psi_{wsolo}$  por 28 dias e por LASSOUANE et al. (2013) em plântulas de *Acacia arabica*.

Verificou-se que o genótipo PA-13 conseguiu manter de forma linear e crescente o comportamento de  $g_s$  em função de  $E$ , não apresentando distinção entre as classes, o que demonstra que esse genótipo possui mecanismos de controle de abertura e fechamento de estômatos que permitem a regulação de sua transpiração em condições de baixos potenciais hídricos no solo, passível de permitir uma elevada taxa fotossintética (Figura 7). De acordo Sasaki e Machado (1999), normalmente  $g_s$  decresce rapidamente com queda drástica da umidade do solo, pois a abertura estomática responde mais rapidamente à variação do conteúdo de água no solo do que no potencial hídrico foliar.

Verificou-se que os valores de  $g_s$  reduziram significativamente a partir da dose controle de K aplicada no solo ( $20 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e manteve o mesmo valor na dose correspondente a  $40 \text{ mg dm}^{-3}$  (Figura 9 **A**). Os valores de  $g_s$  observados no presente trabalho estão próximos aos encontrados por Gattward *et al.* (2012), que utilizou duas doses de K no solo ( $2,5 \text{ mmolc dm}^3$  e  $4 \text{ mmolc dm}^3$ ), substituídas gradualmente por Na, e por Gama-Rodrigues *et al.* (1989). A diminuição nos valores de  $g_s$  pode restringir a taxa de fixação de  $\text{CO}_2$ , com a consequente diminuição de sua concentração nas cavidades subestomáticas e nos espaços intercelulares (DALEY *et al.*, 1989). O acúmulo e a liberação de K pelas células-guarda dos estômatos levam a mudanças em seu turgor, resultando na abertura e fechamento estomático (TAIZ e ZEIGER, 2009). Em plantas estressadas, o aumento nos níveis de ácido abscísico (ABA) é conhecido por estimular a liberação de K a partir de células-guarda, dando origem ao fechamento dos estômatos (ASSMANN e SHIMAZAKI, 1999).

Houve diminuição de  $g_s$  para o genótipo CC-40 da classe I (- 0,01 a -0,03 MPa) para a classe II (- 0,04 a - 0,07 MPa), onde, a partir daí, evidenciou-se um processo de aclimação deste genótipo, que se estendeu até a última classe de  $\Psi_{wsolo}$ . Em contrapartida, o genótipo PA-13 conseguiu manter constante o valor de

$g_s$  da classe I (- 0,01 a -0,03 MPa) até a classe mais negativa de  $\Psi_{wsolo}$  [classe IV (-0,25 a 0,5 MPa)] (Figura 9 B). Esses dados demonstraram que o genótipo PA-13 possui uma estratégia eficaz de resposta ao estresse hídrico no solo, uma vez que  $g_s$  permaneceu constante nas diferentes classes de  $\Psi_{wsolo}$ , uma característica intrínseca de adaptação desse genótipo. Segundo Balasimha et al. (2013), alguns genótipos de *T. cacao* conseguem manter altos valores de  $g_s$  mesmo sob condições de deficiência hídrica no solo, mostrando que são relativamente menos afetados. O fechamento estomático é a primeira resposta da planta ao déficit hídrico no solo e, ao mesmo tempo, a limitação dominante para a fotossíntese em estresse leve a moderado (FLEXA; MEDRANO, 2002). Um déficit hídrico imposto lentamente às plantas pode causar pouca alteração em  $g_s$ , enquanto que um déficit hídrico imposto rapidamente pode causar grandes reduções em  $g_s$  (LAWLOR; TEZARA, 2009).

Pôde-se observar, no presente trabalho, que o genótipo PA-13, considerado mais torante ao déficit hídrico no solo em relação ao genótipo CC-40, teve a maior capacidade de manter as trocas gasosas foliares superiores ao do genótipo CC-40 em condições de baixos valores  $\Psi_{wsolo}$  e nas maiores doses de K no solo. Em contrapartida, Gama-Rodrigues et al. (1995), ao avaliarem os efeitos de diferentes fontes potássicas no crescimento e nas trocas gasosas de plântulas de *T. cacao* sob déficit de pressão de vapor d'água do ar, observaram redução nas trocas gasosas foliares com a diminuição de  $\Psi_{wsolo}$  e aumento de doses de K no solo. Segundo estes autores, o uso da fonte cloreto de potássio (KCl) na adubação do solo promoveu diminuição de  $A$ ,  $g_s$  e  $E$ . Por outro lado, Li et al. (2013) trabalhando com três genótipos de *T. cacao* (Amelonado, EET-400 e ICS 95), cultivados no solo por 90 dias sem estresse hídrico, demonstraram que  $A$  não sofreu influência de doses de K no solo. Pier e Berkowitz (1987) observaram aumentos nas taxas fotossintéticas de 66-113% em plantas de (*Triticum aestivum* L. cv Tyler) adubadas com altas doses de K e submetidas ao déficit hídrico por 8 dias em relação as plantas com adubação padrão, indicando que as folhas das plantas cultivadas com elevados níveis de K reverteram parcialmente os efeitos da desidratação na fotossíntese. Segundo Memon et al. (1985), genótipos de *Hordeum vulgare* eficientes na absorção de K apresentam maior valores de  $g_s$  e  $A$ .

Para a razão  $A/gs$ , foram encontradas diferenças intergenotípicas significativas ( $p < 0,05$ ) apenas na dose correspondente a  $10 \text{ mg K dm}^{-3}$  solo, com destaque para o genótipo CC-40 que apresentou um valor de  $A/gs$  de  $108,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$ , ao passo que para o PA-13 o  $gs$  foi de  $87,6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$ . Entretanto, essa diferença significativa desapareceu com o aumento das doses de K aplicadas ao solo, sugerindo que as maiores doses de K no solo podem fazer com que esse genótipo tolerante (PA-13) melhore a sua eficiência no uso de água (Figura 10 A). Diferença entre as doses para um mesmo genótipo foi observada na dose de  $40 \text{ mg K dm}^{-3}$  solo para o genótipo PA-13, com um valor de  $gs$  de  $107,9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$ , mostrando que esta dose proporcionou um valor próximo ao apresentado pelo genótipo CC-40 na menor dose de K aplicada (Figura 10 A).

O genótipo CC-40 apresentou um maior valor de  $A/E$  (Figura 10 B). Isso se deveu ao fato de que esse genótipo também apresentou uma redução nos valores de  $gs$  entre as classes (Figura 9 B), como consequência houve um incremento de  $A/E$ . Entretanto, para o genótipo PA-13, que manteve  $gs$  relativamente constante mesmo em  $\Psi_{\text{wsolo}}$  mais negativos, os valores de  $A/E$  não refletiram o seu desempenho. De acordo com Kozlowski e Pallardy (1997), o fechamento estomático acarreta decréscimos proporcionalmente maiores na transpiração do que na fotossíntese, em face de resistências adicionais associadas à difusão do  $\text{CO}_2$  em relação a da água na folha. A diminuição de  $gs$  não apenas suprime as perdas de água pela transpiração, mas também aumenta a eficiência do uso da água. Em estudos realizados com *T. cacao*, Rehem et al. (2011) verificaram, a partir de análise por espectrofotometria de massas, que plantas do genótipo PA-13, com caráter letal 'Luteus-Pa', apresentaram peptídeos com 100% de similaridade à proteína psbO, cuja menor concentração foi verificada no genótipo mutante, sugerindo que esse genótipo apresenta danos no PS 2. Dessa forma conclui-se que há um prejuízo na fotossíntese e conseqüentemente uma redução tanto da  $A/gs$  quanto do  $A/E$ . Entretanto no mesmo trabalho Santos (2012) (dados não publicados) relata que houve um aumento significativo no número de transcritos do gene da proteína *psbA* na ordem de 36 vezes para o genótipo PA-13 em comparação ao seu controle. No entanto, genes como o *psbA*, que codifica a proteína D1 do centro de reação de PSII, podem ser diferencialmente expressos e

a proteína facilmente danificada em condições de estresse (CHRISTOPHER, 1994; TAIZ; ZEIGER, 2009).

A diminuição da transpiração em função do aumento das classes de  $\Psi_{\text{wso}}_{\text{solo}}$  é devido ao maior fechamento estomático, haja vista que o teor de água no solo vai diminuindo à medida que o potencial vai diminuindo (Figura 11). Rawat et al. (1985), estudando a taxa de transpiração em espécies de *Eucalyptus* mantidas constantemente sob diferentes níveis de umidade no solo, verificaram que as plantas mantidas na capacidade de campo apresentaram elevada transpiração.

## 5.2. Teores dos macro e micronutrientes minerais na folha

O genótipo PA-13, tolerante ao estresse hídrico no solo, acumulou maiores teores de N, Ca e Mg em nível foliar (Figura 12 **A, C e D**) do que o genótipo CC-40. O mesmo fato foi observado por Nguyen-Queyrens e Bouchet-Lannat (2003) para *Pinus pinaste*, cuja acumulação de solutos foi aproximadamente 2,3 vezes maior em linhagens advindas de ambientes secos, quando comparado com as de ambientes úmidos. De acordo com Santos (2012) (dados não publicados), o conteúdo de N, Ca e Mg em vários genótipos de *T. cacao*, incluindo o CC-40, tiveram reduções significativas quando submetidos à deficiência hídrica no solo. Fato semelhante foi observado, em condições de deficiência hídrica no solo, para a espécie arbórea *Fagus sylvatica*, cujas reduções nas concentrações de macro e micronutrientes minerais foram altamente significativas (PEUKE; RENNENBERG, 2011).

De acordo com Tischner (2000), o nitrato, em grande concentração, é depositado no vacúolo celular, onde contribui significativamente para a geração de turgescência. Por outro lado, Ca, absorvido pelas raízes das plantas na forma de cátion ( $\text{Ca}^{2+}$ ), é responsável pela estabilidade e permeabilidade das membranas celulares (MALAVOLTA, 1980). Além disso, o Ca inibe a entrada de K na membrana plasmática das células-guarda, atua na regulação osmótica, ativa canais de ânions e está envolvido no controle das respostas das plantas a condições adversas, como a deficiência hídrica (TUTEJA; SOPORY, 2008b; GEIGER et al., 2009). Acredita-se que o cálcio além da sustentação estrutural, possa atuar coordenando as moléculas de água, fornecendo um rápido acesso

ao substrato para ser transferido aos sítios de manganês e por fim promover a oxidação da água nos complexos de evolução de oxigênio (CEO) (PACE et al., 2012; YAGI e KANEKO, 2001).

Os teores foliares de Ca e Mg (Figura 13 **A** e **B**) foram maiores nas classes mais negativas de  $\Psi_{\text{solo}}$ , devido ao maior acúmulo desses nutrientes na biomassa mais velha, uma vez que em condições de estresse hídrico as plantas não emitem novos tecidos e, conseqüentemente, o teor desses elementos minerais aumentam. Para o cálcio, considerado um elemento pouco móvel na planta, a translocação é mínima dos tecidos mais velhos para os mais novos, principalmente numa condição de deficiência hídrica no solo (Figura 13 **A**). Por outro lado, embora o Mg seja bastante móvel na planta, a deficiência hídrica no solo também interfere na sua translocação dos tecidos mais velhos para os mais novos. Além do mais, Mg é um elemento essencial para a ativação de várias enzimas, incluindo ATPases, proteínas quinases e fosfatases (MAATHUIS, 2009). Segundo Shaul (2002), a estabilidade dos ribossomos e da fotossíntese pode ser afetada pela deficiência de Mg, uma vez que este elemento é o átomo central da molécula de clorofila e participa da agregação dos ribossomos, além de atuar na estabilidade das membranas celulares. Segundo este autor, as reações enzimáticas mais importantes, onde o Mg é indispensável, estão associadas com a transferência de energia e a fosforilação e desfosforilação.

O maior teor foliar de K no genótipo CC-40, menos tolerante ao déficit hídrico no solo, demonstra a necessidade desse genótipo de um maior requerimento desse nutriente mineral nas células dos tecidos foliares para manter maiores valores de  $A$ ,  $g_s$  e  $E$ , e, conseqüentemente, o incremento da assimilação de  $\text{CO}_2$  e do transporte de nutrientes minerais (Figura 12 **B**). Segundo Baligar *et al.* (2001) e Vose (1984), a eficiência do uso de nutrientes minerais é controlada por fatores genéticos e fisiológicos, e modificada pela interação da planta com as variáveis ambientais. O acúmulo de solutos nos primeiros anos de crescimento da planta parece ser um mecanismo de tolerância que reduz as taxas de mortalidade, durante a fase de estabelecimento (ARAQUE et al., 2012).

O acúmulo de K e de outros solutos mantêm as células dos tecidos túrgidas, uma condição que caracteriza o ajuste osmótico (LEVEYS, 1977). Dessa forma, à medida que houve um aumento da dose de K aplicada no solo,

consequentemente se observou um incremento do teor de K nas folhas (Figura 13). Upadhyaya *et al.* (2012), observaram que o acúmulo de K, Ca e Mn em plantas de *Camellia sinenseis* apresentaram respostas positivas no crescimento e no metabolismo antioxidativo, durante o processo de recuperação de deficiência hídrica.

Verificou-se que o genótipo PA-13, tolerante a deficiência hídrica no solo, apresentou um teor bem elevado de Mn, quando comparado ao genótipo CC-40 não tolerante, comprovando a alta demanda nutricional por Mn em genótipos tolerantes ao estresse hídrico (Figura 15). Este elemento metálico desempenha um papel chave no aparato fotossintético, ou seja, atua na síntese de ATP, nas reações da RuBP-carboxilase, na biossíntese de ácidos graxos, lipídeos e proteínas e na oxidação da molécula de água, separando o oxigênio do hidrogênio, associado ao PS2, e contribuindo no transporte de elétrons da água para a molécula de clorofila (LIDON *et al.*, 2004; PFEFFER *et al.*, 1986; HOUTZ; CHENIAE, 1988; NESS; WOOLHOUSE, 1980). O manganês participa da síntese de proteínas, como componente estrutural dos ribossomos e ativador da RNA-polimerase, da fotoxidação da molécula de água, do complexo de evolução do oxigênio e do alongamento celular, além de influenciar no nível do ácido indol acético (AIA) (MARSCHNER, 1986). Além disso, o Mn apresenta papel cofator na atividade da dismutase do superóxido, para proteção das plantas contra as espécies reativas de oxigênio (EROs) e de outras enzimas (HÄNSCH; MENDEL, 2009), contribuindo na tolerância à deficiência hídrica em plantas.

### **5.3. Teores dos macro e micronutrientes minerais na raiz**

O genótipo PA-13, diferentemente do CC-40, acumulou mais K na raiz (Figura 16 **A**). Isto, provavelmente, contribuiu para o aumento na eficiência de absorção de água do sistema radicular do genótipo PA-13. Assim como nas folhas, o teor de K na biomassa seca da raiz também foi aumentado em função do incremento das doses de K aplicadas no solo (Figura 16 **B**). Diferenças no requerimento de K nos tecidos vegetais geralmente são atribuíveis às diferenças nos requisitos de K nos vacúolos e no apoplasto, bem como a capacidade de manter certo nível de K no citosol (FRICKE *et al.*, 1994). As taxas de difusão são

influenciadas pela capacidade de a planta em assimilar K na superfície da raiz e criar um gradiente de difusão a partir do solo em direção à raiz. Segundo alguns autores, existem algumas etapas que são consideradas críticas na seleção de genótipos eficientes na utilização de K como: (i) identificar as diferenças da eficiência do uso de K em germoplasma de espécies agrícolas (DAMON; RENGEL, 2007; DAMON et al., 2007; STELLING et al., 1996; TREHAN et al., 2005), (ii) elucidar os principais mecanismos de condução que dirigem as diferenças observadas na eficiência do uso do K (DAMON; RENGEL, 2007; EL-DESSOUGI et al., 2002; FIGDORE et al., 1989) e (iii) identificar marcadores moleculares adequados ou trilhar procedimentos pelos quais as características desejáveis possam ser eficientemente reconhecidas. Para nutrientes fornecidos por difusão como K, é importante ter uma grande área de contato superficial entre as raízes e o solo, assim genótipos eficientes na absorção de K podem ter uma maior proporção de raízes finas em todo o sistema radicular, comparados com genótipos ineficientes na absorção de K, neste caso o volume de raiz pode ser muito importante para genótipos expostos à baixa disponibilidade de K. Por outro lado, o rápido *turnover* ou renovação de raízes pode ser importante na eficiência de absorção de K em espécies expostas à baixa disponibilidade de K no solo (STEINGROBE, 2005). A formação de raízes finas é diferente entre genótipos de uma mesma espécie (JUNGK, 2001). Em estudos onde as raízes finas foram mensuradas (CLAASSEN e JUNGK 1984; HOGH-JENSEN e PEDERSEN 2003) encontraram um maior fator de absorção para o K.

O maior teor de Ca encontrado na raiz do genótipo PA-13 (Figura 17) pode ser um indicativo de que esse genótipo possui uma maior eficiência de sinalização em repostas aos estresses abióticos. Durante os últimos anos, têm sido publicados vários artigos científicos contendo informações sobre as vias de sinalização química e a natureza dos produtos gerados. Muitos estudos têm demonstrado que altas concentrações de ácido abscísico (ABA), seca, frio e salinidade resultam no aumento dos níveis de Ca nas células dos tecidos vegetais (MAHAJAN, 2005; TUTEJA, 2007b; SWAMY; SMITH, 1999). Takano et al., (1997) reportou alterações nas concentrações de Ca no citoplasma, seguidas de percepção do estresse. O estresse hídrico e o térmico induzem mudanças nos níveis de Ca (TAKANO et al., 1997; GONG et al., 1998) e na expressão genética

(KINIGHT et al., 1997). As variações nas resposta entre as diferentes espécies de plantas ocorrem por causa de fatores genéticos ligados à eficiência dos vegetais na utilização desse nutriente (CLARK, 1983). O cacau é uma dicotiledônea e, segundo Melo et al., (1987), este grupo de plantas apresenta raízes com alta CTC, ou seja, alta capacidade de absorver cátions divalentes.

O genótipo PA-13 também acumulou mais Mn e Zn no sistema radicular (Figura 18). Isso se deve, em parte, ao fato de o solo estar com pH baixo (4,2), o que contribui para maior disponibilidade desses micronutrientes. Outro fator é a eficiência de absorção desse genótipo para a maioria dos micronutrientes. O Mn apresenta papel catalisador na atividade da dismutase do superóxido, para proteção das plantas contra EROs e de outras enzimas (HÄNSCH e MENDEL, 2009), contribuindo na tolerância à deficiência hídrica em plantas. O Zn é precursor do aminoácido triptofano, associado à biossíntese de auxinas, hormônio envolvido na formação de raízes laterais e adventícias (TAIZ; ZEIGER, 2009), podendo, desta forma, contribuir para a tolerância à deficiência hídrica em plantas (BAGCI et al., 2007). Além do mais, sua absorção pelas raízes pode ser dificultada, quando as plantas são submetidas à deficiência hídrica, o que pode promover a deficiência desse elemento na planta, agravando sua resposta à seca (WARAICH et al., 2011).

Apesar de o Fe ter a sua disponibilidade aumentada com a diminuição do pH, neste caso sua variação foi devida apenas as doses. Uma explicação para este fato é que o Fe é antagônico ao Mn e Zn, que estão mais disponíveis em um pH mais baixo. Porém, quando na maior dose de K no solo, o pH sofreu um ligeiro aumento, o que faz o teor de Fe aumentar na raiz, em função da maior dose de K aplicada, devido a diminuição do antagonismo com Mn e Zn (Figura 18 **A, B, C**).

#### **5.4. Teores dos macro e micronutrientes minerais no solo**

O valor do pH do solo apresentou um leve aumento na maior dose de K aplicada ao solo (Figura 19). Isso foi devido ao fato da aplicação quinzenal de K na maior dose o que acabou levando ao maior acúmulo do teor desse elemento, que faz parte das bases trocáveis do solo .

Por possuir características intrínsecas ao genótipo, o solo cultivado com o genótipo PA-13 apresentou maior teor de K do que o cultivado com genótipo CC-40. Dentre essas características, a eficiência de utilização do nutriente pelo genótipo é baseada na translocação eficaz de K entre os organelos, as células e os órgãos (RENGEL; DAMON, 2008). Dessa forma, o genótipo PA-13 utilizou, de forma mais eficiente, o K disponível no solo em relação ao genótipo CC-40, o que fez com o teor de K permanecesse em maior concentração no solo (Figura 20).

Observou-se maior acúmulo de K no solo da classe IV de  $\Psi_{\text{wsolo}}$  (- 0,25 a - 0,51 MPa) (Figura 22). O mecanismo de transporte de K no solo até as raízes é predominantemente por difusão (BARBER, 1984), que, por sua vez, é altamente dependente da água do solo. Logo, o baixo teor de umidade do solo (10 a 12%) na classe IV, contribuiu, em parte, pela redução na absorção de K pelo sistema radicular e, conseqüentemente, houve acúmulo de K no solo. Além disso, a baixa disponibilidade de água no solo restringe o crescimento radicular e a sua capacidade de absorção de nutrientes, impedindo a exploração de um maior volume de solo (SEIFFERT et al., 1995).

O genótipo PA-13 apresentou nos tecidos foliares e da raiz, maiores teores de Ca, entretanto observou-se no solo desse genótipo um maior teor de Ca em relação ao solo do genótipo CC-40 o que pode ser considerado uma estratégia de utilização mais eficiente desse nutriente na planta para que os efeitos nocivos do  $\text{Al}^{3+}$  possam ser minimizados. Esse uso eficiente faz com que mais Ca permaneça no solo neutralizando por um período maior de tempo os efeitos deletérios do  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 23). Apesar dos altos teores de  $\text{Al}^{3+}$  que reduz a absorção e translocação do Ca, o genótipo PA-13 apresentou maiores teores de Ca tanto nas folhas quanto nas raízes. O Ca, por sua vez, é um nutriente com papel preponderante no crescimento radicular das plantas (RITCHEY et al., 1982).

O teor de  $\text{Al}^{3+}$  acompanhou a mesma tendência do pH que foi a de reduzir os teores com o aumento de doses aplicadas no solo (Figura 24). Braccini et al. (1998) verificaram que em espécies de cafeeiro pode haver diferentes níveis de tolerância em relação à presença do  $\text{Al}^{3+}$  tóxico, quando se avaliam variáveis relacionadas ao crescimento das raízes. Entretanto, Konrad et al. (2005), estudando os efeitos do  $\text{Al}^{3+}$  tóxico sobre as variáveis relacionadas com as trocas gasosas de  $\text{CO}_2$  e de  $\text{H}_2\text{O}$  e fluorescência da clorofila em seis cultivares de

cafeeiro, observaram que não houve diferenças importantes quanto à tolerância ao  $Al^{3+}$ , visto que em todas elas o processo da fotossíntese foi afetado significativamente e em intensidades semelhantes. De acordo com Foy (1984), a toxicidade de alumínio é o principal fator limitante ao estabelecimento de diferentes culturas em solos ácidos. Em trabalho realizado por Ribeiro et al. (2013) avaliando sete doses de  $Al^{3+}$  em dois genótipos de *T. cacao* híbrido de Theobahia (resistente à vassoura de bruxa) e a variedade Catongo (susceptível), observou-se que todos os nutrientes com tiveram os seus teores diminuídos com aumento das doses de  $Al^{3+}$  com exceção do teor de K na raiz e no caule do híbrido Theobahia e nas raízes da variedade Catongo. O  $Al^{3+}$  inibe a absorção líquida de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  e nitrogênio pelas raízes (MOUSTAKAS et al., 1995).

O teor de Fe no solo foi reduzido devido ao ligeiro aumento do pH em função da maior dose de K aplicada. Na maior dose de K aplicada certamente houve um maior crescimento de raiz devido ao aumento do pH que também proporcionou uma ambiente de caráter um pouco mais redutor e consequentemente houve também uma elevação dos teores de Fe nos tecidos das plantas proporcionando diminuindo os teores de  $Fe^{2+}$  no solo na maior dose de K aplicada (Figura 25 A). O genótipo PA-13 apresentou um maior teor de Zn na BS de raiz e ao mesmo tempo um maior teor no solo (Figura 25 B). Isto é inerente ao genótipo que possui uma maior eficiência de absorção e desse nutriente.

### **5.5. Parâmetros da emissão de fluorescência da clorofila a**

O maior valor de  $F_v$ , apresentado pelo genótipo PA-13 em relação ao genótipo CC-40 (Figura 26), indica uma maior capacidade de transferência de energia, provenientes de elétrons, para a formação de poder redutor (NADPH) e produção de ATP; e, consequentemente, maior capacidade de assimilação de  $CO_2$  na fase bioquímica da fotossíntese (ROHACEK, 2002; BAKER, 2008). Fato este confirmado pelos maiores valores de  $A$  apresentados pelo genótipo PA-13, em comparação com o genótipo CC-40, nas maiores doses de K aplicadas ao solo (Figura 8). A diminuição em  $F_v$  pode indicar a existência de dano nos centros de reação do PS 2, associado com a redução dos transporte de elétrons para o PS 2 (KRAUSE e BEHREND, 1986a).

O aumento nos valores de  $F_m$ , observado para o genótipo CC-40, em relação ao PA-13 (Figura 27), indica que esse genótipo libera ou perde energia dos elétrons que alcançaram a quinona A ( $Q_A$ ), receptora primária estável de elétrons de PS2; ou por meio de algum bloqueador do fluxo eletrônico; ou por falta de demanda na produção de NADPH e, ou ATP, que retornam às suas moléculas de origem. Em contrapartida, o genótipo PA-13 possui menor capacidade de dissipação de energia, o que diminui o seu valor de  $F_m$ . Neste caso, a energia de excitação pode estar excedendo a capacidade de dissipação, não devendo ser um problema de dano no centro de reação de PS2 (MARTÍNEZ-CARRASCO et al., 2002). A redução de  $F_m$  tem sido atribuída à dissipação não-fotoquímica principalmente por meio do ciclo da xantofila, em que a violaxantina é convertida em zeaxantina (DEMMIG-ADAMS e ADAMS, 1992). Dessa forma, o excesso de energia absorvida pela folha do genótipo PA-13 é drenado para carotenóides do ciclo da xantofila que a dissipa na forma de calor, o que protege o fotossistema II contra possíveis danos oxidativos causados pela radiação solar plena.

Relacionando-se os valores de  $F_v/F_m$  com os genótipos e as doses de K aplicadas ao solo, observou-se que o genótipo PA 13 apresentou maior rendimento quântico de PS2 na maior dose de K ( $40 \text{ mg dm}^{-3}$  solo), quando comparado ao genótipo CC-40 (Figura 28). Reações fotoquímicas em *Coffea sp.* São pouco ou nada afetadas pelo déficit hídrico (PRAXEDES et al., 2006; DAMATTA et al., 1997). A relação  $F_v/F_m$  indica os efeitos dos estresses ambientais sobre a fotossíntese (BAKER, 2008). A ausência de mudanças na eficiência fotoquímica do PS 2 sugere que o estresse hídrico não causou efeito fotoquímico significativo sobre o PS 2 ( $F_v/F_m$ ), sendo os seus efeitos observados de forma indireta. Entretanto Silva et al. (2010) verificaram uma redução da atividade do PS 2 em *Jathropa curcas* submetida o déficit hídrico e sua relação com o estresse oxidativo. Da mesma forma, diversos outros autores correlacionaram a diminuição da capacidade fotoquímica do PS 2, o que está diretamente relacionado à atividade fotossintética, com o avanço do déficit hídrico (OUKARROUM et al., 2007; EFEOGLU et al., 2009; GONÇALVES et al., 2009). Segundo Li et al. (2013), o nível de K no solo tem um efeito significativo na concentração de Chl *b* e na razão Chl *a/b*. Segundo estes autores, o aumento da

dose de K no solo promove a diminuição razão Chl *a/b* e aumenta a concentração de Chl *b* em folhas de *T. cacao*.

## 6. CONCLUSÕES

A adição de K no solo demonstrou, para ambos os genótipos de *T. cacao* (CC-40 e PA-13), maior adaptação à deficiência hídrica no solo, principalmente para o genótipo tolerante a seca (PA-13), havendo, dessa forma, uma interação positiva entre o aumento de dose de K no solo e tolerância ao déficit hídrico no solo;

A tolerância a deficiência hídrica atribuída ao genótipo PA-13, em relação ao genótipo CC-40, e potencializada pela adição de K no solo, está relacionada, em parte, com a sua maior capacidade de absorção e acumulação de macro e micronutrientes minerais na raiz (K, Ca, Mn e Zn) e na folha (N, Ca, Mg e Mn), associada também com a sua capacidade de manter os estômatos parcialmente abertos, em condições de baixos valores de potencial hídrico no solo, possibilitando a manutenção das trocas gasosas foliares e um balanço positivo de carbono em condições de deficiência hídrica.

## 7. REFERÊNCIAS

AGRIANUAL 2013: Anuário estatístico da agricultura brasileira. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 2013.

ALMEIDA, A-A.F.; SANTOS, I.C.F.; VALLE, R.R. Chlorophyll fluorescence emission and gas exchange rates in Two cacao genotypes infected with witches broom. **Agrotropica**. v. 13, n.1, p. 1 - 8. 2001a.

ALMEIDA, A-A. F. de. et al. Water relations aspects of *Theobroma cacao* L. clones. **Agrotropica**. v. 14, n. 2, p. 35-44, 2002b.

ALMEIDA, A-A.F.; VALLE, R.R. Ecophysiology of the cacao tree - A review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**. v. 19(4). p. 425-448, 2007c.

ALMEIDA, A-A. F.; VALLE, R.R. Cacao: ecophysiology of growth and production: In: Ecophysiology of Tropical Tree Crops. **Nova Science Publishers, Inc.**, Hauppauge, New York. p. 37-70, 2009d.

ALVIM, P. T.; GRANGIER, JR. A. Estudio sobre el analisis de crecimiento de plantulas de cacao de diferente origen genetic. Cacao (Costa Rica) 1966, 11(2); 1-3.

ALVIM, P.T. Cacao. In: ALVIM, P.T.; KOZLOWSKY, T.T. (ed) **Ecophysiology of tropical crops**. Academic Press, New York. p. 279-313, 1977.

ALLAKHVERDIEV, S.I.; MURATA, N. Environmental stress inhibits the synthesis of proteins involved in the photodamage-repair cycle of photosystem II in *Synechocystis* sp. PCC 6803, **Biochim. Biophys. Acta** 1657 (2004), p. 23–32

ANJUM, S.A. et al. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. – **Afr. J. Agr. Res**, v. 6, p. 2026-2032, 2011.

ARAQUE, O. et al. Comparative Photosynthesis, Water relations, Growth and Survival rates in juvenile Criollo Cacao Cultivars (*Theobroma cacao*) during dry and wet seasons. **Expl Agric.** v. 48 , n.4, p. 513–522, 2012.

ASOMANING, E. J. A. Recent cocoa nutrition studies: with particular reference to the Ghana experience. *In*. International Cocoa Research Conference, 4, St. Augustine, 1972. Government of Trinidad and Tobago. Pp. 120-128.

ASSMANN, S.M.; SHIMAZAKI, K. The multisensory guard cell. Stomatal responses to blue light and abscisic acid. **Plant Physiology.** v. 119, p. 809–815, 1999.

BAKER, N. R. A possible role for photosystem II in environmental perturbations of photosynthesis. **Physiologia Plantarum.** v. 81, n.4, p. 563-567, 1991a.

BAKER, B. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. **Annual Review of Plant Biology,** Boca Raton, v.59, p.89-113, 2008b.

BALASIMHA, D. Water relations, growth and other indicators of plant water stress in cocoa under drought. *In*: Proc. 10th Int. **Cocoa Research Conference,** Santo Domingo, Dominican Republic. p. 215-217, 1988a.

BALASIMHA, D.; APSHARA, S.E.; JOSE, C.T. Genotypic variations in chlorophyll fluorescence and stomatal conductance of cocoa in relation to drought tolerance. **Journal of Plantation Crops.** v. 41, n.1, p. 40-45, 2013b.

BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K.; HE, Z.L. Nutrient use efficiency in plants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* v. 32, p. 944-950, 2001.

BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. *In*: CARSON, E.W. The plant root and its environment. Charlottesville, University of Virginia, p.525-564, 1974.

BRACCINI, M.C. et al. Tolerância de genótipos de cafeeiro ao Al em solução nutritiva. I. Crescimento e desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Campinas, v.22, p.435-442, 1998.

BRAY, E. A Plant responses to water deficit. **Trends in Plant Science.** v. 2, n. 2, p. 48-54, 1997.

CELLIER, F. et al. Molecular and Physiological Responses to Water Deficit in Drought-Tolerant and Drought-Sensitive Lines of Sunflower. **Plant Physiology.** v. 116, p. 319–328, 1998.

CHEN, J.; GABELMAN WH. Isolation of tomato strains varying in potassium acquisition using a sand-zeolite culture system. **Plant Soil.** v. 176, p. 65–70, 1995a.

- CHEN, J.; GABELMAN, W.H. Morphological and physiological characteristics of tomato roots associated with potassium-acquisition efficiency. **Scientia Hort.** v. 83, p. 213–225, 2000b.
- CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Effect of K uptake rate, root growth and root hairs on potassium uptake efficiency of several plant species. **Z Pflanzenernahr Bodenkd**, v.147, p. 276–289, 1984.
- CLARK, R. B. Plant genotype differences in the uptake, translocation, accumulation, and use of mineral elements required for plant growth. **Genetic Aspects of Plant Nutrition**. v. 8, p. 49-70, 1983.
- CLARKSON, D.T.; HANSON, J.B. The mineral nutrition of higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 31, p. 239-298, 1980.
- CLIJSTERS, H.; VAN ASSCHE, F. Inhibition of photosynthesis by heavy metals, **Photosynth. Res.** 7 p. 31–40, 1985.
- CHRISTOPHER, D. A.; MULLET, J.E. Separate photosensory pathways co-regulate blue light/ultraviolet-A-activated *psbD-psbC* transcription and light-induced D2 and CP43 degradation in barley (*Hordeum vulgare*) chloroplasts. **Plant Physiology** v.104, p. 1119–1129, 1994.
- DALEY, P. F. Topography of photosynthetic activity of leaves obtained from video images of chlorophyll fluorescence. **Plant Physiology**, v. 90, p. 1233-1238, 1989.
- DAMATTA, F.M.; MAESTRI, M.; Barros, R.S. Photosynthetic performance of two coffee species under drought. **Photosynthetica**, v. 34, p. 257-264, 1997.
- DAMON PM, RENGEL Z. Wheat genotypes differ in potassium efficiency under glasshouse and Field conditions. **Australian Journal Agriculture Research**. v. 58, p. 816–825, 2007.
- DAMON, P.M. Canola genotypes differ in potassium efficiency during vegetative growth. **Euphytica**. v. 156, p. 387–397, 2007.
- DEFELIPO, B. V; RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo (metodologia)**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 1997. 26p. (Boletim de extensão 29).
- DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS, W.W. III: Carotenoid composition in sun and shade leaves of plants with different life forms. – **Plant Cell Environment**. 15: 411-419, 1992.
- DUNLOP, J.; TOMKINS, B. Genotypic differences in potassium translocation in ryegrass. In: Wardlaw IF, Passioura JB (eds) Transport and transfer processes in plants. **Academic Press Inc**. London, p. 145–152, 1976.

EFEUGLU, B.; EKMEKÇI, Y.; ÇIÇEK, N. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. **South African Journal of Botany**. v. 75, p. 34 – 42. 2009.

EL-DESSOUGI, H.; CLAASSEN, N.; STEINGROBE, B. Potassium efficiency mechanisms of wheat, barley, and sugar beet grown on a K fixing soil under controlled conditions. **J Plant Nutr Soil Sci**. v. 165, p. 732–737, 2002.

ELHANI, S; RHARRABTI, Y.; L.F. ROCA, L. F.. Evolution of chlorophyll fluorescence parameters in durum wheat as affected by air temperature. **Options Méditerranéennes**, Serie A, 2000 v. 40 p. 275-277.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. - **EMBRAPA**. 212 p. 1997.

ENNAJEH, M.; VADEL, A.; KHEMIRA, H. Osmoregulation and osmoprotection in the leaf cells of two olive cultivars subjected to severe water deficit, **Acta Physiologiae Plantarum**. Springer Berlin, v.31, n.4, 2009.

FARINA, M.P.W. et.al. Genotypic differences in the potassium requirement of two maize cultivars. **Crop Prod**. v.12, p. 84–86, 1983.

FIGDORE, S.S.; GABELMAN, W.H.; GERLOFF, G.C. Inheritance of potassium efficiency, sodium substitution capacity, and sodium accumulation in tomatoes grown under low-potassium stress. **Journal American S Horticulture Sci** . v. 114, p. 322–327, 1989.

FOY, C.D. Physiological effects of hydrogen, aluminum and manganese toxicities in acid soil. In: ADAMS, F. (Ed.). Soil acidity and liming. Madison: **American Society of Agronomy**, p.57- 97, 1984.

FLEXAS, J. et al. Understanding down regulation of photosynthesis under water stress: future prospects and searching for physiological tools for irrigation management. **Annals of Applied Biology**. v. 144, p. 273–283, 2004.

FRICKE, W. Cells of the upper and lower epidermis of barley (*Hordeum vulgare* L.) leaves exhibit distinct patterns of vacuolar solutes. **Plant Physiol**. v. 104, p.1201–1208, 1994.

FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. **Melhoramento de Plantas para Condições de Estresses Abióticos**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011, 250p.

GATTWARD, J. N.; et al. Sodium–potassium synergism in *Theobroma cacao*: stimulation of photosynthesis, water-use efficiency and mineral nutrition. **Physiologia Plantarum**, 2012, ISSN 0031-9317

GEIGER, D. et al. Activity of guard cell anion channel SLAC1 is controlled by drought-stress signaling kinase-phosphatase pair. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, USA v.106, p. 21425–21430, 2009.

GERLOFF, G.C. Intact-plant screening for tolerance to nutrient-deficiency stress. **Plant Soil**. v. 99, p. 3–16, 1987.

GOMES, A.R.S.; KOZLOWSKI, T.T.; REICH, P.B. Some physiological responses of *Theobroma cacao* var. catongo seedlings to air humidity. **New Phytologist**. v. 107, p. 591-602, 1987.

GONÇALVES, J. F. C.; SILVA, C. E.; GUIMARÃES, D. G.; BERNARDES, R. S. Análise dos transientes da fluorescência da clorofila a de plantas jovens de *Carapa guianensis* e de *Dipteryx odorata* submetidas a dois ambientes de luz. **Acta Amazonica**, Vol. 40 (1), p. 89 – 98, 2010.

GONÇALVES, C. F. J.; SILVA, M. E. C.; GUIMARÃES, G. D. Fotossíntese e potencial hídrico foliar de plantas jovens de Andiroba submetidas à deficiência hídrica e à reidratação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília. v. 44, p. 8 – 14, 2009.

GONG, M. et al. Heat shock induced change in intracellular calcium level in tobacco seedlings in relation to thermo tolerance. **Plant Physiology**. v. 116, p. 429-437, 1998.

HÄNSCH, R.; MENDEL. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Curr. Opin. Plant Biology*. v. 12, p. 259–266, 2009.

HOGH-JENSEN, H.; PEDERSEN, M. B. Morphological plasticity by crop plants and their potassium use efficiency. **Journal Plant Nutrition** v. 26, p. 969–984, 2003.

HOUTZ, R. L.; NABLE, R. O.; CHENIAE, G. M., “Evidence for Effects on the in Vivo Activity of Ribulose-Bisphosphate Carboxylase/Oxygenase during Development of Mn Toxicity in Tobacco,” **Plant Physiology**. v. 86, n. 4.p. 1143-1149, 1988.

HRISHIKESH, U. Comparative Effect of Ca, K, Mn and B on Post-Drought Stress Recovery in Tea [*Camellia sinensis* (L.) O Kuntze]. **American Journal of Plant Sciences**.v. 3,p. 443-460, 2012.

<http://cocoagendb.cirad.fr/cgibin/generic/tree/cocoagendb?name=CC%2040&class=Germplasm> cc40 informações, dia 29/11/2013 às 10:30 min.

[http://cocoagendb.cirad.fr/cgibin/generic/tree/cocoagendb?name=imp07327cep03a\\_full&class=Image](http://cocoagendb.cirad.fr/cgibin/generic/tree/cocoagendb?name=imp07327cep03a_full&class=Image), foto PA-13, acessado dia 29/11/2013 às 10 h : 20 min.

<http://www.icgd.rdg.ac.uk/group.php?groupname=CC&&groupdi=>, pesquisa sobre o CC-40 características acessado dia 29/11/2013 às 10 h:40 min.

<http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/portuguese/ar4-wg1-spm.pdf> IPCC acessado dia 03/12/2013 às 14 h : 14 min.

HUSEYNOVA, M. et al. Drought-induced changes in photosynthetic membranes of two wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. – **Russ. Biokhimiya**. v. 74, p. 1109-1116, 2009.

ICCO - International Cocoa Organization. **Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics**, Vol. XXXV - No. 3 - Cocoa year 2008/09; 43, 2009.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Abdelkader Allali, Roxana Bojariu, Sandra Diaz et al. (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

IRVING, L. J.; ROBINSON, D. A dynamic model of Rubisco turnover in cereal leaves. **New Phytologist**, Cambridge, v. 169, p. 493–504, 2006.

JONES, H. G.; CORLETT, J. E. Current topics in drought physiology. **Jornal of Agricultural Science**. v. 119, p. 291- 296, 1992.

JUNGK, A. Root hairs and the acquisition of plant nutrients from soil. **Journal Plant Nutrition Soil Science** v.164, p.121–129, 2001.

KANECHI, M. et al. Non-Stomatal inhibition associated with inactivation of Rubisco in dehydrated coffee leaves under unshaded and shaded conditions. **The Plant Cell**, Rockville, v. 37, n. 4, p. 455-460, 1996.

KANNAN, N.D.; KULANDAIVELU, G. Drought induced changes in physiological, biochemical and phytochemical properties of *Withania somnifera* Dun. – **J. Med. Plants Res.** v 5, p. 3929-3935, 2011.

KAWAKAMI, K. et al. Location of chloride and its possible functions in oxygen-evolving photosystem II revealed by X-ray crystallography. – **Proc. Natl. Acad. Sci.** USA 106: p. 8567-8572, 2009.

KHAN, H. R.; MCDONALD, G. K.; RENGEL, Z. Zn fertilization improves water use efficiency, grain yield and seed Zn content in chickpea. **Plant Soil**. v. 249, p. 389–400, 2003.

KINIGHT, H.; TREWAVAS, A.J.; KNIGHT, M.R. Calcium signaling in *Arabidopsis thaliana* responding to drought and salinity. **Plant J.** v. 12, p. 1067-1078, 1997.

KONRAD, M.L.F.; SILVA, J.A.B.; FURLANI, P.R.; MACHADO, E.C. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em seis cultivares de cafeeiro sob estresse de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.3, p.339-347, 2005

KOZLOWSKI, T.T.; PALLARDY, S.G. *Physiology of Woody Plants*. **Academic Press**, San Diego, 1997. 411 p.

KOZLOWSKI, T.T.; PALLARDY, S.G. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. **Botanical Review**, New York, v.68, p.270-334, 2002.

- KRAUSE, G. H.; BEHREND, U.  $\delta$ pH-dependent chlorophyll fluorescence quenching indicating a mechanism of protection against photoinhibition of chloroplasts. **FEBS Letters** **200**, p.298–302, 1986.
- KRAUSE, G.H.; WEIS, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basic. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 42, p.313-349, 1991.
- LASSOUANE, N.; AÏD, F.; LUTTS, S. Water stress impact young seedling growth of *Acacia arabica*. **Acta Physiology Plantarum**, v. 35, p. 2157-2169, 2013.
- LAWLOR, D. W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficit in higher plants. **Plant Cell & Environment**. v. 25, p. 275-294, 2002.
- LEI, Y.; YIN, C.; LI, C. Differences in some morphological, physiological, and biochemical responses to drought stress in two contrasting populations of *Populus przewalskii*. **Physiologia Plantarum**. v.127, p. 182–191, 2006.
- LINDHAUER, M. G. The role of potassium in the plant with emphasis on stress conditions (water, temperature, salinity). In: **Proceedings of the Potassium Symposium**. Department of Agriculture and Water Supply, International Potash Institute and Fertilizer Society of South Africa. Pretoria, p. 95-113. 1985.
- LIU, X., WANG, Z., WANG, L. et al.: LEA 4 group genes from the resurrection plant *Boea hygrometrica* confer dehydration tolerance in transgenic tobacco. – **Plant Science**, v.176, p. 90-98, 2009.
- MAATHUIS, F. J. M. Physiological functions of mineral macronutrients. Current Opinion in Plant Biology, **Elsevier**, v.12, p. 250-258, 2009.
- MAHAJAN, S; TUTEJA, N. Cold, salinity and drought stresses: An overview. **Arch Biochem Biophys**. v. 139, p. 58. 2005.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 215p.
- MARITA J.M. et al.. Analysis of genetic diversity in *Theobroma cacao* with emphasis on witches' broom disease resistance. **Crop Science**. v. 41, p. 1305-1316, 2001.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. **Academic Press Inc LTD**, London, p.674, 1986.
- MARTÍNEZ-CARRASCO, R.; SANCHÉZ- RODRIGUEZ, J.; PÉREZ,P. Changes in chlorophyll fluorescence during the course of photoperiod and in response to drought in *Casuarina equisetifolia* Forst and Forst. **Photosynthetica**, Prague. v. 40, p. 363 – 368, 2002.

MARTINS, D. V. Variação sazonal de alguns elementos minerais na seiva xilemática do cacauzeiro. (*Theobroma cacao* L.) Salvador, UFBA, 1976. 40 p.

MEHTA, P. et al. Characterization of photosystem II heterogeneity in response to high salt stress in wheat leaves (*Triticum aestivum*). **Photosynth. Res.** v.105, p. 249–255, 2010.

MELO, F.A.F. et al. **Fertilidade do solo**. 3. ed. São Paulo: Nobel. p.265-335, 1987.

MEMON, A.R.; SIDDIQI, M.Y.; GLASS ADM. Efficiency of K<sup>+</sup> utilization by barley varieties: activation of pyruvate kinase. **Journal Experimental Botany**. v. 36, p. 79–90, 1985.

MENCUCCINI M. MAMBELLI, S. COMSTOCK, J.. Stomatal responsiveness to leaf water status in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a function of time of day. **Plant Cell and Environment**, v. 23, p. 1109–1118, 2000

MILLER, G. et al. Reactive oxygen species homeostasis and signaling during drought and salinity stresses. **Plant, Cell and Environment**, v. 33, p. 453–467, 2010.

MORISON, J. I. L; BAKER, N. R; MULLINEAUX, P. M; DAVIES, W. J. Improving water use in crop production. **Philosophical Transactions**. v. 363, p- 639-658, 2008

MOUSTAKAS, M.; OUZOUNIDOU, G.; LANNOYE, R. Aluminum effects on photosynthesis and elemental uptake in an aluminum-tolerant and non-tolerant wheat cultivar. **Journal of Plant Nutrition** v.18, p.669–683, 1995.

NESS, P. J. WOOLHOUSE, H. W. “RNA synthesis in *Phaseolus* chloroplasts. Ribonucleic acid synthesis and senescing leaves,” **Journal Experimental Botany**. v. 31, n 1, p. 223-233, 1980.

NI, B. PALLARDY, S. G. Stomatal and non stomatal limitation to net photosynthesis in seedlings of woody angiosperms. **Plant Physiology**, v. 99, p. 1502-1508, 1992.

NOBEL, P. S. Leaves and fluxes. *In*: Nobel, P.S. **Physiochemical and environmental plant physiology**. San Diego: Academic Press, p. 393-472, 1991.

NGUYEN-QUEYRENS, A. et al. Osmotic adjustment in three-year-old seedlings of five provenances of maritime pine (*Pinus pinaster*) in response to drought. **Tree Physiol.** v. 23, p. 397–404, 2003.

ORCHARD, J. E. Efeito do K na transpiração, na resistência difusa de folha e crescimento em plântulas de *Theobroma cacao* L. *In*: **Informe técnico**. Ilhéus, CEPEC/CEPLAC. 1977/1978. p. 61-64, 1978.

- OUKARROUM, A.; MEDIDI, S.; SCHANSKER, G.; STRASSER, J. R. Probing the responses of barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.) by chlorophyll a fluorescence OLKJIP under drought stress and re-watering. **Environmental and Experimental Botany**. v. 60, p. 438 – 446. 2007.
- PACE, R. J.; STRANGER, R.; PETRIE, S. Why nature chose Mn for the water oxidase in photosystem II. **Dalton Trans.**, v. 41, n. 24, p. 7179-7189, 2012.
- PASSOS, E. E. M. Efeito do fósforo sobre o estado hídrico e crescimento de plântulas de cacau (*Theobroma cacao* L.). 34p. **Dissertação de Mestrado** - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1982.
- PETTERSSON, S.; JENSÉN, P. Variation among species and varieties in uptake and utilization of potassium. **Plant Soil** v. 72, p. 231–237, 1983.
- PEUKE, A. D.; RENNENBERG H. Impacts of drought on mineral macro- and microelements in provenances of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings. **Tree Physiology online**. v. 31, p. 196-207, 2011.
- PIER, P.A.; BERKOWITZ, G. A. Modulation of water stress effects on photosynthesis by altered leaf K<sup>+</sup>. **Plant Physiology**. v. 85, p. 655-661, 1987.
- PRAXEDES, S.C.; DAMATTA, F.M.; LOUREIRO, M.E.; FERRÃO, M.A.G.; CORDEIRO, A. Effects of long-term soil drought on photosynthesis and carbohydrate metabolism in mature robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre var. kouillou) leaves. **Environmental and Experimental Botany** v. 56, p. 263-273, 2006.
- RAJA HARUN, R.M.; HARDWICK, K. The effect of different temperatures and water vapour pressure deficits on photosynthesis and transpiration of cocoa leaves. In: Proc. 10th Int. **Cocoa Research Conference**, Santo Domingo, Dominican Republic, 211-214, 1988.
- RANJBARFORDOEI, A.; SAMSON, R.; VAN DAMME, P. Chlorophyll fluorescence performance of sweet almond *Prunus dulcis* M. in response to salinity stress induced by NaCl. **Photosynthetica**. v. 44, p. 513 – 522. 2006.
- RAWAT,P.S.; GUPTA, B.B.; RAWAT, J.S. Transpiration as affected by soil moisture in *Eucalyptus tereticornis* seedlings. **Indian Forester**, Dehra Dun - Índia, v.110, n.1, p. 35-39, 1985.
- REDDY, A. R.; CHAITANYA, K. V.; VIVEKANANDAN, M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. **Journal of Plant Physiology**. v.161, n.11, p. 1189-120, 2004.
- REHEM, B. C. et al. Photosynthesis, chloroplast ultrastructure, chemical composition and oxidative stress in *Theobroma cacao* hybrids with the lethal gene *Luteus-Pa* mutant. **Photosynthetica** , v.49 (1), p. 127-139, 2011

RENGEL, Z.; DAMON, P. M. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. **Physiologia Plantarum**. v. 133, p. 624–636, 2008.

RIBEIRO, M. A. Q. et al. ALUMINUM EFFECTS ON GROWTH, PHOTOSYNTHESIS, AND MINERAL NUTRITION OF CACAO GENOTYPES, **Journal of Plant Nutrition**, 36:8, p. 1161-1179, 2013.

RICHARDSON, A.D.; BERLYN, G.P. Changes in foliar spectral reflectance and chlorophyll fluorescence of four temperate species following branch cutting. **Tree Physiology**. v. 22, p. 499–506, 2002.

RITCHEY, K.D.; SILVA, J.E.; COSTA, U.F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savanna oxisols. **Soil Science**, v.133, p.378-382, 1982.

RODRIGUES, A. C. DA GAMA. O potássio na cultura do cacau. **Agrotropica**, Bahia 1993.

ROHÁČEK, K. Chlorophyll fluorescence parameters: the definition, photosynthetic meaning, and mutual relationship. **Photosynthetica**, Prague, v.40, n.1, p.13-29, 2002.

ROMERO, P.; BOTÍA, P. Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. **Environmental and Experimental Botany**. v. 56, p. 158-173, 2006.

ROZA, F. A. Alterações morfofisiológicas e eficiência de uso da água em plantas de *Jatropha curcas* L. submetidas à deficiência hídrica. Dissertação de Mestrado. UESC, Ilhéus – BA, 2010.

SALE, P.W.G.; CAMPBELL, L.C. Differential responses to K deficiency among soybean cultivars. **Plant Soil**. v. 104, p.183–190,1987.

SANTANA, T. A. de. **Relações hídricas e assimilação de carbono em plantas jovens de *Jatropha curcas* L.** sob deficiência hídrica. Dissertação de Mestrado. UESC, Ilhéus-BA, 2012.

SANTOS, I. C. DOS. **Seleção de genótipos de cacau tolerantes à seca.** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus, Bahia 2012.

SANTOS, M.G.et al. The role of inorganic phosphate on photosynthesis recovery of common bean after a mild water deficit. **Plant Science**. v. 170, p. 659–664, 2006.

SAPETA, H. et al. Drought stress reponse in *Jatropha curcas*: growth and physiology. **Environmental and Experimental Botany**, v. 85, p. 76-84, 2013.

SASSAKI, R. M.; MACHADO, E. C. Trocas gasosas e condutância estomática em duas espécies de trigo em diferentes teores de água no solo. **Pesquisa**

**Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 9, p. 1571-1579, 1999

SATTELMACHER, B. et al. Factors that contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants. **Z Pflanzenernähr Bodenk.** v. 157, p. 215–224, 1994.

SCHINDLER, C.; LICHTENTHALER, H.K. Photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation, chlorophyll fluorescence and zeaxanthin accumulation in field-grown maple trees in the course of a sunny and a cloudy day, **Journal Plant Physiol.** v. 148, p. 399–412, bb1996.

SEIFFERT, S. et al. Observed and calculated potassium uptake by maize as affected by soil water content and bulk density. **Agron. J.** v. 87, p. 1070-1077, 1995.

SEM GUPTA, A.; BERKOWITZ, G. A.; PÍER, P. A. Maintenance of photosynthesis at low leaf potential in wheat. **Plant physiology.** v.89, p. 1358-1365, 1989.

SHAUL, O. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. **Biometals**, v.15, p. 309–323, 2002.

SHEA, P.E. Differing efficiencies of potassium utilization in strains of snapbeans, *Phaseolus vulgaris* L. **Plant Soil.** v. 28, p. 337–346, 1968.

SILVA, E. N. et al. Photosynthetic changes and protective mechanisms against oxidative damage subjected to isolated and combined drought and heat stresses in *Jatropha curcas* plants. **Journal of Plant Physiology.** v. 167, p. 1157–1164, 2010a.

SILVA, E.N. et al. Comparative effects of salinity and water stress on photosynthesis, water relations and growth of *Jatropha curcas* plants. **Journal of Arid Environments**, v. 74, p. 1130-1137. 2010b.

SKOTNICA, J., MATOUŠKOVÁ, M., NAUŠ, J. et al.: Thermo luminescence and fluorescence study of changes in photosystem II photochemistry in desiccating barley leaves. – **Photosynthetica.** Res. v. 65, p. 29-40, 2000.

SOUZA JR., J.O.; MENEZES, A.A. Identificação de características físicas de solo e espaciais que influenciam a morte de cacacueiros (*Theobroma cacao*) em anos secos, em Itagibá-BA. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 13, Ilhéus, 2000. **Anais**, Ilhéus. SBCS. 2000.

SOUZA, C. A. S.; DIAS, L. A. S. Melhoramento ambiental e sócio-economia. In: DIAS, L. A. S. (Ed). **Melhoramento Genético do Cacacueiro**. Editora Folha de Viçosa Ltda, Viçosa, 1-47, 2001.

SOUZA, R.P. et al. Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and recovery. **Environ. Exp. Bot.**v. 51,p. 45–56, 2004.

- STEINGROBE, B . A sensitivity analysis for assessing the relevance of fine-root turnover for P and K uptake. **Journal Plant Nutr Soil Sci.** v. 168, p. 496–502, 2005.
- STELLING, D. WANG, S.H.; ROMER, W. Efficiency in the use of phosphorus, nitrogen and potassium in topless faba beans (*Vicia faba* L.): Variability and inheritance. **Plant Breeding.** v. 115, p. 361–366, 1996.
- STRASSER, B.J., STRASSER, R.J., 1995. Measuring fast fluorescent transients to address environmental questions: the JIP-test. In: Mathis, P. (Ed.), **Photosynthesis: From Light to Biosphere**, vol. V. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 977–980
- SWAMY, P.M.; SMITH, B. Role of abscisic acid in plant stress tolerance. **Curr Sci.** v. 76, p. 1220-1227. 1999.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal.** 4 ed. São Paulo: Artmed, 2009. 720 p.
- TAKANO, M.; TAKAHASHI, H.; SUGE, H. Calcium requirement for the induction of hydrogen of hypotropism and enhancement of calcium induced curvature by water stress in primary roots of pea *Pisum sativum* L. **Plant Cell Physiol.** v. 38, p. 385 – 391, 1997.
- TISCHNER, R. Nitrate uptake and reduction in higher and lower plants. v. 23, p. 1005-1024, 2000.
- TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**, 3.ed. New York, Macmillan, 694p. 1975.
- TREHAN, S.P. Nutrient management by exploiting genetic diversity of potato – a review. **Potato J.** v. 32, p. 1–15, 2005.
- TUTEJA, N. Abscisic acid and abiotic stress signalling. **Plant Signal Behav.** v. 2, p. 135-138, 2007.
- TUTEJA, N.; SOPORY, S.K. Chemical signaling under abiotic stress environment in plants. **Plant Signaling & Behavior**, v. 3, p. 525–536, 2008.
- UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development. Info Comm: market information in the commodities area. Cocoa. 2005/06.
- VAZ, M. et al. Drought-induced photosynthetic inhibition and autumn recovery in two Mediterranean oak species (*Quercus ilex* and *Quercus suber*). **Tree Physiology.** v. 3, n. 8, p. 946-956, 2010.
- WAKEEL A. et al. Potassium Substitution by Sodium in Plants, Critical Reviews in Plant **Sciences.** v. 30, n. 4, p. 401-413, 2011.

WARAICH, E, et al. Improving agricultural water use efficiency by nutrient management. **Acta Agri Scandi – Soil & Plant Science**, v.61(4), p. 291-304. 2011.

WOODEND, J.J.; GLASS, A.D.M. Genotype-environment interaction and correlation between vegetative and grain production measures of potassium use-efficiency in wheat (*T. aestivum* L.) grown under potassium stress. **Plant Soil**. v. 151, p. 39–44, 1993.

WOODEND, J.J. et al. Genetic variation in the uptake and utilization of potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties grown under potassium stress. In: Gabelman WH, Loughman BC (eds) **Genetics**, 1987.

WU, W.; PETERS, J.; BERKOWITZ, G. A. Surface charge mediated effects of  $Mg^{2+}$  on  $K^+$  flux across the chloroplast envelope are associated with regulation of stromal pH and photosynthesis. **Plant Physiology**. v. 97, p. 580-587, 1991.

XIAO, B. et al. Evaluation of Seven Function-Known Candidate Genes for their Effects on Improving Drought Resistance of Transgenic Rice under Field Conditions. **Molecular Plant**. v. 2, n. 1, p. 73–83, 2009b.

XIAO, X. et al. Physiological and proteomic responses of two contrasting *Populus cathayana* populations to drought stress. **Physiologia Plantarum**. v. 136, p. 150–168, 2009a.

YANG, X.E. et al. Potassium internal use efficiency relative to growth vigor, potassium distribution, and carbohydrate allocation in Rice genotypes. **Journal Plant Nutrition**. v. 27, p. 837–852, 2004.

YAGI, M.; KANEKO, M. Molecular Catalysts for Water Oxidation. **Chem. Rev. (Washington, D. C.)**, v. 101, n. 1, p. 21-35, 2001.

YAN-MEI ,LI. et al. Physiological Traits and Metabolites of Cacao Seedlings Influenced by Potassium in Growth Medium. **American Journal of Plant Sciences**. v. 4, p. 1074-1080, 2013.

YUSUF, M. A. et al. Over expression of (-tocopherol methyl transferase gene in transgenic Brassica juncea plants alleviates abiotic stress: physiological and chlorophyll a fluorescence measurements. **Biochim Biophys. Acta** 1797, p. 1428–1438, 2010.

ZHANG Z. et al. Differential responses of conventional and Bt-transgenic cotton to potassium deficiency. **Journal Plant Nutrition**. v. 30, p. 659–670, 2007.

ZLATEV, Z.: Drought-induced changes in chlorophyll fluorescence of young wheat plant. – **Biotechnology**, v.23, p. 437-441, 2009.