



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E ENERGIAS RENOVÁVEIS

LUNA LEITE SIDRIM

**CRESCIMENTO DE PLANTAS EM SOLOS E ESTÉREIS DE ÁREA DE
MINERAÇÃO DE FERRO**

BELÉM

2019

LUNA LEITE SIDRIM

**CRESCIMENTO DE PLANTAS EM SOLOS E ESTÉREIS DE ÁREA DE
MINERAÇÃO DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Energias Renováveis da Universidade Federal Rural da Amazônia como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Energias Renováveis.

Orientador: Dr. Alysson Roberto Baizi e Silva

BELÉM

2019

Sidrim, Luna Leite

Crescimento de Plantas em Solos e Estéreis de Área de Mineração de Ferro / Luna Leite Sidrim. – Belém, 2019.

49 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Energias Renováveis) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2019.

Orientador: Dr. Alysson Roberto Baizi e Silva.

1. Recuperação de Áreas Degradadas. 2. Minério de Ferro – Impactos Ambientais. 3. Revegetação. 4. Substratos para Vegetação. 5. Algodoeiro. 6. Soja. I. Silva, Alysson Roberto Baizi e (orient.) II. Título.

LUNA LEITE SIDRIM

**CRESCIMENTO DE PLANTAS EM SOLOS E ESTÉREIS DE ÁREA DE
MINERAÇÃO DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Energias Renováveis, para a obtenção do título de Bacharel.

Data da Aprovação

Banca Examinadora:

Dr. Alysson Roberto Baizi e Silva (Orientador)

Embrapa Amazônia Oriental

Prof^a Dra. Suzana Romeiro Araújo

Universidade Federal Rural da Amazônia

Prof^a Dra. Vania Neu

Universidade Federal Rural da Amazônia

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão. Obrigada por todo o apoio e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças e me acalmado durante mais essa etapa da vida. Além das diversas bênçãos e oportunidades concedidas, Ele colocou pessoas maravilhosas ao meu lado para percorrer essa jornada comigo.

Aos meus pais, Janet e Mauro, e ao meu irmão Pedro, agradeço imensamente pelo carinho, compreensão e apoio que vocês sempre me deram. Obrigada por sempre acreditarem em mim e me incentivarem a lutar pelos meus sonhos e objetivos. Sem vocês, eu nunca teria chegado até aqui.

Agradeço às Kates, que festejaram comigo quando eu ingressei na universidade, me apoiaram durante todo o curso e agora estão vendo eu me formar. A amizade e apoio de vocês durante esses anos foi essencial para essa conquista.

Às minhas irmãs do CIK, Alicia, Carol, Isabela, Joyce, Mayara, Mayumi, Renata e Yumi, que sempre estiveram ao meu lado e foram o meu refúgio quando eu mais precisei. Vocês são a minha força e cada momento juntas me fez acreditar que tudo seria possível.

Aos meus amigos Camille, Fernanda, Isabela, Letícia, Maria Luisa, Naiane e Paulo, esses 5 anos não teriam sido os mesmos sem vocês. Agradeço imensamente pela amizade e companheirismo, pelos estudos em grupo e pelos encontros descontraídos. Tenho certeza que será para sempre.

Agradeço especialmente à minha amiga Fernanda Vale, que não só me ajudou no preparo e condução dos experimentos e análises, mas também foi meu apoio diário, me incentivando e me dando forças para chegar até o fim. Obrigada por tudo.

Ao meu orientador, Dr. Alysson Roberto Baizi e Silva, por disponibilizar o uso de parte dos resultados de uma série de experimentos para o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. Obrigada principalmente pela paciência e incentivos durante o período de orientação. Vou levar seus ensinamentos e a experiência adquirida para o resto da vida.

Ao Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS), pelo suporte financeiro e fornecimento dos substratos usados nos experimentos.

Ao convênio de cooperação técnica entre ITV DS, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e Fundação de Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa (Fadesp), pela concessão da bolsa.

À Juparanã, Paragominas, PA, pelo fornecimento das sementes de soja.

Ao Dr. Camilo de Lelis Morello, pesquisador da Embrapa Algodão, pelo fornecimento das sementes de algodoeiro.

Aos senhores Celso Marilson da Mota Brito, Getúlio Vieira de Souza e Reginaldo Carvalho Freitas, assistentes de pesquisa da Embrapa Amazônia Oriental, pelo auxílio na condução e avaliação dos experimentos.

Ao Dr. Vinícius Ide Franzini, pesquisador da Embrapa Amazônia Oriental, pelo auxílio na condução e avaliação dos experimentos.

Por fim, estendo meus agradecimentos a todas as pessoas que participaram direta ou indiretamente do processo de realização deste trabalho.

RESUMO

O êxito na recuperação de área degradada por mineração de ferro está relacionado com a capacidade do substrato em favorecer o crescimento das plantas empregadas na revegetação. O objetivo deste trabalho foi identificar substratos de área de mineração de ferro mais favoráveis ao crescimento vegetal. Dois experimentos independentes foram realizados em casa de vegetação. Os tratamentos em ambos os experimentos foram quatro substrato de área de mineração de ferro [solo de floresta (SF), solo de canga (SC), estéril amarelado (EA) e estéril avermelhado (EV)] e dois substratos de referência para agricultura [Argissolo Amarelo Distrófico abruptico, A moderado, textura arenosa/média, caulínítico (PA_{ref}) e Latossolo Amarelo Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, gibbsítico-oxídico (LA_{ref})]. Esses substratos não receberam qualquer tipo de insumo para melhoria de suas características originais. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com seis repetições. Os experimentos foram conduzidos com espécies vegetais diferentes. Em um deles foi usada soja [*Glycine max* (L.) Merr. cv. M8644 IPRO RR], e no outro, o algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L. cv. BRS 372). Essas plantas cultivadas foram escolhidas porque elas poderiam indicar com mais rapidez e segurança os melhores substratos, uma vez que elas apresentam padrões de crescimento bem mais conhecidos do que os de espécies nativas destinadas à revegetação de áreas mineradas para extração de ferro. Foi avaliada a emergência da soja e do algodoeiro aos 10 e 20 dias após a semeadura (DAS), respectivamente. Foram avaliados também o diâmetro da base do caule, a altura da planta, o número de folhas e a matéria seca da parte aérea e da raiz da soja e do algodoeiro aos 30 e 60 DAS, respectivamente. Houve baixa emergência de plântulas de ambas as espécies no SC e no EA e todas as plântulas emergidas, nesses substratos, morreram antes da avaliação de crescimento. Considerando todas as medidas de crescimento, as plantas cresceram mais no SF em relação ao EV. Portanto, o SF foi um substrato mais adequado do que o EV. A ocorrência de substratos com características favoráveis e desfavoráveis para as plantas sugere que eles devam ser previamente avaliados, visando a seleção daqueles mais adequados ao processo de revegetação.

Palavras-chave: Algodoeiro. Área Degradada. Revegetação. Soja. Substratos Minerais.

ABSTRACT

Success in reclamation of a degraded area by iron ore mining is related to the capacity of the substrate to favor growth of plants used in revegetation. This work aimed to identify substrates of iron mining area more favorable to plant growth. Two independent experiments were conducted in a greenhouse. The treatments in both experiments consisted of four substrates from iron mining area [forest soil (SF), canga soil (SC), yellowish overburden (EA) and reddish overburden (EV)] and two reference substrates for agriculture [*Argissolo Amarelo Distrófico abruptico, A moderado, textura arenosa/média, caulínico* (PA_{ref}) and *Latossolo Amarelo Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, gibbsítico-oxídico* (LA_{ref})]. None input were added to these substrates to improve their original properties. The experiment was arranged in a completely randomized block design with six replications. Different species were used in each experiment. In one of them was used soybean [*Glycine max* (L.) Merr. cv. M8644 IPRO RR] and in the other was used cotton (*Gossypium hirsutum* L. cv. BRS 372). These cultivated plants were chosen because they could indicate with more quickness and reliability the best substrates. This is possible since these plants have growth patterns more known than those of native species destined to revegetation of areas mined due to iron extraction. Soybean and cotton emergence were evaluated at 10 and 20 days after sowing (DAS), respectively. Base stem diameter, plant height, number of leaves and dry matter of shoot and root of soybean and cotton were also evaluated at 30 and 60 DAS, respectively. There was low seedling emergence of both species in SC and EA, and all emerged seedlings in these substrates died before growth evaluation. Considering all growth measurements, soybean and cotton grew more in SF than in EV. Therefore, SF was more suitable substrate than EV. The occurrence of substrates with favorable and unfavorable properties for plants suggests that they should be evaluated beforehand, aiming selection of those more appropriate to revegetation process.

Keywords: Cotton. Degraded Land. Mineral Substrates. Revegetation. Soybean.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Áreas de seleção dos substratos	22
Figura 2 – Semeadura de algodoeiro	25
Figura 3 – Lavagem das raízes de plantas de soja.....	26
Figura 4 – Moagem da parte aérea de plantas de soja em moinho tipo Wiley.....	27
Figura 5 – Emergência de plântulas de soja e algodoeiro crescidas em substratos minerais com características contrastantes. DAS: dias após a semeadura. As médias \pm DP (desvio padrão) para algodoeiro são valores convertidos para a escala original de dados transformados $\sqrt{x + 0,5}$. A linha sobre cada coluna representa o DP. Letras diferentes sobre as colunas para cada espécie vegetal indicam diferente significativa pelo teste DMS ($P < 0,05$)	29
Figura 6 – Colapso do hipocótilo de plântula de algodoeiro (vide seta).....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos químicos e físicos dos substratos usados nos experimentos.....	24
Tabela 2 – Atributos de crescimento de plantas de soja (30 DAS) e de algodoeiro (60 DAS) crescidas em substratos minerais com características contrastantes. Valores são médias \pm DP ($n = 6$)	33
Tabela 3 – Matéria seca da parte aérea e da raiz e razão parte aérea:raiz de plantas de soja e de algodoeiro crescidas em substratos minerais com características contrastantes. Valores são médias \pm DP ($n = 6$).....	36
Tabela 4 – Concentração de nutrientes e alumínio na parte aérea de plantas de soja crescidas em substratos minerais com características contrastantes. Valores são médias \pm DP (n)	38
Tabela 5 – Concentração de nutrientes e alumínio na parte aérea de plantas de algodoeiro crescidas em substratos minerais com características contrastantes. Valores são médias \pm DP (n)	40
Tabela 6 – Coeficiente de correlação de Pearson entre variáveis obtidas para plantas de soja	43
Tabela 7 – Coeficiente de correlação de Pearson entre variáveis obtidas para plantas de algodoeiro	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de variância

CTC – Capacidade de troca de cátions

D_a – Densidade aparente

DAE – Dias após a emergência

DAS – Dias após a semeadura

DMS - Diferença mínima significativa

EA – Estéril amarelado

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EV – Estéril avermelhado

LA_{ref} – Latossolo de referência

m – Saturação por alumínio

MSPA – Matéria seca da parte aérea

MSR – Matéria seca da raiz

PA_{ref} – Argissolo de referência

PIB – Produto Interno Bruto

PRAD – Plano de Recuperação de Áreas Degradadas

Pt – Porosidade total

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

SB – Soma de bases

SC – Solo de canga

SF – Solo de floresta

TFSA – Terra fina seca ao ar

V – Saturação por bases

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 Mineração de ferro: importância e impactos ambientais	17
3.2 Recuperação de áreas degradadas pela mineração: revegetação	17
3.3 Substratos para revegetação.....	18
3.4 Seleção de substratos	19
4 MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 Tratamentos e delineamento experimental	21
4.2 Seleção e caracterização dos substratos minerais.....	21
4.3 Instalação e condução dos experimentos	23
4.4 Avaliações	25
4.4.1 Emergência	25
4.4.2 Medidas de crescimento	26
4.5 Análises estatísticas	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1 Emergência.....	28
5.2 Medidas de crescimento	31
5.2.1 Diâmetro da base do caule.....	31
5.2.2 Altura da planta	34
5.2.3 Número de folhas	35

5.3 Matéria seca da parte aérea e raiz	35
5.4 Correlações.....	42
6 CONCLUSÃO.....	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A atividade de mineração de ferro no Brasil é de grande importância socioeconômica para o País. No entanto, ela gera impactos ambientais importantes, entre os quais estão a perda da vegetação nativa e a mudança na topografia local (CASTRO; NALINI JÚNIOR; LIMA, 2011).

Nesse contexto, as áreas degradadas por atividade de mineração no Brasil deverão ser recuperadas conforme o Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD), cuja exigência legal está prevista no Decreto n. 97.632, de 10 de abril de 1989 (BRASIL, 1989).

As diretrizes para elaboração do PRAD estão contidas na NBR 13030 (ABNT, 1999). Nessa norma, um dos itens que devem constar no PRAD refere-se à revegetação, ou seja, ao estabelecimento de cobertura vegetal na área degradada. Apesar de existirem instruções para revegetação de áreas degradadas (IBAMA, 1990), estas são consideradas genéricas e, em determinados casos, não abrangem aspectos científicos, dada a escassez de pesquisas no tema.

Uma das questões que sempre geram dúvida é qual tipo de substrato empregar na revegetação (KÄMPF; SCHNEIDER; GIASSON, 1997). Na área de mineração, há solos e estéreis que podem servir de substrato para o crescimento de plantas em área a ser revegetada. Embora os solos sejam naturalmente considerados os substratos preferenciais, nem sempre eles estão em quantidade suficiente. Por isso, os estéreis também deverão ser empregados no processo.

Os solos tendem a proporcionar condições mais adequadas para o estabelecimento de plantas em relação aos estéreis de mineração (SILVA et al., 2006). Além disso, dentro de cada tipo de substrato também pode haver materiais mais apropriados do que outros. Assim, a seleção prévia de substratos para revegetação de áreas degradadas por atividade de mineração de ferro é importante na medida em que o substrato é um dos fatores determinantes para o sucesso da implementação do PRAD.

Toda essa diversidade precisa ser adequadamente avaliada na busca de substratos que tornem o processo de recuperação de áreas degradadas por mineração mais efetivo e menos dependente de insumos, como calcário e fertilizantes, fazendo com que a operação seja executada com o menor custo possível.

Estudos desenvolvidos para seleção de substratos mais apropriados para revegetação são escassos. Além disso, os resultados experimentais existentes são específicos da mina da

qual os substratos foram retirados, o que denota a necessidade de estudos no tema para a mina de interesse.

Trabalhos dessa natureza conduzidos em casa de vegetação são necessários, uma vez que neles é possível ter maior controle sobre as condições ambientais e, assim, selecionar com mais rigor os substratos. Outro aspecto interessante é o uso de plantas cultivadas nos experimentos, uma vez que elas apresentam padrões de crescimento bem mais conhecidos do que os de espécies nativas destinadas à revegetação de áreas mineradas. Desse modo, elas poderão indicar com maior segurança os melhores substratos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi identificar substratos de área de mineração de ferro passíveis de revegetação que sejam mais favoráveis ao crescimento de plantas, empregando-se como plantas-teste a soja e o algodoeiro.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a emergência de plântulas, diâmetro da base do caule, altura da planta, número de folhas e matéria seca da parte aérea e da raiz da soja e do algodoeiro em diferentes substratos de área de mineração de ferro, sem qualquer melhoria em suas características originais.
- Apontar possíveis limitações dos substratos para o estabelecimento de plântulas e para o crescimento das plantas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Mineração de ferro: importância e impactos ambientais

A atividade de mineração no Brasil é de grande importância socioeconômica para o País, devido à sua influência nas exportações, no Produto Interno Bruto (PIB) e na geração de empregos. Segundo IBRAM (2018a), os produtos minerais representaram 13% do volume total das exportações brasileiras em 2017. No mesmo ano, somente o setor de extração mineral contribuiu com 1,4% do PIB, além de gerar 180 mil empregos diretos (IBRAM, 2018a) e inúmeros empregos indiretos, tanto nos empreendimentos de mineração como nas indústrias de transformação de produtos de origem mineral (ARAÚJO; OLIVIERI; FERNANDES, 2014).

A mineração de ferro responde por grande parte desses benefícios, já que representa quase a totalidade da produção e exportação mineral brasileira. Em 2017, o minério de ferro contribuiu com cerca de 90% da quantidade produzida e 95% do volume mineral exportado (IBRAM, 2018b). Essa representatividade se deve basicamente à enorme reserva de minério de ferro de alto teor existente no território brasileiro, estimada em 20 bilhões de toneladas, à facilidade de lavra das jazidas e aos baixos custos de produção (FERREIRA, 2001).

Apesar da sua importância socioeconômica, a mineração de ferro, como qualquer outra atividade de mineração, gera impactos ambientais. Alguns dos mais importantes foram sumarizados por Castro, Nalini Júnior e Lima (2011) e são apresentados a seguir. O primeiro e mais evidente impacto é a perda da vegetação nativa, decorrente da retirada da cobertura vegetal da área a ser minerada. Outro grande impacto consiste na modificação da topografia local, devido à abertura da cava de mineração e à formação de pilhas de estéril e de rejeito.

Como resultado dessas duas alterações na paisagem, outros impactos subsequentes podem surgir, tais como (i) intensificação da erosão, com possibilidade de assoreamento e contaminação de cursos de água, (ii) mudança hidrológica local, devido ao rebaixamento do lençol freático, necessário para exploração de minério em profundidade, (iii) alteração na qualidade do ar, em razão da emissão de partículas finas pela ação do vento sobre o terreno minerado e as pilhas de estéril e de rejeito, (iv) entre outros. Devido à gravidade desses impactos, a recuperação ambiental da área de mineração é uma exigência legal.

3.2 Recuperação de áreas degradadas pela mineração: revegetação

O Decreto n. 97.632, de 10 de abril de 1989, determina que os empreendimentos de mineração devam apresentar, junto com o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório

do Impacto Ambiental (RIMA), o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) (BRASIL, 1989). O PRAD, como o próprio nome sugere, consiste em um plano detalhado para recuperar áreas degradadas. Tal plano deve atender à norma NBR 13030 (ABNT, 1999), que prevê, entre outras técnicas de recuperação, a revegetação da área degradada com predominância de espécies vegetais nativas locais.

O uso de tais espécies é essencial na revegetação de áreas degradadas pela mineração de ferro, uma vez que nas regiões ferríferas, como Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, e Serra dos Carajás, no estado do Pará, existe enorme diversidade de plantas, algumas endêmicas e ameaçadas de extinção (JACOBI et al., 2007; ZAPPI, 2017), que precisam ser conservadas ao mesmo tempo em que a mineração avança.

3.3 Substratos para revegetação

Além da escolha correta das espécies vegetais para que a revegetação seja eficaz, a seleção dos substratos mais adequados também é essencial para o sucesso da recuperação da área degradada.

Em geral, recomenda-se como substrato a camada superficial dos solos retirados de áreas onde houve escavação (IBAMA, 1990). A camada superficial do solo, chamada comumente de *topsoil* no meio da mineração, pode ter características muito diferentes de um solo para outro. O problema é que *topsoils* com características limitantes ao crescimento vegetal podem dificultar, encarecer ainda mais ou até mesmo impedir a revegetação. A insuficiência de *topsoil* para cobrir todas as áreas e a dificuldade de fixá-lo em terrenos inclinados (e.g., taludes) são problemas adicionais. Nesses casos, a revegetação deverá ser realizada diretamente no terreno minerado ou nas pilhas de estéreis¹ e de rejeitos² de mineração.

Estudos realizados no Brasil sobre a influência do tipo de substrato na revegetação de áreas mineradas devido à extração de ferro são escassos e incipientes. No trabalho de Silva et al. (1995), rejeito de minério de ferro foi comparado com solo sobreposto ao rejeito em experimento de vasos em casa de vegetação. Os autores observaram que não houve diferença significativa ($P > 0,05$) entre os dois substratos para a massa de matéria seca da parte aérea de *Brachiaria decumbens*, indicando que a colocação de material de solo sobre o rejeito não resultaria em melhoria da revegetação. Por outro lado, Silva et al. (2006) verificaram que diferentes espécies vegetais [capim-braquiária (*Urochloa brizantha*), capim-gordura (*Melinis*

¹ Material geológico sem valor econômico atual sobrejacente ao depósito do minério.

² Subproduto do beneficiamento do minério.

minutiflora), capim-vencedor (*Urochloa maxima*) e guandu (*Cajanus cajan*)] produziram mais matéria seca da parte aérea no solo em relação ao estéril (rocha).

3.4 Seleção de substratos

Nas áreas de mineração de ferro, existem diversos substratos que podem ser utilizados posteriormente para recuperação da área, a exemplo de *topsoil* e de estéreis. Esses substratos minerais apresentam características contrastantes entre si e, por isso, proporcionam diferentes condições para o crescimento das plantas.

Estudos em minas de carvão no Sul do Brasil já em processo de revegetação apontam a grande influência dos substratos sobre o crescimento das plantas. Campos, Almeida e Souza (2003) verificaram que a recuperação de diferentes áreas foi dificultada pela escolha inadequada dos substratos, os quais sofreram com a elevada acidificação do terreno causada pela oxidação da pirita. Resultado semelhante foi observado por Quinões et al. (2008), os quais notaram que a elevada densidade dos substratos também restringiu a revegetação.

Entre as principais características dos substratos de mineração, os teores de Ca e Mg trocáveis geralmente são muito baixos. Essa baixa disponibilidade pode levar as plantas a situações de deficiência. No caso do Ca, a carência desse nutriente afeta principalmente as raízes, limitando o seu crescimento. Além disso, também se observa sintomas de deficiência nas folhas e tecidos mais jovens da planta, os quais podem apresentar aspecto gelatinoso na ponta das folhas e, dependendo da severidade da deficiência, acarretar na morte dos pontos de crescimento. Já para o Mg, os sintomas de deficiência desse nutriente são observados nas folhas mais velhas, as quais adotam uma coloração amarelada, bronzeada ou avermelhada e as nervuras das folhas continuam verdes (VITTI; LIMA; CICARONE, 2006).

Para evitar o fracasso da revegetação, Kämpf, Schneider e Giasson (1997) ressaltam a necessidade de selecionar previamente os substratos para recuperação de áreas degradadas por mineração. Em seu estudo em mina de carvão, os autores observaram que a morfologia e composição mineralógica dos substratos utilizados ocasionaram intensas alterações químicas no terreno, as quais restringiram o desenvolvimento da vegetação com o passar dos anos. Diante disso, considerando a ampla variedade de substratos disponíveis na mina e a especificidade de cada um deles, é viável a seleção prévia dos materiais mais adequados a serem utilizados para revegetação da área minerada.

A escolha de substratos adequados é essencial pois, além de viabilizar o sucesso da revegetação, auxilia na redução de gastos com insumos, como calcário e fertilizantes. Apesar

da grande importância, ainda não foram desenvolvidos trabalhos que tratam da seleção de substratos para revegetação de áreas de mineração de ferro. Tais pesquisas são dificultadas pela falta de métodos simples e rápidos para a seleção de substratos que favoreçam o crescimento vegetal. Experimentos com plantas cultivadas podem indicar com mais rapidez e segurança os melhores substratos, pois apresentam padrões de crescimento bem mais conhecidos do que os de espécies nativas destinadas à revegetação de áreas mineradas para extração de ferro.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Tratamentos e delineamento experimental

Dois experimentos independentes foram conduzidos em casa de vegetação na Embrapa Amazônia Oriental, em Belém, PA, cada um com uma espécie vegetal diferente. Os experimentos foram idênticos em termos de tratamentos, repetições e delineamento. Os tratamentos foram seis substratos minerais com características contrastantes entre si, que consistiram em amostras de dois solos e dois estéreis de área de mineração de ferro e de dois solos de referência para agricultura. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com seis repetições. Cada experimento teve 36 unidades experimentais.

4.2 Seleção e caracterização dos substratos minerais

Os solos e os estéreis de área de mineração de ferro foram selecionados no Complexo S11D da Vale, localizado no município de Canaã dos Carajás, estado do Pará (Figura 1). Os solos eram muito diferentes entre si. Um deles era profundo e bem desenvolvido, como um Latossolo (EMBRAPA, 2018), e estava coberto por uma floresta no entorno da mina de ferro. Por isso, ele foi denominado de solo de floresta (SF). O outro solo era raso (espessura em torno de 10 cm) e pouco desenvolvido, sua vegetação era rala como a de cerrado (i.e., campo rupestre), e também estava no entorno da mina. Seu material de origem era uma crosta endurecida rica em ferro chamada de canga, e por isso ele foi denominado de solo de canga (SC). Os estéreis consistiram em material saprolítico e foram denominados de estéril amarelado (EA) e estéril avermelhado (EV), que são os mais abundantes na mina.

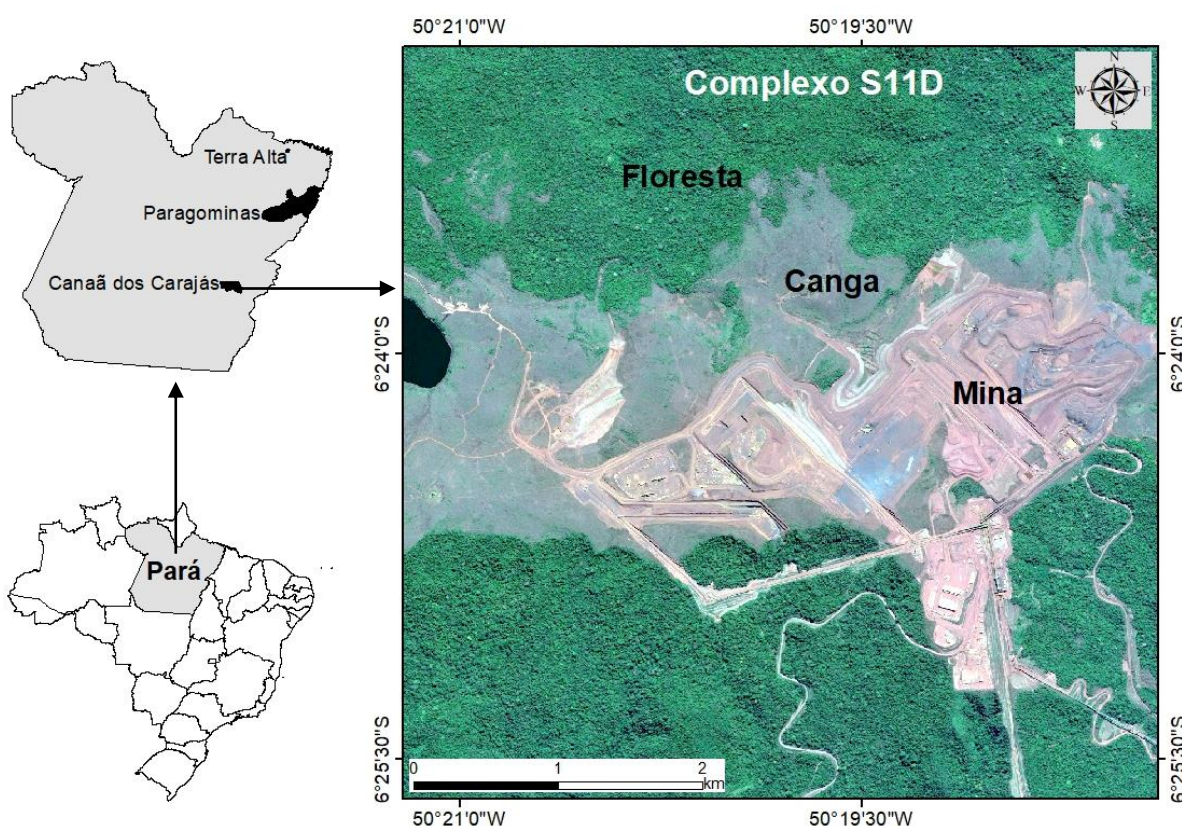
Os solos de referência para agricultura foram um Argissolo Amarelo Distrófico abrupto, A moderado, textura arenosa/média, caulinítico (PA_{ref}), situado no município de Terra Alta, e um Latossolo Amarelo Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, gibbsítico-oxídico (LA_{ref}), situado no município de Paragominas. Esses solos estão em área de floresta fora da zona de influência da área de mineração de ferro e os municípios estão localizados em importantes regiões agrícolas do estado do Pará. Os solos foram classificados conforme Embrapa (2018).

Foram coletadas amostras da camada superficial dos solos de floresta (~ 25 cm) e de canga (~ 10 cm). Amostras dos estéreis amarelado e avermelhado foram retiradas do interior da mina de ferro. Dos solos de referência, foram obtidas amostras da camada de 0-20 cm de profundidade. Todas as amostras dos substratos foram secas ao ar e passadas em peneira com

abertura de malha de 9 mm. Essa peneira foi escolhida para preservar a proporção expressiva de fragmentos grosseiros presentes em alguns substratos.

De cada substrato, foi obtida uma amostra composta que foi submetida a análises físicas e químicas. A densidade aparente dos substratos foi determinada diretamente nessas amostras empregando-se o método da proveta (EMBRAPA, 2011). As amostras foram então passadas em peneiras com abertura de malha de 2 mm e o material retido foi considerado como sendo cascalho fino (\varnothing 2-10 mm). O material passante nessa peneira (terra fina seca ao ar – TFSA) foi destinado à análise granulométrica e a análises químicas.

Figura 1 – Áreas de seleção dos substratos



Fonte: Os autores.

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, com prévia dispersão das amostras com NaOH 1 mol L^{-1} , sob agitação por 16h a 50 rpm (DONAGEMMA et al., 2017). O pH dos substratos foi determinado em água, na relação substrato:água de 1:2,5. Carbono orgânico foi analisado pelo método de Walkley-Black com aquecimento externo. O método de Kjeldahl foi empregado para determinação do N total. P foi extraído com resina e determinado pelo método do azul de molibdênio. Fosfato de cálcio foi usado para extração de

S-SO₄²⁻, que foi determinado em espectrômetro de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). Ca e Mg foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por titulação com EDTA. Mehlich 1 foi usado para extração de K, que foi determinado em fotômetro de chama. A extração do Al trocável foi realizada com KCl 1 mol L⁻¹, com posterior determinação por titulação com NaOH 0,025 mol L⁻¹. A acidez potencial (H+Al) foi extraída com acetado de cálcio a pH 7 e determinada também com NaOH 0,025 mol L⁻¹. A extração de B foi feita pelo método da água quente, com aquecimento em micro-ondas, sendo o elemento determinado em ICP-OES. Os micronutrientes catiônicos (Cu, Fe, Mn e Zn) foram extraídos com DTPA e determinados em ICP-OES também.

Soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) foram calculadas assim:

$$SB = Ca + Mg + K \quad (1)$$

$$CTC = SB + H+Al \quad (2)$$

$$V = (SB/CTC) \times 100 \quad (3)$$

$$m = [Al/(SB + Al)] \times 100 \quad (4)$$

As análises químicas e esses cálculos seguiram os procedimentos descritos em Silva FC et al. (2009). As características dos substratos são mostradas na Tabela 1. Alguns atributos foram classificados conforme Sousa e Lobato (2002) e a classe textural foi determinada segundo Embrapa (2018).

4.3 Instalação e condução dos experimentos

Os experimentos foram conduzidos com plantas crescidas em recipientes de plástico com diâmetro superior de 7,4 cm, diâmetro inferior de 5 cm, altura de 9,3 cm e capacidade para 300 cm³. Os recipientes foram preenchidos com 280 cm³ de substrato conforme os tratamentos. O volume de cada substrato foi determinado pelo método da proveta (EMBRAPA, 2011) adaptado, em que a adaptação consistiu no uso de uma proveta de vidro de 1000 mL. Os recipientes foram colocados em caixa de plástico, em conformidade com o delineamento experimental, com dois blocos em cada caixa, para facilitar o manuseio dos recipientes com as plantas durante pesagens e avaliações. Não se aplicou nenhum tipo de corretivo de acidez ou fertilizante nos substratos, para que eles pudessem expressar os efeitos naturais de seus atributos químicos nas plantas, isto é, sem melhoria dos mesmos pela adição de insumos.

Tabela 1 – Atributos químicos e físicos dos substratos usados nos experimentos

Atributo	SF	SC	EA	EV	PA _{ref}	LA _{ref}
pH (H ₂ O)	4,9 (B)	4,8 (B)	4,3 (B)	4,5 (B)	4,1 (B)	5,0 (B)
CO (g kg ⁻¹)	3,99	2,05	4,87	1,01	11,08	22,88
NT (g kg ⁻¹)	0,35	0,15	0,20	0,17	1,14	1,26
P resina (mg dm ⁻³)	3 (MB)	21 (A)	3 (MB)	9 (M)	5 (MB)	5 (MB)
S-SO ₄ ²⁻ (mg dm ⁻³)	34 (A)	60 (A)	312 (A)	211 (A)	17 (A)	9 (M)
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,3 (B)	0,1 (B)	0,1 (B)	0,2 (B)	0,4 (B)	2,0 (M)
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,9 (D)	0,1 (B)	0,0 (B)	0,1 (B)	0,2 (B)	0,7 (D)
K (cmol _c dm ⁻³)	0,16 (D)	0,02 (B)	0,01 (B)	0,01 (B)	0,10 (M)	0,15 (D)
SB (cmol _c dm ⁻³)	2,36	0,22	0,11	0,31	0,70	2,85
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,1	0,1	0,1	0,1	1,1	0,3
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,31	1,65	2,31	2,64	6,93	6,11
CTC (cmol _c dm ⁻³)	4,67	1,87	2,42	2,95	7,63	8,96
V (%)	49 (D)	12 (B)	5 (B)	11 (B)	9 (B)	32 (M)
m (%)	4 (B)	31 (A)	48 (A)	24 (A)	61 (MA)	10 (B)
B (mg dm ⁻³)	0,09 (B)	0,03 (B)	0,03 (B)	0,03 (B)	0,21 (B)	0,33 (M)
Cu DTPA (mg dm ⁻³)	2,9 (A)	0,1 (B)	0,1 (B)	0,1 (B)	0,0 (B)	0,1 (B)
Fe DTPA (mg dm ⁻³)	14 (A)	63 (A)	6 (M)	23 (A)	171 (A)	60 (A)
Mn DTPA (mg dm ⁻³)	11,0 (A)	4,1 (M)	0,1 (B)	0,4 (B)	3,0 (M)	7,4 (A)
Zn DTPA (mg dm ⁻³)	2,0 (A)	3,0 (A)	0,9 (M)	1,2 (M)	1,1 (M)	0,6 (M)
D _a (kg dm ⁻³)	1,51	2,62	1,15	1,76	1,48	1,06
Cascalho fino (g kg ⁻¹)	143	227	71	280	1	3
Areia (g kg ⁻¹)	461	605	130	238	854	28
Silte (g kg ⁻¹)	279	335	230	442	26	212
Argila (g kg ⁻¹)	260	60	640	320	120	760
Textura	Média	Média	Muito argilosa	Média	Arenosa	Muito argilosa

SF: solo de floresta. SC: solo de canga. EA: estéril amarelado. EV: estéril avermelhado. PA_{ref}: Argissolo Amarelo de referência. LA_{ref}: Latossolo Amarelo de referência. CO: carbono orgânico. NT: nitrogênio total. SB: soma de bases. CTC: capacidade de troca de cátions. V: saturação por bases. m: saturação por alumínio. D_a: densidade aparente. MB: muito baixo. B: baixo. M: médio. D: adequado. A: alto. MA: muito alto.

Fonte: Os autores.

A semeadura das plantas usadas para avaliar os efeitos dos substratos no crescimento vegetal, ou seja, soja [*Glycine max* (L.) Merr. cv. M8644 IPRO RR] e algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L. cv. BRS 372), foi realizada colocando-se a 1 cm de profundidade do substrato

três sementes de soja por recipiente e duas sementes de algodoeiro por recipiente, conforme o experimento (Figura 2). Em seguida, o substrato de cada recipiente foi umedecido com água destilada, em quantidade correspondente a 70% da porosidade total (Pt), a qual foi calculada pela relação entre densidade de partículas e densidade aparente do substrato (EMBRAPA, 2011). Sementes não germinadas foram ocasionalmente substituídas. O teor de água dos substratos foi mantido próximo de 70% da Pt ao longo de todo o período experimental, com reposição diária da água perdida por evapotranspiração por meio da pesagem dos recipientes.

Figura 2 – Semeadura de algodoeiro



Fonte: Alysson Roberto Baizi e Silva.

As plantas cresceram pelo máximo de tempo possível permitido pelos substratos contidos nos recipientes, ou seja, até que as plantas mais altas reduziram seu ritmo de crescimento em altura e começaram a dar sinais de senescência (i.e., amarelecimento dos tecidos). As plantas de soja e de algodoeiro cresceram, respectivamente, por 30 e 60 dias, contados a partir da sementeira.

4.4 Avaliações

4.4.1 Emergência

A avaliação de emergência das sementes de soja e algodoeiro foi realizada diariamente a partir do primeiro dia após a sementeira (DAS). Considerou-se como germinadas as sementes que tinham seus cotilédones elevados acima do substrato pelo alongamento do hipocótilo. A contabilização das plântulas emergidas estendeu-se até 10 DAS para a soja e 20 DAS para o algodoeiro.

4.4.2 Medidas de crescimento

No fim do período de crescimento de cada espécie, mediram-se o diâmetro da base do caule (1 cm acima do nível do substrato no recipiente) e a altura das plantas (do nível do substrato no recipiente até a última folha esticada no sentido vertical) e contaram-se as folhas totalmente expandidas.

Após as avaliações de crescimento, as plantas foram cortadas rente ao nível do substrato e as raízes foram retiradas dos recipientes. A parte aérea das plantas foi passada em água de torneira e água destilada para descontaminação, seca em estufa com circulação forçada de ar regulada a 60°C e pesada para determinação da matéria seca. As raízes foram colocadas em peneira com abertura de malha de 1 mm, lavadas com jatos de água de torneira para retirada de partículas de substrato (Figura 3), passadas em água destilada, secas como descrito anteriormente e pesadas para determinação da matéria seca.

Figura 3 – Lavagem das raízes de plantas de soja



Fonte: Alysson Roberto Baizi e Silva.

A parte aérea e as raízes secas foram moídas em moinho tipo Wiley, dotado de peneira de 1 mm (Figura 4), e analisadas para determinação da concentração de nutrientes minerais e Al. N foi determinado pelo método de Kjeldahl em extrato de digestão sulfúrica e K por fotometria de chama em extrato de digestão nítrico-perclórica. Neste último extrato, também foram determinados P, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn e Al por espectroscopia de emissão ótica por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). As análises no tecido vegetal foram realizadas conforme Miyazawa et al. (2009).

Figura 4 – Moagem da parte aérea de plantas de soja em moinho tipo Wiley



Fonte: Alysson Roberto Baizi e Silva.

4.5 Análises estatísticas

Os resultados de emergência de plântulas e das variáveis de crescimento das plantas e foram submetidos à análise de variância (ANOVA, $P < 0,05$), após checagem da normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($P < 0,05$) e da homogeneidade de variância pelo teste de O'Neill e Mathews ($P < 0,05$). Quando houve necessidade, os dados foram convenientemente transformados. As médias de tratamentos foram comparadas pela diferença mínima significativa (DMS) de Fisher ($P < 0,05$). Análise de correlação de Pearson ($P < 0,05$) foi conduzida entre variáveis de interesse. Os dados foram analisados com quatro tratamentos, devido a não emergência ou morte das plântulas no SC e no EA. Todas as análises estatísticas foram efetuadas no R (R Core Team, 2018).

Os resultados de concentração de nutrientes e Al na parte aérea das plantas não foram analisados estatisticamente, porque houve a necessidade de juntar amostras de duas ou mais repetições para a realização das análises químicas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Emergência

Houve efeito significativo ($P < 0,001$) dos tratamentos na emergência de plântulas de soja e algodoeiro. Os resultados estão apresentados na Figura 5. Observa-se que o solo de canga (SC) foi o substrato em que a soja e o algodoeiro tiveram as menores porcentagens de plântulas emergidas. De modo similar, o estéril amarelado (EA) também proporcionou baixa emergência, mas somente para a soja. Ainda para a soja, o estéril avermelhado (EV) foi superior ao EA. O solo de floresta (SF) foi o único substrato a ter 100 % de plântulas emergidas para ambas as espécies. Além disso, o índice de emergência nesse solo foi semelhante aos índices dos solos de referência.

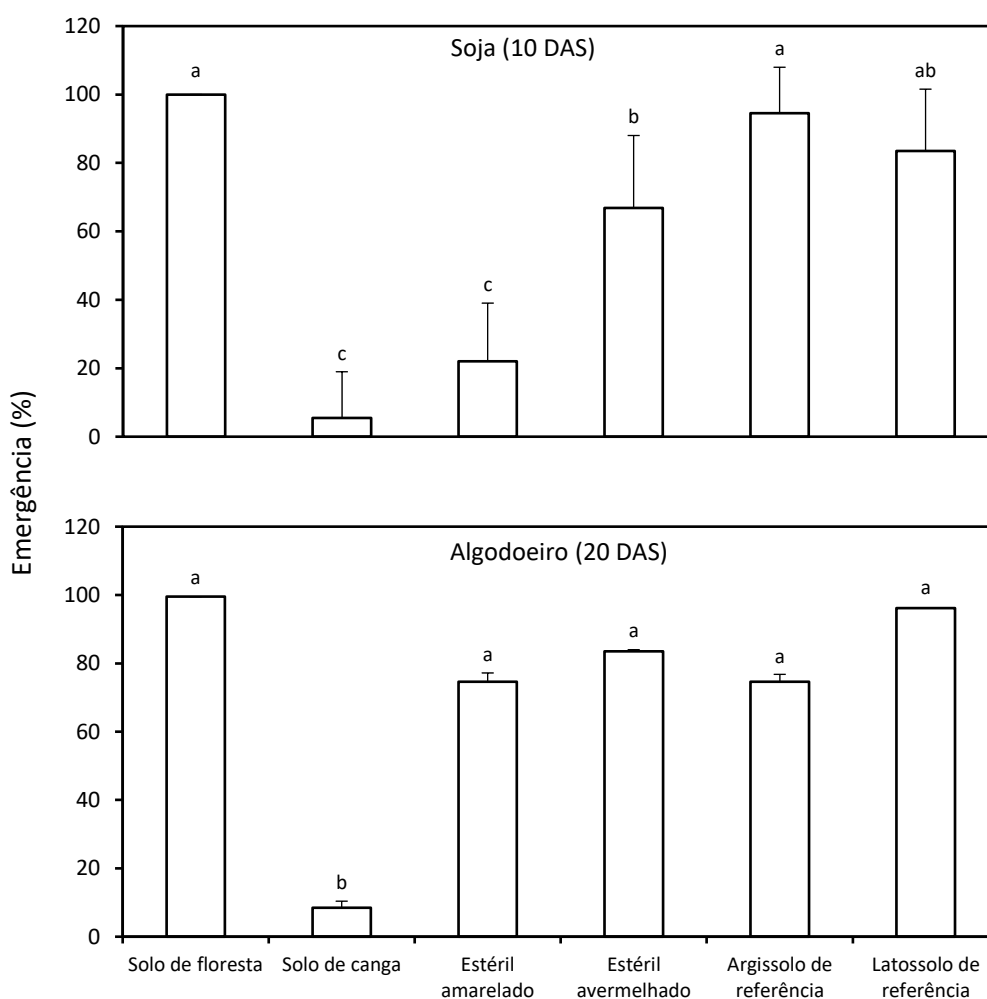
Uma parte dos cotilédones das plântulas de soja e algodoeiro não emergidas no SC e das plântulas de soja não emergidas no EA ficou abaixo do nível dos substratos, e a outra parte, acima, indicando que os hipocótilos dessas plântulas não foram capazes de empurrar completamente os cotilédones para fora desses substratos. Essa incapacidade é consequência do colapso do ponto de envergadura dos hipocótilos em emergência (Figura 6).

O colapso dos hipocótilos no SC parece estar relacionado com a densidade aparente (D_a) desse solo, uma vez que ela foi 74 % maior do que a D_a do SF (Tabela 1), no qual foram registrados os índices de emergência máximos (Figura 5). Assim, o solo mais denso deve ter imposto uma pesada barreira física à força exercida pelos hipocótilos para levantar os cotilédones. Consequentemente, os hipocótilos exauriram-se. Rathore, Ghildyal e Sachan (1981) também constataram que uma barreira física, no caso do trabalho deles imposta pelo encrostamento superficial do solo, levou ao colapso de hipocótilos de soja. Esse mesmo tipo de barreira física também resultou em baixa emergência de algodoeiro no estudo de Nabi et al. (2001), possivelmente devido ao prévio colapso do hipocótilo das plântulas não emergidas.

Todavia, o colapso das plântulas de soja no EA não pode ser explicado pelo efeito da D_a desse substrato, já que ela foi mais baixa do que a D_a do SC (Tabela 1). Nesse caso, fatores químicos podem estar envolvidos. Nota-se na Tabela 1 que o EA apresentou baixo teor de Al trocável, que provavelmente não causaria toxicidade na plântula. Porém, esse substrato também tinha baixo teor de Ca trocável, além de não ter sido detectado Mg trocável. Uma série de estudos mostra que o Ca tem efeito protetor contra a toxicidade de Al em plantas (RENGEL, 1992). O Mg também tem esse efeito, e ele parecer ser particularmente importante

para a soja (SILVA IR et al., 2009). Como esse estéril tinha baixo teor de Ca trocável e não tinha Mg trocável, uma possível toxicidade de Al, mesmo com baixo teor do elemento no substrato, não pode ser descartada. O efeito tóxico do Al inicia-se e é mais evidente nas raízes das plantas, prejudicando o crescimento do sistema radicular (ROSSIELLO; JACOB NETTO, 2006). Nesse caso, o Al pode ter prejudicado o desenvolvimento da radícula, enfraquecendo consequentemente o hipocótilo. Então, a toxicidade de Al é colocada como uma possível causa do colapso do hipocótilo de plântulas de soja no EA.

Figura 5 – Emergência de plântulas de soja e algodoeiro crescidas em substratos minerais com características contrastantes. DAS: dias após a semeadura. As médias \pm DP (desvio padrão) para algodoeiro são valores convertidos para a escala original de dados transformados $\sqrt{x + 0,5}$. A linha sobre cada coluna representa o DP. Letras diferentes sobre as colunas para cada espécie vegetal indicam diferente significativa pelo teste DMS ($P < 0,05$)



Fonte: Os autores.

A toxicidade de Al também pode ter concorrido para o colapso das plântulas de soja e algodoeiro no SC, pois os teores de Al, Ca e Mg nesse substrato foram similares àqueles do EA (Tabela 1). Porém, é mais provável que D_a do SC tenha sido mais importante em determinar o colapso dos hipocótilos devido ao valor extremamente atípico desse atributo físico.

Figura 6 – Colapso do hipocótilo de plântula de algodoeiro (vide seta)



Fonte: Alysson Roberto Baizi e Silva.

Muitas plântulas de soja e de algodoeiro que emergiram no SC e no EA não abriram seus cotilédones. Além disso, nenhuma delas desenrolou qualquer tipo folha, não podendo, assim, realizar fotossíntese. Conseqüentemente, todas as plântulas emergidas nesses substratos morreram dias depois da avaliação de emergência. As causas da morte dessas plântulas devem ser as mesmas que impediram a emergência das outras plântulas. Assim, embora as espécies usadas neste trabalho não sejam aquelas indicadas para revegetação, os resultados de emergência das plantas sugerem que tanto o SC quanto o EA podem ser considerados substratos inadequados para o estabelecimento da vegetação. Por isso, esses substratos não deveriam ser selecionados diretamente para revegetação, a menos que suas características limitantes possam ser superadas com técnicas e insumos apropriados.

Como as plântulas de soja e algodoeiro morreram no SC e no EA, as ANOVAs subsequentes foram efetuadas sem esses substratos, isto é, com 4 tratamentos e não com seis, como originalmente delineado.

5.2 Medidas de crescimento

5.2.1 Diâmetro da base do caule

Houve efeito significativo dos tratamentos no diâmetro da base do caule de plantas de soja ($P < 0,05$) e de algodoeiro ($P < 0,001$). Os resultados estão apresentados na Tabela 2. Nota-se nessa tabela que o diâmetro da base do caule da soja não diferiu entre o SF e o EV, bem como em relação aos solos de referência. Entretanto, para algodoeiro, essa variável foi maior no SF em relação ao EV e ao Argissolo de referência (PA_{ref}), porém, similar ao Latossolo de referência (LA_{ref}).

O diâmetro médio da base do caule da soja no LA_{ref} é menor do que aqueles obtidos nos experimentos de campo conduzidos por Caverzan et al. (2018), em Latossolos Vermelhos Distróficos fertilizados. Nesse trabalho, os diâmetros médios registrados no estágio V3 variaram de 3,6 a 4,4 mm. Esses valores mais elevados podem, portanto, ser atribuídos primariamente ao tipo de experimento, pois no campo as plantas tendem a crescer mais do que em casa de vegetação e, também, a melhoria da fertilidade dos solos, já que eles foram fertilizados. Não foi encontrado nenhum trabalho no qual essa variável tenha sido avaliada em soja cultivada em Argissolo.

O diâmetro médio da base do caule do algodoeiro no PA_{ref} (Tabela 2) foi inferior ao obtido no trabalho em casa de vegetação conduzido por Silva, Costa e Sofiatti (2014), cujo valor foi de quase 5 mm para plantas aos 28 dias após a emergência (DAE), que foram cultivadas em vasos com a amostra da camada superficial de um Argissolo Vermelho muito fértil. O maior diâmetro do caule verificado no trabalho desses autores pode estar relacionado, entre outros fatores, com a maior fertilidade do solo usado para o cultivo das plantas, o que contrasta com este trabalho, no qual foi usado solo de baixa fertilidade (Tabela 1) sem qualquer melhoria em seus atributos químicos.

O valor médio do diâmetro da base do caule do algodoeiro no LA_{ref} também foi inferior ao encontrado na literatura para experimento em casa de vegetação. Nagashima, Santos e Miglioranza (2011) constataram aos 59 DAE valores médios ao redor de 6 mm para 5 cultivares de algodoeiro crescidos em vasos com amostra de um Latossolo Vermelho Distroférico fertilizado. Novamente, esses maiores valores de diâmetro podem ser devidos a melhoria na fertilidade do solo usado pelos autores, uma vez que eles o fertilizaram, o que não ocorreu no presente estudo.

Os substratos LA_{ref} e PA_{ref} podem ser considerados referências para o diâmetro da base do caule da soja e do algodoeiro, porém, tal medida parece ser sensível a mudanças na fertilidade do solo. Desse modo, diferenças na fertilidade dos substratos (Tabela 1) poderiam

explicar o por que o diâmetro da base do caule de ambas as plantas no LA_{ref} foi similar ao SF e maior em relação àqueles no EV e PA_{ref} (Tabela 2).

Tabela 2 – Atributos de crescimento de plantas de soja (30 DAS) e de algodoeiro (60 DAS) crescidas em substratos minerais com características contrastantes. Valores são médias \pm DP ($n = 6$)

Substrato	Soja			Algodoeiro		
	Diâmetro da base do caule (mm)	Altura da parte aérea (cm)	Número de folha por planta	Diâmetro da base do caule (mm)	Altura da parte aérea (cm)	Número de folha por planta
Solo de floresta	2,06 \pm 0,17 ab	44,1 \pm 9,38 a	2,86 \pm 0,59	2,60 \pm 0,30 a	23,5 \pm 1,74 b	3,08 \pm 0,58 b
Solo de canga	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estéril amarelado	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estéril avermelhado	1,93 \pm 0,05 b	24,7 \pm 4,28 b	3,11 \pm 0,84	1,74 \pm 0,19 b	15,7 \pm 1,73 d	2,75 \pm 0,76 b
Argissolo de referência	1,91 \pm 0,12 b	30,7 \pm 3,77 b	2,18 \pm 0,33	1,89 \pm 0,36 b	19,7 \pm 2,97 c	2,00 \pm 0,55 c
Latossolo de referência	2,14 \pm 0,11 a	43,8 \pm 4,87 a	3,08 \pm 0,42	2,49 \pm 0,21 a	26,1 \pm 1,21 a	3,92 \pm 0,20 a

DAS: dias após a semeadura. DP: desvio padrão. Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes de acordo com a diferença mínima significativa de Fisher (DMS) ($P < 0,05$). Médias não acompanhadas de letras indicam que o teste F da ANOVA foi não significativo. nd: não disponível.

Fonte: Os autores.

Esses resultados mostram que o SF seria um substrato melhor do que o EV para a obtenção de plantas com maior diâmetro da base do caule, característica que é desejável para um bom estabelecimento da vegetação, uma vez que confere maior resistência ao acamamento/tombamento e oferece suporte para o maior crescimento da parte aérea em altura.

5.2.2 Altura da planta

A altura da planta de soja e de algodoeiro foi influenciada significativamente ($P < 0,001$) pelos substratos. Os resultados estão apresentados na Tabela 2. As alturas médias de ambas as espécies foram maiores no SF em relação às aquelas no EV. Considerando todos os substratos, verifica-se que a média dessa variável no LA_{ref} foi similar à do SF para soja, porém, superior para o algodoeiro. Da mesma forma, a altura no PA_{ref} foi semelhante à do EV para soja e maior para o algodoeiro. Assim, LA_{ref} e o PA_{ref} foram, respectivamente, referências mais apropriadas para o SF e o EV, mas somente no caso da soja. Para o algodoeiro, no entanto, esses solos de referência foram superiores a esses respectivos substratos de área de mineração.

A altura média da soja no LA_{ref} (43,8 cm) está dentro do intervalo de 35,3 a 49,1 cm encontrado por Vanzolini e Carvalho (2002) para plantas de soja avaliadas aos 38 DAS em experimento de campo conduzido em um Latossolo Vermelho Distrófico argiloso fertilizado. Isso reforça o papel do LA_{ref} como referência para o crescimento da soja quando avaliado pela altura da planta. Não foram encontrados trabalhos com Argissolo para comparação com a altura da soja com a do PA_{ref}.

A altura média do algodoeiro no PA_{ref} (Tabela 2) foi similar à obtida no trabalho de casa de vegetação conduzido Silva, Costa e Sofiatti (2014), no qual as plantas cresceram em vasos com amostras de Argissolo Vermelho de alta fertilidade. Porém, no estudo desses autores, as plantas foram avaliadas aos 28 DAE, ou seja, muito antes da avaliação feita aos 60 DAS no presente trabalho. Essa altura similar obtida antes pode ser explicada pela maior fertilidade do solo usado por esses autores.

A altura média do algodoeiro no LA_{ref} (Tabela 2) foi muito inferior à média obtida para 5 cultivares (41,8 cm) avaliados ao 59 DAE no experimento em casa de vegetação de Nagashima, Santos e Miglioranza (2011). Essa grande diferença de crescimento em altura provavelmente se deve a fertilização do solo usado pelos autores, que foi um Latossolo Vermelho Distroférico.

Assim como para o diâmetro da base do caule, os substratos LA_{ref} e PA_{ref} podem ser considerados referências para a altura da planta de soja e de algodoeiro, porém essa medida também parece ser sensível a mudanças na fertilidade do solo.

Esses resultados indicam que o SF pode ser superior EV em termos de crescimento vertical da vegetação, o que tende a ser importante para o acúmulo de matéria seca da parte aérea das plantas.

5.2.3 Número de folhas

O número de folhas do algodoeiro variou significativamente ($P < 0,001$) entre os substratos (Tabela 2). Para soja, contudo, não houve variação significativa ($P > 0,05$) (Tabela 2). O número de folhas de algodoeiro foi similar entre SF e EV, maior do que no PA_{ref} e menor do que no LA_{ref}. Assim, o número de folhas não foi uma característica que possibilitou distinguir o SF do EV.

5.3 Matéria seca da parte aérea e raiz

Houve efeito significativo dos substratos na matéria seca da parte aérea ($P < 0,001$) e da raiz ($P < 0,01$; $P < 0,001$) da soja e do algodoeiro. A soja e o algodoeiro produziram, respectivamente, 92% e 196% mais matéria seca da parte aérea e 39% e 77% mais matéria seca da raiz no SF em relação ao EV (Tabela 3). Assim, o crescimento das plantas foi expressivamente maior no SF quando comparado ao EV. Nota-se na Tabela 3 que EV foi semelhante ao PA_{ref} e o SF foi semelhante ao LA_{ref} em termos de matéria seca de ambas as plantas. Isso significa que PA_{ref} pode ser considerado uma referência para o EV, enquanto o LA_{ref} uma referência para o SF.

A superioridade do SF em relação ao EV para o crescimento vegetal se deve a fatores ligados aos substratos. Ao analisar suas características na Tabela 1, nota-se que alguns fatores são mais evidentes. Os teores de Ca e de Mg trocáveis no SF são 6,5 e 9 vezes maiores que os seus respectivos teores no EV. Além disso, os teores desses nutrientes no EV são extremamente baixos, aproximando-se de zero. Embora os teores de Ca no SF e no EV sejam classificados como baixos pelo critério de Sousa e Lobato (2002) (Tabela 1), eles são nitidamente muito diferentes entre esses dois substratos. Essas diferenças são, portanto, sugeridas como fatores que contribuíram para o maior crescimento das plantas no SF em comparação com o EV.

Tabela 3 – Matéria seca da parte aérea e da raiz e razão parte aérea:raiz de plantas de soja e de algodoeiro crescidas em substratos minerais com características contrastantes. Valores são médias \pm DP ($n = 6$)

Substrato	Soja			Algodoeiro		
	Parte aérea	Raiz	Parte aérea:raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea:raiz
	(mg por planta)	(mg por planta)		(mg por planta)	(mg por planta)	
Solo de floresta	633 \pm 154 a	174 \pm 35 a	3,64 \pm 0,41 a	666 \pm 170 a	163 \pm 26 a	4,26 \pm 1,67
Solo de canga	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estéril amarelado	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estéril avermelhado	329 \pm 99 b	125 \pm 33 b	2,64 \pm 0,38 b	225 \pm 61 b	92 \pm 32 b	2,53 \pm 0,48
Argissolo de referência	342 \pm 36 b	104 \pm 21 b	3,33 \pm 0,41 a	289 \pm 97 b	92 \pm 43 b	3,52 \pm 1,21
Latossolo de referência	665 \pm 100 a	177 \pm 30 a	3,78 \pm 0,28 a	673 \pm 135 a	188 \pm 38 a	3,60 \pm 0,34

DP: desvio padrão. Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes de acordo com a diferença mínima significativa de Fisher (DMS) ($P < 0,05$). nd: não disponível. Médias não acompanhadas de letras indicam que o teste F da ANOVA foi não significativo.

Fonte: Os autores.

As interpretações dos teores de Ca e Mg trocáveis específicas para soja reforçam essa possibilidade. De acordo com os critérios apresentados em Embrapa (2013), os teores de Ca no SF e no EV são interpretados como médio e baixo, respectivamente. Já os teores de Mg, são interpretados como alto e baixo para os respectivos substratos. Assim, as mais baixas disponibilidades de Ca e Mg podem realmente ter contribuído para o menor crescimento da soja no EV em comparação com a do SF.

Os teores de Ca e Mg na parte aérea da soja no SF foram, respectivamente, 1,5 e 3,6 vezes mais elevados do que no EV (Tabela 4). Embora não tenha sido possível aplicar a ANOVA, essas diferenças são muito expressivas. Desse modo, elas podem indicar que a soja no SF estava mais bem nutrida em Ca e Mg do que a planta no EV. Essa melhor nutrição pode, então, ter levado a planta a produzir mais matéria seca no SF do que no EV.

Por outro lado, os teores de Ca e Mg na parte aérea da soja foram similares entre os substratos nos quais não houve diferença na matéria seca da planta, o que ocorreu entre o SF e o LA_{ref} e entre o EV e o PA_{ref} (Tabelas 3 e 4). Isso significa que quando não houve variação nos teores de Ca e Mg, a matéria seca também não variou.

A influência do Ca e do Mg no crescimento da soja pode ter ocorrido também entre os solos de referência, pois a matéria seca e os teores desses nutrientes foram conjuntamente maiores no LA_{ref} do que PA_{ref} (Tabelas 3 e 4). Isso reforça a possibilidade de que os baixos teores de Ca e Mg no EV tenham sido os principais fatores que determinaram a menor matéria seca da planta nesse substrato em relação ao SF, o qual apresentou maior disponibilidade de tais nutrientes.

O Ca é um dos nutrientes exigidos em maiores quantidades pela soja (CAIRES; FONSECA, 2000). Conseqüentemente, a insuficiência no suprimento desse nutriente pode comprometer de forma considerável o crescimento da planta. Almeida et al. (2017) observaram que a omissão de Ca na solução nutritiva reduziu 54% e 65% da matéria seca da parte aérea e da raiz da planta, respectivamente. Esses resultados suportam, então, a influência do Ca na diferença de crescimento da soja entre o SF e o EV.

Tabela 4 – Concentração de nutrientes e alumínio na parte aérea de plantas de soja crescidas em substratos minerais com características contrastantes. Valores são médias \pm DP (*n*)

Substrato	N (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)
Solo de floresta	17 \pm 4 (6)	1,0 \pm 0,2 (6)	8 \pm 1 (6)	4,0 \pm 0,2 (6)	3,6 \pm 0,2 (6)	0,9 \pm 0,2 (6)
Solo de canga	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estéril amarelado	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estéril avermelhado	29 \pm 3 (5)	2,0 \pm 0,2 (5)	9 \pm 2 (5)	2,7 \pm 0,4 (5)	1,0 \pm 0,2 (5)	1,6 \pm 0,3 (5)
Argissolo de referência	26 \pm 3 (6)	1,3 \pm 0,2 (6)	7 \pm 1 (6)	2,0 \pm 0,1 (6)	0,9 \pm 0,1 (6)	2,0 \pm 0,1 (6)
Latossolo de referência	18 \pm 1 (5)	1,0 \pm 0,2 (6)	8 \pm 1 (6)	5,5 \pm 0,7 (6)	3,1 \pm 0,3 (6)	1,2 \pm 0,2 (6)
	B (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	Al (mg kg ⁻¹)
Solo de floresta	26 \pm 2 (6)	6 \pm 1 (6)	63 \pm 5 (6)	127 \pm 21 (6)	25 \pm 2 (6)	22 \pm 6 (6)
Solo de canga	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estéril amarelado	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estéril avermelhado	29 \pm 4 (5)	4 \pm 1 (5)	121 \pm 24 (5)	164 \pm 10 (5)	24 \pm 2 (5)	25 \pm 4 (5)
Argissolo de referência	22 \pm 2 (6)	2 \pm 0 (6)	74 \pm 10 (6)	65 \pm 1 (6)	44 \pm 2 (6)	40 \pm 9 (6)
Latossolo de referência	24 \pm 1 (6)	2 \pm 0 (6)	56 \pm 5 (6)	39 \pm 7 (6)	25 \pm 3 (6)	20 \pm 10 (6)

DP: desvio padrão. nd: não disponível.

Fonte: Os autores.

O Mg, por sua vez, é menos exigido pela soja em comparação com o Ca (CAIRES; FONSECA, 2000). Contudo, a planta também reduz o seu crescimento quando o suprimento desse nutriente é insuficiente. Redução de 41% na matéria seca da parte aérea devido a omissão de Mg na solução nutritiva foi encontrada por Almeida et al. (2017). Porém, não houve qualquer efeito na matéria seca da raiz, indicando que a ausência de Mg foi prejudicial somente ao crescimento da parte aérea. No presente trabalho, o mesmo efeito pode ter ocorrido. Nesse caso, o baixo teor de Ca no substrato (Tabela 1) seria o principal fator relacionado com a menor matéria seca da raiz (Tabela 3). Sustentam essa possibilidade os resultados do trabalho de Almeida et al. (2017), segundo os quais a omissão de Ca foi a única entre as omissões de macronutrientes que resultou em redução na matéria seca da raiz da soja.

O menor acúmulo de matéria seca da soja no EV em relação ao SF também pode ter sido causado pela toxicidade de Al. Os teores de Al trocável nos dois substratos (Tabela 1) são considerados médios pelo critério de Embrapa (2013). Porém, com base no mesmo critério, os teores de Ca e Mg no SF (Tabela 1) são médio e alto, respectivamente, ao contrário desses respectivos teores no EV (Tabela 1), que são baixos. Como discutido para a emergência das plântulas, o Ca e o Mg protegem as plantas contra o Al tóxico. Assim, como o EV tinha teores muito mais baixos em relação aos do SF, é possível que um eventual efeito tóxico do Al trocável tenha sido muito mais pronunciado no EV do que no SF.

Para o algodoeiro, a influência do Mg na matéria seca da planta parece ter sido mais marcante do que a de Ca. O teor de Ca na parte aérea no EV foi ligeiramente superior em relação ao SF (Tabela 5). Entretanto, a matéria seca foi maior no SF do que no EV. Portanto, o Ca não poderia explicar a variação no crescimento da planta. Por outro lado, o teor de Mg na parte aérea foi duas vezes maior no SF em comparação com o EV, sugerindo que esse nutriente pode estar associado a diferença na matéria seca entre esses substratos. O maior teor de Mg na parte aérea no SF em relação ao EV é coerente com a disponibilidade do nutriente nesses substratos (Tabela 1).

A comparação dos teores de Ca e Mg na parte aérea do algodoeiro entre os substratos de mineração de ferro e os solos de referência também indica a influência do Mg no crescimento da planta. Observa-se na Tabela 5, que o teor de Mg na parte aérea no LA_{ref} foi notadamente maior do que no PA_{ref}, o que condiz com a diferença na matéria seca entre esses substratos.

Tabela 5 – Concentração de nutrientes e alumínio na parte aérea de plantas de algodoeiro crescidas em substratos minerais com características contrastantes.Valores são médias \pm DP (*n*)

Substrato	N (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)
Solo de floresta	9 \pm 1 (6)	0.6 \pm 0.1 (6)	8 \pm 1 (6)	5.7 \pm 0.5 (6)	2.1 \pm 0.2 (6)	0.6 \pm 0.1 (6)
Solo de canga	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estévil amarelado	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estévil avermelhado	18 \pm np (1)	1.2 \pm np (1)	3 \pm np (1)	7.2 \pm np (1)	1.0 \pm np (1)	0.5 \pm np (1)
Argissolo de referência	19 \pm 2 (2)	0.7 \pm 0.0 (2)	5 \pm 0 (2)	2.2 \pm 0.0 (2)	1.3 \pm 0.0 (2)	1.9 \pm 0.4 (2)
Latossolo de referência	14 \pm 3 (6)	0.7 \pm 0.1 (6)	7 \pm 2 (6)	10.8 \pm 0.7 (6)	3.0 \pm 0.2 (6)	1.5 \pm 0.3 (6)
	B (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	Al (mg kg ⁻¹)
Solo de floresta	13 \pm 3 (6)	4 \pm 2 (6)	88 \pm 68 (6)	108 \pm 9 (6)	18 \pm 11 (6)	53 \pm 40 (6)
Solo de canga	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estévil amarelado	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Estévil avermelhado	15 \pm np (1)	2 \pm np (1)	154 \pm np (1)	317 \pm np (1)	11 \pm np (1)	42 \pm np (1)
Argissolo de referência	15 \pm 0 (2)	1 \pm 0 (2)	93 \pm 1 (2)	54 \pm 1 (2)	17 \pm 2 (2)	38 \pm 1 (2)
Latossolo de referência	20 \pm 3 (6)	4 \pm 0 (6)	57 \pm 9 (6)	59 \pm 6 (6)	22 \pm 3 (6)	28 \pm 13 (6)

DP: desvio padrão. nd: não disponível.

Fonte: Os autores.

O algodoeiro é uma planta reconhecidamente exigente em Mg. Resultados de pesquisa mostram que o Mg foi o quarto nutriente mais extraído pela planta, ficando atrás apenas de K, N e Ca (VIEIRA et al., 2018) e foi o nutriente absorvido em maior proporção nos primeiros 60 dias de cultivo (MENDES, 1960). Devido a elevada exigência relativa de Mg, principalmente na fase inicial, a insuficiência do nutriente pode reduzir o crescimento do algodoeiro. Reduções de 23% e 24% na matéria seca da parte aérea e da raiz, respectivamente, foram obtidas por Rosolem e Bastos (1997) para plantas cultivadas por 65 dias em solução nutritiva com omissão de Mg. Isso demonstra o potencial que a restrição na disponibilidade de Mg pode causar no crescimento da planta, uma vez que esse nutriente está diretamente relacionado com a fotossíntese, já que ele compõe a molécula de clorofila (VITTI; LIMA; CICARONE, 2006). Em solos, teores de Mg trocável inferiores a 1 cmol_c dm⁻³ podem resultar em deficiência do nutriente em algodoeiro (BORIN; FERREIRA; CARVALHO, 2014). No EV, o teor de Mg (Tabela 1) foi muito menor do que esse limite, e no SF (Tabela 1), maior do que ele. Portanto, isso explicaria por que o teor de Mg na parte aérea e a massa da matéria seca da parte aérea foram menores no EV em relação ao SF. Somase a isso o fato de o Mg ser mais exigido do que os outros nutrientes nas primeiras semanas de cultivo, o que pode ter agravado o efeito negativo da baixa disponibilidade do nutriente no EV sobre o crescimento da planta.

Houve efeito significativo ($P < 0,001$) dos substratos na razão parte aérea:raiz da soja, porém, esse efeito não foi observado para o algodoeiro ($P > 0,05$). A razão parte aérea:raiz da soja foi 27% maior no SF em comparação com a do EV (Tabela 3). Entretanto, essa razão foi similar entre os solos de referência. Além disso, tal razão também foi similar entre cada solo de referência e o SF. A mudança na razão parte aérea:raiz no EV sugere que a parte aérea cresceu menos do que a raiz. De fato, isso aconteceu (Tabela 3). Como visto, o Ca e o Mg foram os nutrientes mais relacionados com a redução no crescimento da soja. Assim, eles podem estar envolvidos também na alteração da razão parte aérea:raiz. Observa-se no trabalho de Almeida et al. (2017), que a razão parte aérea:raiz aumentou com a omissão de Ca e diminuiu com a omissão de Mg. Desse modo, é possível que a redução na razão parte aérea:raiz no EV esteja mais relacionada com a insuficiência de Mg do que com a de Ca.

Ao considerar todos os resultados de crescimento da soja e do algodoeiro, verifica-se que, entre os substratos de área de mineração de ferro, o solo foi melhor do que o estéril para o crescimento das plantas. Silva et al. (2006) também constataram que o solo foi um substrato

mais apropriado do que o estéril (rocha) para o crescimento de diversas espécies vegetais [capim-braquiária (*Urochloa brizantha*), capim-gordura (*Melinis minutiflora*), capim-vencedor (*Urochloa maxima*) e guandu (*Cajanus cajan*)]. No trabalho desses autores, o estéril, ao contrário do solo, não tinha Ca e Mg trocáveis. A inexistência de formas disponíveis desses nutrientes pode ter sido o fator determinante para o menor crescimento das plantas no estéril, assim como foi sugerido no presente estudo.

Em áreas de mineração de carvão no sul do Brasil, estudos mostram que os substratos submetidos a revegetação geralmente não são adequados ao crescimento das plantas (CAMPOS; ALMEIDA; SOUZA, 2003; QUINONES et al., 2008). Entre as limitações identificadas nesses substratos, destacam-se a elevada densidade e a extrema acidez, bem como baixos teores de Ca e Mg, em alguns casos. Devido a tais limitações, Kämpf, Schneider e Giasson (1997) sugeriram que os substratos melhores sejam previamente selecionados antes do início do processo de revegetação de uma área degradada pela extração de carvão. O mesmo princípio deveria ser aplicado na revegetação em áreas de mineração de ferro. Neste trabalho, constatou-se que o solo de área de floresta foi o mais adequado para o estabelecimento e crescimento da soja e do algodoeiro. Embora essas plantas não sejam as que serão empregadas na revegetação, elas indicam que esse solo deveria ser o substrato selecionado para recuperação de uma área degradada pela mineração de ferro em Carajás. Estudos específicos com plantas nativas usadas para revegetar tais áreas podem indicar com mais assertividade ainda os melhores substratos para o crescimento vegetal.

5.4 Correlações

Os resultados de correlação entre as medidas de crescimento e a matéria seca da parte aérea e da raiz da soja e do algodoeiro estão apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente. Nota-se que, para ambas plantas, a altura foi a medida de crescimento mais bem correlacionada com a matéria seca tanto da parte aérea como da raiz. Para todos os substratos, isso indica então que o crescimento em altura contribuiu de modo expressivo para o crescimento geral da planta, determinado pelo acúmulo de matéria seca.

Tabela 6 – Coeficiente de correlação de Pearson entre variáveis obtidas para plantas de soja

	D	A	N	MSPA	MSR
D	–	0,70***	0,39 ^{NS}	0,70***	0,63***
A	–	–	0,37 ^{NS}	0,94***	0,81***
N	–	–	–	0,42*	0,59**
MSPA	–	–	–	–	0,91***
MSR	–	–	–	–	–

D: diâmetro da base do caule. A: altura da planta. N: número de folhas por planta. MSPA: massa seca da parte aérea. MSR: massa seca da raiz. ^{NS}: não significativo. * $P < 0,05$. ** $P < 0,01$. *** $P < 0,001$.

Fonte: Os autores.

Tabela 7 – Coeficiente de correlação de Pearson entre variáveis obtidas para plantas de algodoeiro

	D	A	N	MSPA	MSR
D	–	0,74***	0,40 ^{NS}	0,79***	0,78***
A	–	–	0,55**	0,84***	0,77***
N	–	–	–	0,60**	0,52**
MSPA	–	–	–	–	0,79***
MSR	–	–	–	–	–

D: diâmetro da base do caule. A: altura da planta. N: número de folhas por planta. MSPA: massa seca da parte aérea. MSR: massa seca da raiz. ^{NS}: não significativo. ** $P < 0,01$. *** $P < 0,001$.

Fonte: Os autores.

6 CONCLUSÃO

Os substratos da área de mineração de ferro de Carajás foram diferentes entre si quanto ao estabelecimento de plântulas e ao crescimento de plantas. O SC e o EA não proporcionaram condições adequadas para o estabelecimento de plântulas de soja e algodoeiro. Já para o crescimento das plantas, determinado pelo diâmetro da base do caule, altura da planta e matéria seca da parte aérea e raiz, o SF foi um substrato mais adequado do que o EV. Os fatores mais limitantes ao desenvolvimento vegetal foram a densidade, no caso específico do SC, e os baixos teores de Ca e Mg trocáveis, no caso do SC, EA e EV. A ocorrência de substratos com características favoráveis e desfavoráveis para as plantas sugere que eles devam ser previamente avaliados, visando a seleção daqueles mais adequados ao processo de revegetação.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. T. E. et al. (Eds.). **Boletim nº 200**: Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas. 7. ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agrônomo (IAC), 2014. 452 p. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/porassunto/pdf/boletim200_iac.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2018.
- ALMEIDA, T. B. F. de et al. Development and nutrition of soybeans with macronutrients Deficiencies. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 13, p.1616-1625, 20 jul. 2017.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13030**: elaboração e apresentação de projeto de reabilitação de áreas degradadas pela mineração. Rio de Janeiro. 1999.
- ARAÚJO, E. R.; OLIVIERI, R. D.; FERNANDES, F. R. C. **Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente**. In: Recursos minerais e sociedade: impactos humanos - socioambientais - econômicos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.
- BALIEIRO, F. de C.; ALVES, B.J.R. Análise granulométrica. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 338-376.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. **Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)**, Piracicaba, v. 61, n. 6, p. 626-631, dez. 2004.
- BORIN, A. L. D. C.; FERREIRA, G. B.; CARVALHO, M. C. S. **Adubação do Algodoeiro no Ambiente de Cerrado**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2014. (Comunicado técnico, 375).
- BRASIL. Decreto n. 97.632, de 10 de abril de 1989. **Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências**. Brasília, DF. 1989.
- CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F. da. Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem na superfície. **Bragantia**, v. 59, n. 2, p.213-220, 2000.
- CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, J.A; SOUZA, L.S. Avaliação de três áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1123-1137, 2003.
- CAMARGO, O. A; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 132p.
- CARVALHO, P. S. L. de. et al. **Minério de ferro**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, mar. 2014.
- CASTRO, P. de T. A.; NALINI JÚNIOR, H. A.; LIMA, H. M. de. **Entendendo a mineração no Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte: Ecológico, 2011. 93 p.

CAVERZAN, A. et al. How does seed vigor affect soybean yield components? **Agronomy Journal**, v. 110, n. 4, p.1318-1327, 2018.

DONAGEMMA, G. K. et al. Análise Granulométrica. *In*: TEIXEIRA, P. C. et al (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017. Cap. 10. p. 95-116.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 265p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/975595/tecnologias-de-producao-de-soja---regiao-central-do-brasil-2014>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. [E-book]

FARIAS, C. E. G. **Mineração e meio ambiente no Brasil**. outubro, 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/minera.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2018.

FERREIRA, G. E. **A competitividade da mineração de ferro no Brasil**. Rio de Janeiro. Cetem/MCT, 2001. (Série Estudos e Documentos).

FOLONI, J. S. S. et al. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 49-57, fev. 2006.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Manual de recuperação de áreas degradadas: técnicas de revegetação**. Brasília: IBAMA, 1990. 96p.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Relatório anual de atividades: junho 2017 a junho 2018**. Brasília, 2018a. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Economia mineral do Brasil: setembro/2018**. Brasília, 2018b. Disponível em: <<http://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2018/08/economia-mineral-brasil-set2018.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2018.

JACOBI, C. M. et al. Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. **Biodiversity and Conservation**, Belo Horizonte, v. 16, n. 7, p.2185-2200, 7 mar. 2007.

KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E. Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na Bacia Carbonífera do Baixo Jacuí (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.1, p.79-88,1997.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.

MENDES, H. C. Nutrição do algodoeiro II - Absorção mineral por plantas cultivadas em soluções nutritivas. **Bragantia**, v. 19, n. único, p.435-457, 1960.

MIYAZAWA, M. et al. Análise química de tecido vegetal. *In*: SILVA, F.C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p.191-233.

NABI, G. et al. Germination and emergence of irrigate cotton in Pakistan in relation to sowing depth and physical properties of the seedbed. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.59, n.2, p.33-44, 2001.

NAGASHIMA, G. T.; SANTOS, F. T.; MIGLIORANZA, E. Respostas de cultivares de algodão ao cloreto de mepiquat aplicado via embebição de sementes. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 1, p.46-49, 2011.

QUINÕES, O. R. G. et al. Características de solos construídos após mineração de carvão relacionadas ao processo de construção e à composição do material utilizado. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 6, p. 1564-1571, set. 2008.

RATHORE, T. R.; GHILDYAL, B. P.; SACHAN, R. S. Germination and emergence of soybean under crusted soil conditions. **Plant and Soil**, v. 62, n. 1, p.97-105, fev. 1981.

R CORE TEAM, 2018. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

RENGEL, Z. Role of calcium in aluminum toxicity. **New Phytologist**, v. 121, n. 4, p.499-513, ago. 1992.

ROSSIELLO, R. O. P.; JACOB NETTO, J. Toxidez de alumínio em plantas: novos enfoques para um velho problema. *In*: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. Cap. 15. p. 375-418.

ROSOLEM, C. A.; BASTOS, G. B. Deficiências minerais no cultivar de algodão IAC-22. **Bragantia**, v. 56, n. 2, p.377-387, 1997.

SILVA, I. R. et al. Timing, location and crop species influence the magnitude of amelioration of aluminum toxicity by magnesium. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p.65-76, fev. 2009.

SILVA, F. C. et al. **Métodos de análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**. *In*: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p.107-189.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação

de um Latossolo Vermelho-escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.31-40, 2006.

SILVA, G. P. et al. Potencialidade de plantas para revegetação de estéreis e rejeito da mineração de ferro da mina de alegria, Mariana-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 3, p.165-172, set. 2006.

SILVA, K. E. et al. Utilização de rejeito de mineração de ferro em combinação com solo para revegetação. **Revista Árvore**, v.19, p.405-14, 1995.

SILVA, R. L. M. da; COSTA, A. G. F.; SOFIATTI, V. Seletividade do halosulfuron-methyl aplicado na dessecação antes da semeadura da cultura do algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 6, p.640-645, jan. 2014.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 416 p.

VANZOLINI, S.; CARVALHO, N. M. Efeito do vigor de sementes de soja sobre o seu desempenho em campo. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 1, n. 24, p.33-41, 2002.

VIEIRA, J. L. V. et al. Nutrient uptake by high-yielding cotton crop in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p.1-17, 15 fev. 2018.

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, Magnésio e Enxofre. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. Cap. 7. p. 299-325.

ZAPPI, D. **Paisagens e plantas de Carajás**. Belém-PA: Instituto Tecnológico Vale (ITV), 2017. 248 p. Disponível em: <<http://www.itv.org/wp-content/uploads/2017/12/Paisagem-e-Plantas-de-Carajás-versão-digital.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

