

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

LUCAS BARBOSA DE CASTRO ROSMANINHO

**COMPORTAMENTO DE PLANTAS DE CRAMBE SOB ESTRESSE POR
ALUMÍNIO**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2016

LUCAS BARBOSA DE CASTRO ROSMANINHO

**COMPORTAMENTO DE PLANTAS DE CRAMBE SOB ESTRESSE POR
ALUMÍNIO**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Viçosa como parte das
exigências para a obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo. Modalidade: trabalho científico.**

Orientador: Luiz Antônio dos Santos Dias

Coorientadores: Martha Freire da Silva

Aline de Almeida Vasconcelos

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2016

LUCAS BARBOSA DE CASTRO ROSMANINHO

**COMPORTAMENTO DE PLANTAS DE CRAMBE SOB ESTRESSE POR
ALUMÍNIO**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Viçosa como parte das
exigências para a obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo. Modalidade: Trabalho científico.**

APROVADO: 29 de novembro de 2016

LUIZ ANTÔNIO DOS SANTOS DIAS
(orientador)
(UFV)

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu sustento e fortaleza.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Fitotecnia.

Ao Departamento de Solos, em especial ao Laboratório de Solos Florestais, na pessoa do professor Leonardus Vergutz, por toda a infraestrutura e conhecimento disponibilizados.

Ao meu orientador, professor Luiz Antônio dos Santos Dias, pela oportunidade, pelos ensinamentos, orientações e total apoio desprendido ao meu trabalho.

As minhas coorientadoras, Martha Freire da Silva e Aline de Almeida Vasconcelos, pela amizade, companheirismo, ajuda e total dedicação, tornando este trabalho uma realidade.

Aos amigos do Laboratório de Melhoramento de Oleaginosas, em especial à Lurian Guimarães Cardoso, por ter compartilhado esta experiência comigo e por toda ajuda.

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

Aos meus pais, irmãos e toda minha família, pelos incentivos, conselhos, paciência e amor.

RESUMO

Crambe (*Crambe abyssinica* Hochst), brássica originária do Mediterrâneo, apresenta-se como matéria-prima promissora para produção de biodiesel, em virtude do alto teor de óleo de suas sementes (34% a 38%), elevada produtividade (cerca de 2500 kg/ha), e outros atributos agronômicos e tecnológicos favoráveis. Apesar de ser uma cultura exigente em fertilidade do solo, são escassos os trabalhos sobre fatores nutricionais que afetam o seu desempenho, alguns deles com informações contrastantes sobre sua sensibilidade ao alumínio tóxico. Sabe-se que o Al é um dos elementos mais abundantes nos solos tropicais ácidos, sendo nestas condições o principal fator limitante ao desenvolvimento das culturas. Assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito de diferentes doses desse elemento no desenvolvimento e produtividade de plantas de crambe cultivadas em solução nutritiva. Adicionalmente se associou o desempenho dessas plantas sob condições de estresse por Al com as taxas de trocas gasosas. Plantas cultivadas em substrato comercial, e posteriormente aclimatadas em solução nutritiva por 15 dias, foram alocadas em vasos de cinco litros com os tratamentos de alumínio nas concentrações 0,0; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 mmol L⁻¹. O Al foi fornecido na forma de cloreto. A concentração de fósforo e o pH da solução foram mantidos baixos para minimizar as possíveis precipitações de alumínio. O delineamento estatístico utilizado foi inteiramente casualizado, constituído por cinco tratamentos em oito repetições. Durante o período de enchimento de grãos, realizou-se, simultaneamente, a leitura dos parâmetros de trocas gasosas e de fluorescência de clorofila α , com o auxílio de um sistema de medição de trocas gasosas portátil. Ao final do experimento, as amostras de plantas foram separadas em raiz e parte aérea, sendo avaliados o comprimento de parte aérea e de raiz, massa seca de raiz e de parte aérea e produtividade de grãos. Observou-se que o Al provocou efeito deletério no aparato fotossintético das plantas, afetando drasticamente a fotossíntese. Esse efeito deletério culminou na redução do crescimento da raiz e parte aérea e do acúmulo de matéria seca da planta, levando à queda na produtividade de grãos, a medida em que as doses de Al aumentavam. As plantas se mostraram sensíveis ao estresse por Al, evidenciado pela acentuada queda dos parâmetros de desenvolvimento da cultura. No entanto, não foi observada a morte de nenhuma planta.

Palavras-chave: agroenergia, fotossíntese, toxidez de alumínio

Sumário

RESUMO	2
I – INTRODUÇÃO	4
II – MATERIAL E MÉTODOS.....	6
III – RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
IV – CONCLUSÃO	14
V – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

Comportamento de plantas de crambe sob estresse por alumínio

I – INTRODUÇÃO

A produção de alimentos, fibras e madeira, já não é mais a única função da agricultura. Impulsionada pela necessidade de minimizar os efeitos das mudanças climáticas, o setor agrícola hoje, também é responsável pela produção de energia de biomassa, a chamada agroenergia (Dias, 2011). Dentro deste setor, o biodiesel, produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais, merece destaque. Apresentando crescimento considerável nas últimas décadas, em virtude principalmente do melhoramento genético, a cadeia deste biocombustível tem movimentado um importante mercado (Dias, 2011).

De acordo com a ABIOVE – Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, a produção nacional de biodiesel alcançou 3,9 bilhões de litros em 2015. Deste total, 77%, o equivalente a 3,04 bilhões de litros, foi proveniente do óleo de soja. O óleo de soja destinado à produção de biodiesel, poderia, no entanto, ser consumido na alimentação humana. Sendo assim, a obtenção de novas fontes de biomassa renovável que apresentem atributos agronômicos e tecnológicos favoráveis e que não compita com a produção de alimentos é uma necessidade.

Nesse contexto, o crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) apresenta-se como matéria-prima promissora para produção de biodiesel, uma vez que apresenta alto teor de óleo (34 a 38%), elevada produtividade de grãos (2500 kg ha⁻¹) e óleo impróprio para consumo humano, de acordo com ensaios experimentais já realizados na Universidade Federal de Viçosa. É recomendado para o cultivo de outono/inverno, período de entressafra em que as fontes de biomassa alternativas são escassas, podendo-se, ainda, aproveitar o mesmo maquinário utilizado para as grandes culturas (Colodetti et al., 2012; Silva et al., 2013).

Crambe é originário do Mediterrâneo (Weiss, 1983), pertence à família Brassicaceae, e apresenta diversos usos além da produção de biodiesel. Destaca-se como matéria-prima na produção de fluídos isolantes utilizados em equipamentos de alta voltagem elétrica, plásticos biodegradáveis, tinturas, lubrificantes, cosméticos e seu farelo pode ser utilizado na alimentação animal (Lazzeri et al., 1997; Souza et al., 2009; Pitol et al., 2010; Mendonça et al., 2012). Estudos recentes apontam o extrato de crambe com potencial para atividade nematicida (Coltro-Roncato et al., 2016) e o

subproduto das sementes como bioissorvente na remoção de metais pesados na água (Rúbio et al., 2015).

A cultura apresenta notória adaptabilidade ao território brasileiro, em virtude de sua rusticidade, precocidade, elevado potencial produtivo, tolerância ao déficit hídrico e ciclo de produção reduzido, de aproximadamente 90 dias (Toebe et al., 2010; Falasca et al., 2010). O sistema radicular é ligeiramente profundo, sendo considerado eficiente reciclador de nutrientes, aproveitando bem a adubação residual dos cultivos de verão (Broch e Roscoe, 2010). Entretanto, o crambe é considerado uma cultura exigente em fertilidade (Pitol et al., 2010), sendo escassos os trabalhos sobre os fatores nutricionais que afetam o seu desempenho.

Dentre os elementos que afetam o desenvolvimento das plantas, o alumínio (Al) é considerado o principal limitante para a produção de alimentos (Foy, 1998). Em solos levemente ácidos ou próximos do neutro, o Al está, essencialmente, na forma de $\text{Al}(\text{OH})_3^0$, $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ e $\text{Al}(\text{OH})^4$, as quais não causam fitotoxidez. Entretanto, a forma iônica, Al^{3+} , fitotóxica, predomina em solos com pH abaixo de 5,5 (Kochian, 1995; Lindsay, 1996).

O estresse causado pela ação do Al^{3+} na planta provoca severas reduções na produtividade da cultura. O sintoma mais evidente da fitotoxidez é a redução do crescimento radicular, bem como alterações na morfologia e no processo de divisão celular (Custódio et al., 2002). Posteriormente se desenvolvem outros sintomas, como a diminuição do crescimento da parte aérea e a deficiência de água e nutrientes (Beutler et al., 2001; Panda et al., 2009). Os efeitos do Al^{3+} também podem ser observados alterando a atividade dos nutrientes, incluindo a redução na absorção e no transporte de alguns deles para a parte aérea das plantas (Akaya e Takenaka, 2001). Nas raízes é comum observar a diminuição da atividade respiratória (Machado e Pereira, 1990).

O processo de fotossíntese é prejudicado pela ação do Al^{3+} , que influencia diretamente a taxa de assimilação de CO_2 , uma vez que a condutância estomática é reduzida, assim como as reações bioquímicas de fixação. A formação e função dos cloroplastos também são comprometidas, afetando as membranas dos tilacóides e o transporte de elétrons entre os fotossistemas (Moustakas et al., 1996; Pereira et al., 2000; Akaya e Takenaka, 2001; Peixoto et al., 2002).

As relações planta-alumínio não seguem um padrão, uma vez que espécies, cultivares e variedades diferem amplamente quanto à tolerância à presença desse elemento no solo (Ferreira et al., 2006). Informações sobre a sensibilidade do crambe ao

Al ainda são escassas e conflitantes. Broch e Roscoe (2010) descreveram que o crambe exige solo bem corrigido, com pH próximos ao neutro, uma vez que a espécie não tolera solos ácidos ou com elevadas concentrações de alumínio tóxico. Colodetti et al. (2015) verificaram que o Al limitou o desenvolvimento inicial de plântulas da espécie em testes de germinação. No entanto, Vieira (2013), trabalhando com mapas temáticos, não observou relação entre os teores de Al e a produtividade da cultura.

Assim, os objetivos do presente trabalho foram avaliar o efeito de diferentes doses de Al no desenvolvimento e produtividade de plantas de crambe cultivadas em solução nutritiva, bem como associar o desempenho delas com as taxas de trocas gasosas sob as condições de estresse por esse elemento.

II – MATERIAL E METÓDOS

O experimento foi conduzido na casa de vegetação do Departamento de Solos e no Laboratório de Melhoramento de Oleaginosas do Departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Viçosa. Sementes de crambe da cultivar FMS Brilhante, cedidas pela Fundação Mato Grosso do Sul, foram colocadas para germinar em tubetes contendo substrato comercial (Figura 1).

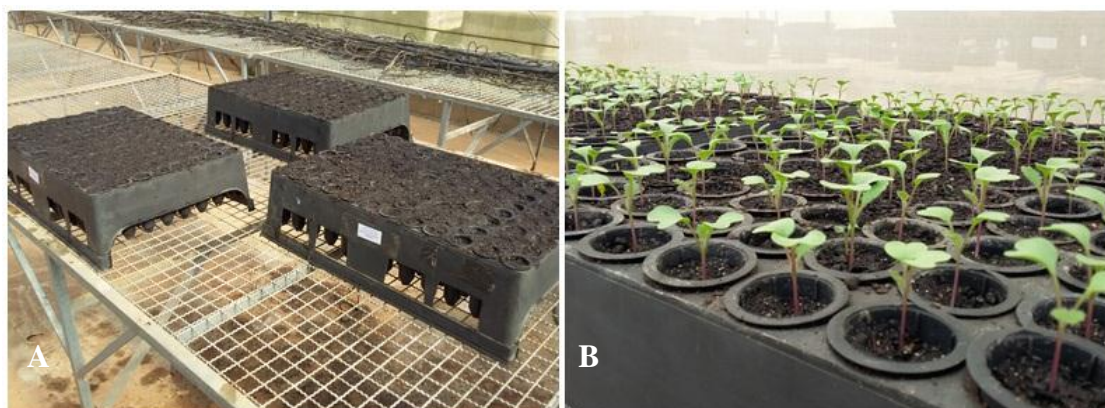


Figura 1. Tubetes com substrato comercial para germinação das sementes de crambe (A) e plântulas de crambe uma semana após emergência (B).

Quando a primeira folha verdadeira surgiu, após 14 dias da data de semeadura, as plantas foram transplantadas para meio hidropônico, em bandejas sob aeração forçada. Nesta etapa, as plantas foram aclimatadas durante 15 dias, em solução nutritiva completa de Hoogland e Arnon (1950), pH 6, meia força (Figura 2).

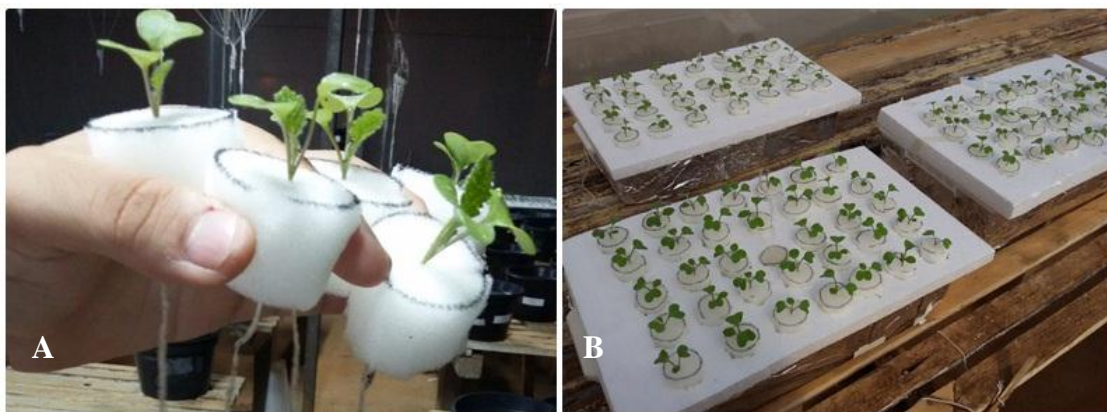


Figura 2. Plântulas de crambe recém retiradas dos tubetes sendo transportadas para aclimação (A) e bandejas de aclimação com aeração forçada (B).

Após período de aclimação, as plantas foram alocadas em vasos de 5 litros (Figura 3), mantendo a aeração, pH 4,0, sendo utilizada meia força da solução nutritiva de Hoogland e Arnon (1950), com adaptação da quantidade de fósforo para 1/10 da dose. A concentração de P e o pH da solução foram mantidos baixos para minimizar as possíveis precipitações do alumínio (Braccini et al., 1998).



Figura 3. Plantas de crambe alocadas em vasos de 5 litros de solução nutritiva (A); Detalhe da raiz e do sistema de aeração forçada (B).

Os tratamentos consistiram de cinco concentrações de Al: 0,0; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 mmol L⁻¹ (pH 4,0), fornecido na forma de cloreto de alumínio (AlCl₃), sendo a concentração 0 de Al considerada controle.

A troca da solução nutritiva ocorreu quando verificada a depleção de 30%, de acordo com a condutividade elétrica, e o pH da solução foi corrigido diariamente com NaOH e HCl 0,5 mol L⁻¹.

Ao final do experimento as plantas foram separadas em raiz e parte aérea, sendo avaliados o comprimento de parte aérea e raiz, massa seca de raiz e parte aérea e

produtividade de grãos. Para determinação da matéria seca, as partes das plantas foram colocadas para secar em estufa de circulação forçada de ar a 60 °C até peso constante.

Durante o período de enchimento de grãos, próximo ao fim do ciclo da cultura realizou-se, simultaneamente, a leitura dos parâmetros de trocas gasosas e de fluorescência de clorofila α , com o auxílio de um sistema de medição de trocas gasosas portátil, IRGA (LI-6400XT, Li-Cor Inc., Lincoln, NE) equipado com uma câmara de fluorescência (LI-6400).

A taxa fotossintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) foi medida na quinta folha completamente expandida das plantas, entre 8:00 e 12:00 h da manhã, período em que a taxa de assimilação líquida de carbono está em seu máximo sob radiação artificial.

Para obtenção da fluorescência mínima (F_o), as folhas foram avaliadas entre 5:00 e 6:00 h da manhã, iluminadas com luz vermelha modulada de baixa intensidade ($0,03 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e, em seguida, por pulsos saturantes de luz branca de $8000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, durante 0,8 segundo para assegurar a emissão de fluorescência máxima (F_m). De posse desses parâmetros, calculou-se o rendimento quântico potencial do fotossistema II (F_v/F_m) pela seguinte equação (Maxwell e Johnson, 2000): $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$.

O delineamento estatístico utilizado foi inteiramente casualizado, constituído por cinco tratamentos (concentrações de Al), dispostos em oito repetições.

III – RESULTADOS E DISCUSSÃO

As plantas se mostraram sensíveis ao estresse causado pelo Al^{3+} , evidenciado pela acentuada queda dos parâmetros de desenvolvimento da cultura (Tabela 1). No entanto, não foi observada a morte de nenhuma planta.

Tabela 1. Parâmetros médios de desenvolvimento da cultura de crambe

$[\text{Al}^{3+}]$ (mmol/L)	CPA ¹ (cm)	CR ² (cm)	MSR ³ (cm)	MSPA ⁴ (cm)	PG ⁵ (g/planta)
0	93,75	41,50	1,34	10,01	7,69
0,1	91,00	39,00	1,28	5,22	2,55
0,2	78,00	34,50	1,11	3,97	2,11
0,3	72,25	28,50	1,06	3,62	1,02
0,4	63,25	27,00	0,51	1,77	0,55

¹ Comprimento de parte aérea (CPA); ² Comprimento de raiz (CR); ³ Massa seca de raiz (MSR); ⁴ Massa seca de parte aérea (MSPA); ⁵ Produtividade de grãos (PG).

Foi observada redução linear do comprimento das partes aérea e radicular, com o aumento das doses de Al em solução (Figura 4). Beutler et al. (2001) citam que a presença de Al em concentrações tóxicas dificulta a absorção de nutrientes e prejudica o crescimento da planta por dificultar o crescimento das raízes. A redução do comprimento da planta é um dos fatores mais evidentes da toxidez. Foy et al. (1978) relataram que o Al^{3+} acumula-se preferencialmente nas raízes das plantas, causando injúrias que são caracterizadas por efeitos na estrutura morfológica do órgão e que culminam com a diminuição do seu crescimento. A toxicidade do Al pode, ainda, resultar em lesões apoplásticas, interações na parede celular e na membrana plasmática da raiz (Dipierro et al., 2005), afetando o crescimento das raízes e, conseqüentemente, da parte aérea, uma vez que absorção de água e nutrientes é comprometida.

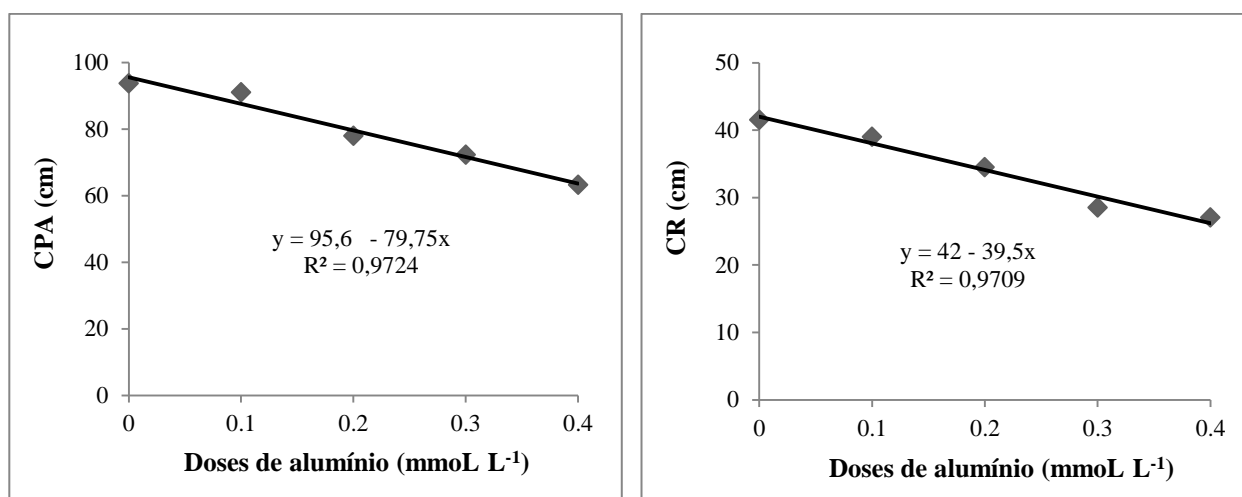


Figura 4. Comprimento de parte aérea (CPA) e de raiz (CR) de plantas de crambe, em função de doses crescentes de alumínio.

Observou-se que na dose de $0,4 \text{ mmol L}^{-1}$ ocorreu redução de 32,5 e 35% da parte aérea e na raiz, respectivamente, em relação ao controle. Resultados semelhantes foram observados por Colodetti et al. (2015). Estes autores verificaram a estagnação do crescimento inicial de plantas de crambe submetidas a altas concentrações de Al. Sintomas de redução do crescimento da planta foram identificados também em trigo (Bertan et al., 2006) e aveia (Benin et al., 2004), quando submetidas ao alumínio tóxico. Santos et al. (2010) observaram limitação no crescimento de raízes de rúcula, espécie pertencente à mesma família do crambe, a medida que se aumentava as doses de Al em solução. A absorção do Al^{3+} pelas plantas afeta as células e organelas em

nível morfológico e citogenético, prejudicando o desenvolvimento e o estabelecimento das culturas (Macedo et al., 2008; Crestani et al., 2009).

As doses crescentes de Al^{3+} afetaram negativamente o acúmulo de matéria seca da raiz (MSR) e parte aérea (MSPA) (Figura 5). Verificou-se comportamento quadrático para MSR e MSPA. No entanto, observou-se efeito mais pronunciado de redução na massa seca da parte aérea que da raiz. Na concentração de $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$, houve redução de 47,8% da parte aérea e de 4% na massa seca de raiz. Na dose mais elevada, $0,4 \text{ mmol L}^{-1}$ de Al, houve redução de 62 e 82,3% de matéria seca de raiz e de parte aérea, respectivamente, quando comparadas ao controle (Figura 5). Costa et al. (2014), trabalhando com plantas de crambe sob estresse por Al^{3+} , também observaram efeito mais pronunciado na massa de matéria seca de parte aérea (MSPA) que na da raiz (MSR). Os resultados encontrados por estes autores indicaram redução na MSPA de 77, 78 e 74% e na MSR de 46, 61 e 70%, respectivamente, nos níveis 0,1; 0,15; 0,2 mM de Al.

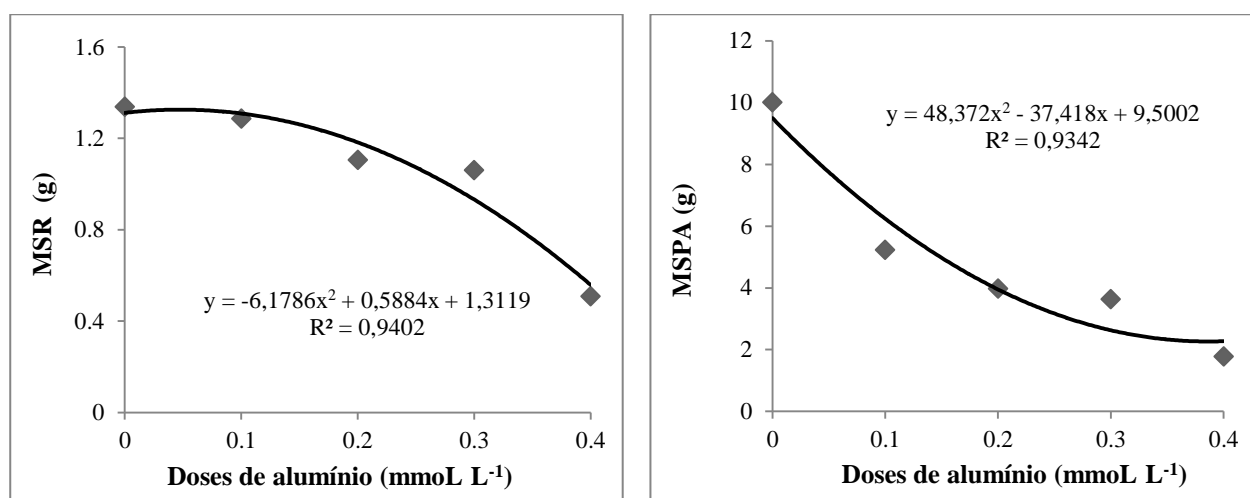


Figura 5. Produção de matéria seca de raiz (MSR) e massa seca de parte aérea (MSPA) de plantas de crambe, em função de doses crescentes de alumínio.

A diminuição na produção de biomassa está relacionada a redução no crescimento das raízes e ao transporte e uso de alguns nutrientes quando expostos a toxidez do Al^{3+} (Tabaldi et al., 2007). Santos et al. (2010), ao trabalhar com efeitos de diferentes concentrações de Al^{3+} em rúcula, observaram redução de 149,7% na massa seca de folhas, quando comparado o controle, com a dose de $60,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Al^{3+} . Com relação a massa seca de raiz, foi verificado redução de 55% no tratamento com a mesma dose em comparação ao controle.

As doses crescentes de Al^{3+} afetaram negativamente a produtividade de grãos (Figura 6). A produtividade de grãos foi reduzida abruptamente com o aumento das doses de Al^{3+} , sendo observada queda expressiva já na menor concentração aplicada. Extrapolando os dados de g planta^{-1} para kg ha^{-1} , considerando densidade de plantas de 400.000/ha, notou-se produtividade de 3075,7; 1021,0; 845,7; 409,6 e; 219,2 kg/ha , uma redução de 67; 72,5; 86,7 e 93% do peso dos grãos quando comparados ao tratamento controle.

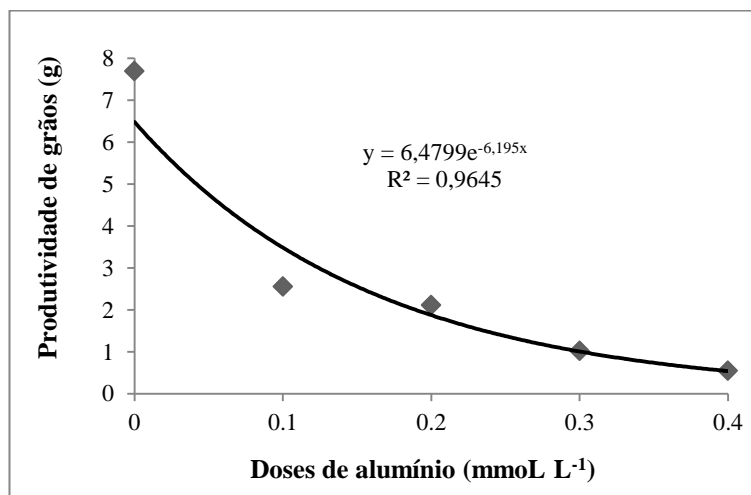


Figura 6. Produtividade de grãos (g/planta) de plantas de crambe, em função de doses crescentes de alumínio.

Mesmo com acentuado declínio de produção, verificou-se que apenas nas concentrações de 0,2; 0,3 e 0,4 mmol L^{-1} de Al foram obtidas produtividades abaixo do esperado para a cultura, de acordo com o proposto por Pitol et al. (2010).

A taxa fotossintética (TF) de plantas de crambe decresceu linearmente com o aumento das concentrações de Al^{3+} em solução (Figura 7). O valor máximo da fotossíntese foi evidenciado no tratamento controle, sem aplicação de Al. Com o aumento das doses de Al, constatou-se reduções na TF de aproximadamente 13; 48,5; 85,6 e 93%, respectivamente, nas concentrações de 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 mmol L^{-1} .

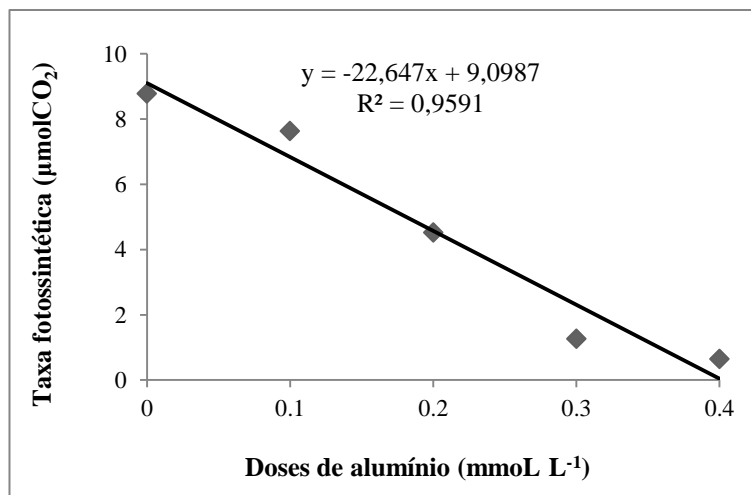


Figura 7. Taxa fotossintética ($\mu\text{mol CO}_2$) de plantas de crambe submetidas a doses crescentes de Al^{3+} .

A diminuição da atividade fotossintética pode estar relacionada tanto com fatores estomáticos como não estomáticos, influenciando nas reações bioquímicas de fixação de CO_2 (Lindon et al., 1999). Além disso, o efeito do Al pode ser expresso na redução dos pigmentos fotossintéticos, bem como, na absorção e no transporte de nutrientes, como o magnésio, principal constituinte da molécula de clorofila (Milivojevic e Stojanovic, 2003).

Os resultados de fluorescência indicaram que o Al provocou um dano real sobre o aparato fotoquímico do crambe, uma vez que a relação F_v/F_m dos tratamentos de Al, ficou abaixo de 0,80 em todas as doses de Al^{3+} aplicadas (Figura 8).

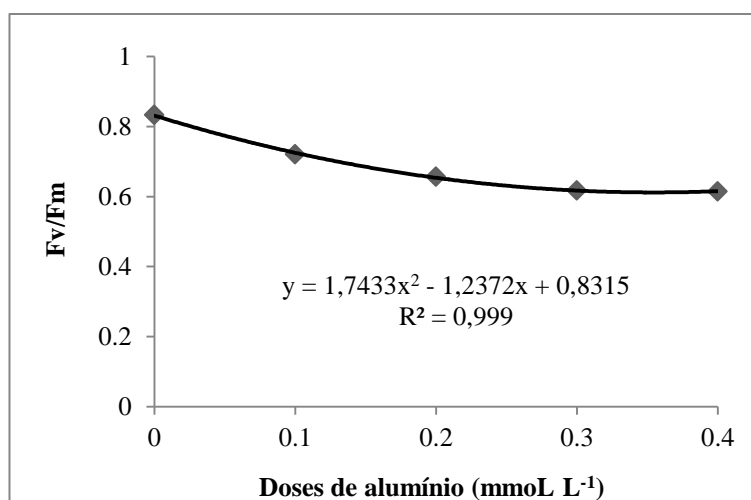


Figura 8. Estimativa da eficiência quântica máxima da atividade fotoquímica do fotossistema II (F_v/F_m) em plantas de crambe submetidas a níveis crescentes de alumínio.

Maxwell e Johnson (2000) citam que o valor considerado ótimo para a maioria das plantas encontra-se em torno de 0,8. De acordo com Baker e Rosenqvst (2004), o parâmetro F_v/F_m pode ser entendido como uma estimativa da eficiência máxima da atividade fotoquímica do FSII, quando todos os seus centros de reação estão abertos. Segundo Maxwell e Johnson (2000), valores de F_v/F_m abaixo de 0,8 indicam a existência de perturbações na maquinaria fotossintética das plantas, provavelmente associado à exposição a algum tipo de estresse. Moustakas et al. (1997), trabalhando com sensibilidade ao Al em diferentes cultivares de trigo, constataram reduções acentuadas de F_v/F_m nas plantas sensíveis. Konrad et al. (2005) verificaram que a razão F_v/F_m dos cafeeiros com Al decresceu, em média, 13% em relação aos tratamentos controles.

O rendimento quântico potencial do fotossistema II (F_v/F_m) é calculado a partir dos parâmetros de fluorescência mínima (F_o) e fluorescência máxima (F_m), sendo o fator de variação (F_v) determinado pela diferença entre F_m e F_o . (Maxwell e Johnson, 2000).

A fluorescência mínima (F_o) refere-se a fluorescência quando a quinona receptora primária de elétrons do fotossistema II (FS II) está totalmente oxidada, evidenciando que o centro de reação deste fotossistema se encontra aberto (Mouget e Tremblin, 2002). O aumento de F_o pode ser entendido como consequência da destruição do centro de reação do FSII ou diminuição na capacidade de transferência da energia de excitação da antena para o centro de reação (Baker e Rosenqvst, 2004).

Baker e Rosenqvst (2004) explicam que a fluorescência máxima (F_m), representa a intensidade máxima da fluorescência, quando praticamente toda a quinona é reduzida, fazendo com que centros de reação atinjam sua capacidade máxima de reações fotoquímicas. De acordo com Ribeiro et al. (2004), as alterações sofridas na funcionalidade das membranas dos tilacóides dos cloroplastos, quando a planta é exposta a algum tipo de estresse, provocam mudanças nas características dos parâmetros de fluorescência.

Assim, evidenciou-se que o Al provocou efeito deletério no aparato fotossintético (Figura 8), afetando drasticamente a fotossíntese (Figura 7), que culminou na redução do crescimento da raiz e parte aérea (Figura 4) e no acúmulo de matéria seca da planta (Figura 5), tendo como reflexo a queda na produtividade (Figura 6).

Entretanto, pôde-se evidenciar que mesmo na maior dose de Al^{3+} na solução, 0,4 mmol L⁻¹, as plantas completaram o seu ciclo, produzindo cerca de 219,27 kg ha⁻¹.

É importante ressaltar que, para que não houvesse precipitação de Al na solução hidropônica, o experimento foi conduzido sob pH $4,0 \pm 0,5$, com dose de P dez vezes menor que a recomendada. Sabe-se que o P é importante na agricultura por participar de vários processos metabólicos nos vegetais, como na fotossíntese e respiração, além de atuar na síntese de macromoléculas e da absorção ativa de nutrientes (Marschner, 1995). Assim, o efeito evidenciado da alta sensibilidade do crambe ao Al pode, também, ter sido potencializado pela baixa disponibilidade deste nutriente.

IV – CONCLUSÃO

O crambe se mostrou sensível ao alumínio tóxico, uma vez que foram verificados efeitos deletérios no aparato fotossintético das plantas, afetando drasticamente a fotossíntese, que culminou na redução do crescimento da raiz e parte aérea e do acúmulo de matéria seca da planta, tendo como reflexo a queda na produtividade. No entanto, mesmo na maior dose de Al^{3+} , o crambe conseguiu completar seu ciclo, não sendo constatada morte de nenhuma planta.

A produtividade da cultura pode ter sido influenciada pela baixa disponibilidade de fósforo em solução, sendo recomendada a realização de novos trabalhos que minimizem este efeito.

V – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIOVE – Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (2016) – Disponível em <http://www.abiove.org.br/>. Acessado em 12/11/2016.
- AKAYA, M.; TAKENAKA, C. Effects of aluminum stress on photosynthesis of *Quercus glauca* Thunb. **Plant and Soil**, London, v.237, p.137-146, 2001.
- BAKER, N.R.; ROSENQVIST, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.55, p.1607-1621, 2004.
- BENIN, G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; SILVA, J.A.G.; LORENCETTI, C.; MAIA, M.B.; MARCHIORO, V.S.; FREITAS, F.; HARTWIG, I. Uma proposta de seleção para caracteres quantitativos e qualitativos em aveia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p. 701-706, 2004.

- BEUTLER, A.N.; FERNANDES, L.A.; FAQUIN, V. Efeito do alumínio sobre o crescimento de duas espécies florestais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p.923-928, 2001.
- BRACCINI, M. C. L., MARTINEZ, H. E. P., PEREIRA, P. R. G., SAMPAIO, N. F., e PEREIRA, A. A.. (1998). Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva. II. Teores de P, Ca e Al e eficiência ao P e Ca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22,n.3, p.443-450.
- BERTAN I.; CARVALHO F.I.F.; OLIVEIRA A.C.; SILVA J.A.G.; BENIN G.; VIEIRA E.A.; SILVA G.O.; HARTWIG I.; VALERIO I.P. & FINATTO T. (2006) Dissimilaridade genética entre genótipos de trigo avaliados em cultivo hidropônico sob estresse por alumínio. **Bragantia**, v. 65, p.55-63.
- BROCH, D. L.; ROSCOE, R. Fertilidade do solo, adubação e nutrição do crambe. In: FUNDAÇÃO MS. **Tecnologia e produção: crambe 2010**. Maracajú: FUNDAÇÃO MS, v. 1, p. 22-36, 2010.
- COLODETTI T.V.; MARTINS L.D.; RODRIGUES W.N.; BRINATE S.V.B.; M.A. (2012). Crambe: Aspectos Gerais da Produção Agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia v. 8, n.14, p.258-269.
- COLODETTI, T.V.; RODRIGUES W.N; DELEON M., TOMAZ M.A.. Aluminum stress in Crambe abyssinica Hochst. **Idesia**[online]. 2015, vol.33, n.2.
- COLTRO-RONCATO, S.; STANGARLIN, J.R. ; GONÇALVES JR, A.C. ; KUHN, O.J.; GONÇALVES, E.D.V.; DILDEY, O.D.F.; FLORES, E.L.M. Atividade nematicida de extratos de crambe sobre *Meloidogyne* spp. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 37, n. 4, p. 1857-1870, jul./ago. 2016.
- COSTA, D.P.; COSTA-JÚNIOR, D.S.; HORA, V.M.; ABREU, C.B.; AZEVEDO NETO, A.D. O estresse por alumínio afeta o crescimento e acúmulo de NPK em plantas de crambe? **Enciclopédia Biosfera**, v.10, p.1359-1366, 2014.
- CRESTANI, M.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; SILVA, J.A.G.; SOUZA, V.Q.; PARACHU, E.A.M.; SILVEIRA, G.; RIBEIRO, G.; LUCHE, H.S. Estresse por alumínio em genótipos de aveia preta em condição hidropônica. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.639-649, 2009.
- CUSTÓDIO, C.C.; BOMFIM, D.C.; SATURNINO, S.M.; MACHADO NETO, N.B. Estresse por alumínio e por acidez em cultivares de soja. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, n.1, p.145-153, 2002.

- DIAS, L.A.S. Biofuel plant species and the contribution of genetic improvement. **Crop breeding and applied biotechnology**, Viçosa , v. 11, n. S, p. 16-26, June 2011.
- DIPIERRO, N.; MONDELLI, D.; PACIOLLA, C.; BRUNETTI, G.; DIPIERRO, S. Changes in the ascorbate system in the response of pumpkin (Cucurbita pepo L.) roots to aluminum stress. **Journal of Plant Physiology**, v.162, p.529-536, 2005.
- FERREIRA, R.P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J.B. **Toxidez de alumínio em culturas**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006.
- FALASCA, S.L.; LAMAS, M.C.; CARBALLO, S.M.; ANSCHAU, A. Crambe abyssinica: An almost unknown crop with a promissory future to produce biodiesel in Argentina. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.35, p.5808-5812, 2010.
- FOY, C.D. Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19, p. 959-987, 1998.
- FOY, C. D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Boca Raton, v.29, p.511-566, 1978.
- HOAGLAND, D. R., ARNON, D. I., . The water culture method for growing plants without soil. **California Agricultural Experimental Station**, v.347, n.1, p.1-39, 1950.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.46, p.237-260, 1995.
- KONRAD M.L.F.; DA SILVA J.A.B.; FURLANI P.R.; MACHADO E.C. Gas exchange and chlorophyll fluorescence in six coffee cultivars under aluminum stress. **Bragantia**, v.64, n.3, p.339-347, 2005.
- LAZZERI L., DE MATTEI F., BUCELLI F., PALMIERI S. Crambe oil – a potencial new hydraulic oil and quenchant. *Ind. Lubrication Tribol*, v.49, p.71-77, 1997.
- LINDON, F.C.; RAMALHO, J.C.; BARREIRO, M.G.; LAURIANO, J.A. Modulation of photosystem 2 reactions mediated by aluminium toxicity in *Zea mays*. **Photosynthetica**, Prague, v.34, p.151-156, 1999.
- LINDSAY, W. L.; WALTHALL, P. M. The solubility of Aluminum in Soils. In: SPOSITO, G. (Ed.) **The Environmental Chemistry of Aluminum**. Boca Raton: CRC Press, 1996. p. 333-361.

- MACEDO, C.M.P.; LOPES, J.C.; AMARAL, J.A.T.; FONSECA A.F.A. Germinação e vigor de sementes de café submetidas ao estresse com alumínio. **Scientia Agraria**, v.9, n.2, p.235-239, 2008.
- MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R. Eficiência de conversão e coeficiente de manutenção da planta inteira, das raízes e da parte aérea em milho e arroz submetidos ao estresse de Al. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.25, p.845-855, 1990.
- MARSCHNER, H.; Mineral nutrition of higher plants. **London: Academic Press**, 1995. 889p.
- MAXWELL, K., AND JOHNSON, G.N., Chlorophyll fluorescence a practical guide. **Journal of Experimental Botany**. 51, p.659-668, 2000.
- MENDONÇA, B.P.C. **Coproducto do crambe na alimentação de bovinos**. 2012. 58f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2012.
- MILIVOJEVIC, D.B.; STOJANOVIC, D.D. Role of calcium in aluminum toxicity on content of pigments and pigment-protein complexes of soybean. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, n. 2, p. 341-350, 2003.
- MOUGET, J.; TREMBLIN, G. Suitability of the fluorescence monitoring system (FMS, Hansatech) for measurement of photosynthetic characteristics in algae. **Aquatic Botany**, v.74, p.219-231, 2002.
- MOUSTAKAS, M.; ELEFThERIOU, E.P.; OUZOUNIDOU, G. Short-term effects of aluminum at alkaline pH on the structure and function of the photosynthetic apparatus. **Photosynthetica**, Prague, v.34, p.169-177, 1997.
- MOUSTAKA, M; OUZOUNIDOU, G.; LANNOYER, R. Indirect effects of aluminum stress on function of the photosynthetic apparatus. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v.34, p.553-569, 1996.
- PANDA, S.K. et al. Aluminum stress signaling in plants. **Plant Signaling & Behavior**, Georgetown, v. 4, p. 592-597, 2009.
- PEIXOTO, P.H.P.; DA MATTA, F.M.; CAMBRAIA, J. Responses of the photosynthetic apparatus to aluminum stress in two sorghum cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.25, p.821-832, 2002.
- PEREIRA, W.E.; SIQUEIRA, D.L.; MARTINEZ, C.A.; PUIATTI, M. Gas exchange and chlorophyll fluorescence in four citrus rootstocks under aluminium stress. **Journal of Plant Physiology**, v.157, p.513-520, 2000.

- PITOL, C.; BROCH, D. L.; ROSCOE, R. **Tecnologia e Produção: Crambe 2010**. Maracaju: Fundação MS, 60p. 2010.
- RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C.; OLIVEIRA, R.F. Growth and leaf emperature effects on photosynthesis of sweet orange plants infected with *Xylella fastidiosa*. **Plant Pathology**, Oxford, v.53, p. 334-340, 2004.
- RUBIO F.; GONÇALVES JR., A. C.; DRANGUNSKI, D. C.; TARLEY, C. R. T.; MENEGHEL, A. P.; SCHWANTES, D. A *Crambe abyssinica* seed by-product as biosorbent for lead(II) removal from water. **Desalination And Water Treatment**, Vol. 53 , Iss. 1, 2015.
- SILVA M.A.P.; BIAGGIONI M.A.M.; SPEROTTO F.C.S.; BEZERRA P.H.S.; BRANDÃO F.J.B. Qualidade do oleo bruto de grãos de crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) sob diferentes métodos de secagem. **Energia na Agricultura**, Botucatu. v.28, n.3, p.193-199, 2013.
- SANTOS, C. A. C. dos; ALMEIDA, J. de; SANTOS, A. R. dos; VIEIRA, E. L.; PEIXOTO C. P.; Rúcula em Cultivo Hidropônico Submetida a Diferentes Concentrações de Alumínio. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 6, p. 905-912, 2010.
- SOUZA, A. D. V.; FÁVARO, S. P.; ÍTAVO, L. C.; ROSCOE, R. Caracterização química de sementes e tortas de pinhão manso, nabo-forrageiro e crambe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1328-1335, 2009.
- TABALDI, L.A.; NICOLOSO, F.T.; CASTRO, G.Y.; CARNEGLUTTI, D.GONÇALVES, J. F.; RAUBER, R.; SKREBSKY, E.C.; SCHETINGER, M.R.C.; MORSCH, V.M.; BISOGNIN, D.A. Physiological and oxidative stress responses of four potato clones to aluminum in nutrient solution. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, p.211-222, 2007.
- TOEBE, M.; BRUM, B.; LOPES, S. J.; et al. Estimativa da área foliar de Crambe abyssinica por discos foliares e por fotos digitais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.2, p.475-478. 2010.
- VIEIRA, M. D. MAPAS TEMÁTICOS DE TEORES DE ALUMÍNIO E RENDIMENTO DE GRÃOS NA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe abyssinica*) EM LATOSSOLO ARGILOSO. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v.02, n.08 , 2013.
- WEISS, E. A. **Oilseed Crops**, Tropical Agriculture Series. Longman, New York, 1983. 660p.