

**Estabelecimento de Espécies Arbóreo-Arbustivas  
no Rejeito de Minério de Ferro da Barragem  
do Fundão em Mariana-MG, Tratado com  
Calcário, Fertilizantes e Microrganismos**



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Milho e Sorgo  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

**BOLETIM DE PESQUISA  
E DESENVOLVIMENTO  
170**

**Estabelecimento de Espécies Arbóreo-  
Arbustivas no Rejeito de Minério de Ferro da  
Barragem do Fundão em Mariana-MG, Tratado  
com Calcário, Fertilizantes e Microrganismos**

Thomaz Correa e Castro da Costa  
Francisco Adriano de Souza  
Dea Alecia Martins Netto  
Letícia Gonçalves de Almeida  
Hebert Rocha  
João Herbert Moreira Viana  
Walter José Rodrigues Matrangolo  
Iago Henrique Ferreira da Silva  
Nayara Giovana Araujo

*Embrapa Milho e Sorgo  
Sete Lagoas, MG  
2018*

**Esta publicação está disponível no endereço:**  
<https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo/publicacoes>

**Embrapa Milho e Sorgo**  
Rod. MG 424 Km 45  
Caixa Postal 151  
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG  
Fone: (31) 3027-1100  
Fax: (31) 3027-1188  
[www.embrapa.br/fale-conosco/sa](http://www.embrapa.br/fale-conosco/sa)

Comitê Local de Publicações  
da Unidade Responsável

Presidente  
*Sidney Netto Parentoni*

Secretário-Executivo  
*Elena Charlotte Landau*

Membros  
*Antonio Claudio da Silva Barros, Cynthia Maria Borges Damasceno, Maria Lúcia Ferreira Simeone, Roberto dos Santos Trindade e Rosângela Lacerda de Castro*

Revisão de texto  
*Antonio Claudio da Silva Barros*

Normalização bibliográfica  
*Rosângela Lacerda de Castro (CRB 6/2749)*

Tratamento das ilustrações  
*Tânia Mara Assunção Barbosa*

Projeto gráfico da coleção  
*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica  
*Tânia Mara Assunção Barbosa*

Foto da capa  
*Thomaz Correa e Castro da Costa*

**1ª edição**  
*Formato digital (2018)*

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Nome da unidade catalogadora

---

Estabelecimento de espécies arbóreo-arbustivas no rejeito de minério de ferro da barragem de Fundão em Mariana-MG, tratado com calcário, fertilizantes e microrganismos / Thomaz Correa e Castro da Costa ... [et al.]. -- Sete Lagoas : Embrapa Milho e Sorgo, 2018.

43 p. : il. -- (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1679-0154; 170).

1. Degradação ambiental. 2. Recuperação. 3. Área degradada. 4. Condicionador do solo. I. Costa, Thomaz Correa e Castro da. II. Souza, Francisco Adriano de. III. Netto, Dea Alcécia Martins. IV. Almeida, Letícia Gonçalves de. V. Rocha, Hebert. VI. Viana, João Herbert Moreira. VII. Matrangolo, Walter José Rodrigues. VIII. Silva, Iago Henrique Ferreira da. IX. Araújo, Nayara Giovana. X. Série.

CDD 631.64 (21. ed.)

## Sumário

---

Resumo .....	4
Abstract .....	6
Introdução.....	7
Material e Métodos .....	9
Resultados e Discussão .....	18
Conclusões.....	43
Agradecimento .....	43
Referências .....	43
Literatura Recomendada .....	45

# Estabelecimento de Espécies Arbóreo-Arbustivas no Rejeito de Minério de Ferro da Barragem do Fundão em Mariana-MG, Tratado com Calcário, Fertilizantes e Microrganismos

Thomaz Correa e Castro da Costa<sup>1</sup>

Francisco Adriano de Souza<sup>2</sup>

Dea Alecia Martins Netto<sup>3</sup>

Letícia Gonçalves de Almeida<sup>4</sup>

Hebert Rocha<sup>5</sup>

João Herbert Moreira Viana<sup>6</sup>

Walter José Rodrigues Matrangolo<sup>7</sup>

Iago Henrique Ferreira da Silva<sup>8</sup>

Nayara Giovana Araujo<sup>9</sup>

**Resumo** – A indicação de espécies vegetais é um requisito primordial para recuperação das áreas degradadas. O êxito da recuperação inclui outros fatores, além de espécies tolerantes, que são a reconstrução da fertilidade, por meio de condicionadores de solo, adubação, fixação biológica, atividade de micorrizas e a sucessão ecológica, pois partículas ou elementos estéreis da mineração são restritivos ao desenvolvimento das plantas. O rejeito da barragem do Fundão, que atingiu o distrito de Bento Rodrigues, em Mariana-MG, além da baixa fertilidade, contém alto teor alcalino e salinidade. Assim,

---

<sup>1</sup> Engenheiro Florestal, DSc. em Ciência Florestal, Pesquisador na Embrapa Milho e Sorgo.

<sup>2</sup> Engenheiro Agrônomo, DSc. em Ecologia Molecular Microbiana, Pesquisador na Embrapa Milho e Sorgo.

<sup>3</sup> Engenheira Florestal, DSc. em Genética e Melhoramento de Plantas, Pesquisadora na Embrapa Milho e Sorgo.

<sup>4</sup> Estudante de Agronomia, bolsista na Embrapa Milho e Sorgo, UFSJ.

<sup>5</sup> Estudante de Engenharia Ambiental e Sanitária, estagiário na Embrapa Milho e Sorgo, Faculdades Santo Agostinho.

<sup>6</sup> Engenheiro Agrônomo, DSc. em Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisador na Embrapa Milho e Sorgo.

<sup>7</sup> Engenheiro Agrônomo, DSc. em Ecologia e Recursos Naturais, Pesquisador na Embrapa Milho e Sorgo.

<sup>8</sup> Estudante de Agronomia, bolsista na Embrapa Milho e Sorgo, UFSJ.

<sup>9</sup> Estudante de Engenharia Ambiental e Sanitária, bolsista na Embrapa Milho e Sorgo, Faculdades Santo Agostinho.

o ensaio testou espécies arbóreo-arbustivas indicadas para recuperação de áreas degradadas, e espécies selecionadas da flora local e regional, sem e com condicionador de solo e microrganismos (rizóbios e micorrizas), por meio da sobrevivência, altura e biomassa de plantas. A inoculação e o teor mais alto de fósforo induziram sutis aumentos no crescimento das plantas. A espécie com melhor desempenho no rejeito foi a *Sophora tomentosa* (feijão-da-praia), da Restinga. Outra espécie que sobressaiu foi a *Cratylia argentea* (cratília), forrageira e com potencial para a adubação verde e recuperação de áreas degradadas, nativa dos biomas Cerrado e Amazônia.

**Termos para indexação:** RAD, chuva de sementes, inoculantes, condicionador de solo.

## Establishment of Arboreal-Shrub Species in the Iron Ore Reject of Fundão Dam (in Mariana-Minas Gerais, Brazil), Treated with Limestone, Fertilizers and Microorganisms

**Abstract** – The indication of plant species is a primordial requirement for the recovery of degraded areas. The success of the recovery includes other factors, besides tolerant species, that are the reconstruction of the fertility, through soil conditioners, fertilization, biological fixation, mycorrhizal activity and the ecological succession, because sterile particles or elements of the mining are restrictive to the development. The refuse of Fundão dam, which reached the district of Bento Rodrigues, in Mariana, Minas Gerais, Brasil, besides low fertility, contains high alkaline content and salinity. Thus, the trial tested arboreal-shrub species indicated for the recovery of degraded areas, and selected species of local and regional flora, without and with soil conditioner and microorganisms (rhizobia and mycorrhiza), through plant survival, height and biomass. Inoculation and the higher phosphorus content induced subtle increases in plant growth. The species with the best performance in the reject was *Sophora tomentosa* (necklacepod), from Restinga. Another species that stood out was *Cratylia argentea* (cratylia), forage and with potential for green manuring and recovery of degraded areas, native to the Cerrado and Amazon biomes.

**Index terms:** RAD, seed rain, inoculants, soil conditioner.

## Introdução

A recomposição da biodiversidade é imprescindível para o equilíbrio e a sustentabilidade da vida nos vários ambientes em uma escala temporal. A degradação de ambientes naturais, flora e fauna como consequência das atividades antrópicas, é hoje um dos maiores passivos ambientais.

O rompimento da barragem do Fundão, da Samarco Mineradora no município de Mariana, em Minas Gerais, é considerado o maior desastre ambiental do Brasil, com uma área impactada de 1.775 ha, incluindo vegetação nativa (324 ha de Mata Atlântica), áreas de pasto e agrícolas e malhas urbanas na bacia do Rio Doce. Afetou também a vida marinha e a economia na região litorânea dos estados do Espírito Santo e da Bahia. Uma pequena mostra da situação na zona rural de Bento Rodrigues após o derramamento da lama de rejeito é apresentada na Figura 1.



**Figura 1.** Áreas afetadas as margens do Rio Gualaxo do Norte. Foto de abril de 2016.

Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa

Apesar deste rejeito de minério não ser considerado tóxico à saúde humana, após a passagem do vagalhão de lama que cobriu a área, parte dos sedimentos depositados alteraram os parâmetros físicos, químicos e biológicos da área afetada, dificultando a regeneração natural. Estimam-se muitas décadas para a recuperação da biodiversidade, pois existem parâmetros desfavoráveis para recolonização da vegetação nativa. Análises químicas e físicas realizadas pela Embrapa em parceria com a Emater e outros órgãos de Minas Gerais mostraram que a camada de rejeito apresenta  $\text{pH}_{\text{água}} > 8$ , teor de Na trocável de 14,4 (cmolc/kg) com saturação média de 13%, soma de bases de 1,2 cmolc/kg e textura franco siltosa, com 88 g/kg de argila, 550 g/kg de areia e 362 g/kg de silte.

Como estas características estão muito distantes do padrão médio do solo original, testar a tolerância de espécies vegetais ao rejeito é uma precaução antes de executar a revegetação em larga escala da área afetada.

Os grupos ecológicos botânicos com potencial para iniciar o processo de colonização constituem as espécies pioneiras e secundárias iniciais, que são plantas heliófitas de ciclo de vida mais curto. Nesse sentido, a seleção de espécies funcionais é fundamental, principalmente da família Fabaceae. Algumas espécies dessa família, quando associadas a microrganismos, tornam-se mais aptas à colonização de solos degradados, desprovidos de matéria orgânica, com limitações químicas, físicas e biológicas para manutenção de plantas. São plantas que mantêm relações de simbiose com microrganismos. As bactérias, do gênero *Rhizobium* e *Bradyrhizobium*, têm capacidade de fixar nitrogênio para as plantas, capturado da atmosfera. E as micorrizas têm a capacidade de auxiliar na assimilação de fósforo e outros nutrientes.

As características do sistema radicular de leguminosas contribuem também para a ancoragem do solo, junto com a adição do nitrogênio a um custo biológico e economicamente compensador. Além disso as plantas contribuem com a recuperação do solo pela deposição de material vegetal com baixa relação C/N, aumentando a atividade biológica e atuando como agente formador de matéria orgânica (Franco; Faria, 1997).

A inoculação do solo com microrganismos benéficos está cada vez mais integrada aos sistemas de produção agrícola, e tem aumentado a produção e reduzido o uso de insumos através do reequilíbrio da microbiota do solo. A simbiose micorrízica arbuscular (MA) tem sido reconhecida pelos seus efeitos benéficos múltiplos às culturas (Chantal, 1996; Moreira; Siqueira, 2006; Siqueira; Franco, 1988; Siqueira et al., 2010).

A diversidade de fungos MA no inóculo é um fator importante, principalmente quando o objetivo é a recomposição ambiental. Artigo publicado na revista *Nature* demonstrou que a produtividade e diversidade de plantas aumenta com o aumento da riqueza de fungos MA (Van Der Heijden, 1998).

Dentre os condicionadores de solo, o chamado “fino de carvão vegetal” ou moinha de carvão, produzido em ambientes controlados (pirólise em ambientes com pouco ou sem oxigênio), vem sendo estudado como potencial

para aumentar o crescimento das plantas, por meio da maior retenção de água e nutrientes no solo, por conta da sua natureza porosa e forma relativamente estável, podendo melhorar propriedades físicas e biológicas do solo (Glaser et al., 2002).

Além desses benefícios, o fino de carvão aplicado ao solo pode incrementar a atividade e diversidade microbiana. Desse modo, a fixação biológica de  $N_2$  (FBN) e a colonização radicular pelos fungos micorrízicos também são potencialmente elevados (Rondon et al., 2007; Lehmann; Rondon, 2006).

O objetivo deste trabalho foi fornecer informações para melhorar a eficiência da recuperação no rejeito da barragem do Fundão pelo teste de sobrevivência e crescimento de espécies selecionadas, pelo efeito do fino de carvão, e da simbiose por meio da inoculação de rizóbio e micorriza, com intuito de indicar espécies arbóreo arbustivas-tolerantes ao rejeito, e reconstrução da fertilidade (fertilizante, condicionador de solo e inoculante).

## Material e Métodos

---

O ensaio foi instalado em 13/06/2016, com lama de rejeito da Mineradora Samarco, coletado no derramamento em Bento Rodrigues-MG. O rejeito foi espalhado e seco ao ar livre em casa telada (Figura 2). Foram retiradas amostras para as análises químicas e físicas antes da secagem do rejeito, e realizadas a análise granulométrica e a curva de retenção de água do material antes do ensaio, conforme o Manual de Métodos de Análise de Solo (2011). As curvas de retenção de água foram feitas em amostras previamente destorroadas e acondicionadas em cilindros metálicos. O material do rejeito foi submetido à análise química completa, antes e após o experimento. Foram analisados o pH em água, acidez total, cátions trocáveis (Ca, Mg, K, Na), fósforo disponível por Mehlich I, Soma e saturação de bases, CTC total, alumínio trocável, matéria orgânica e micronutrientes disponíveis (Fe, B, Cu, Mn, Zn).

A comparação entre o rejeito e o solo não afetado em diferentes coberturas e usos da terra é mostrada na Tabela 1 e nas Figuras 3 e 4, adaptadas de Embrapa Solos (2016) e Fundação Renova (2017), indicando as limitações de fertilidade deste material, para um processo de regeneração ou de revegetação.

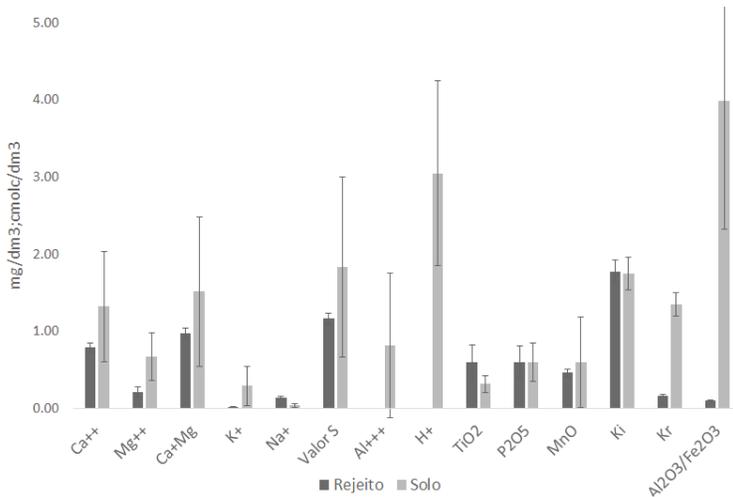
Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa



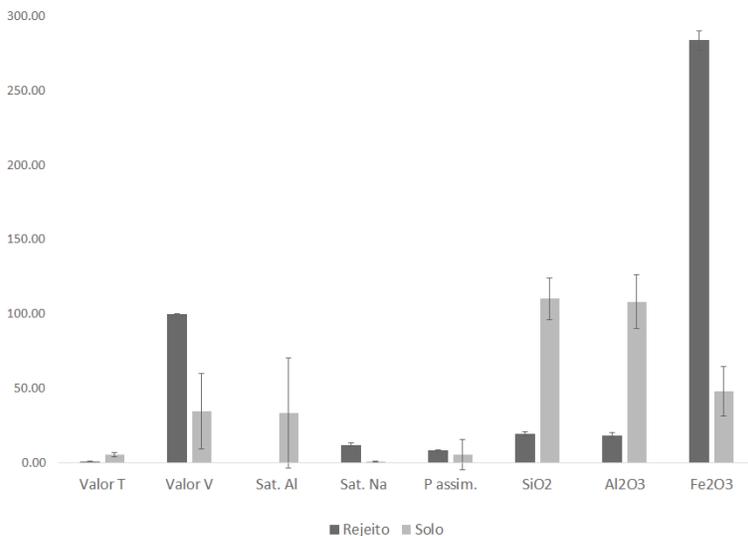
**Figura 2.** Preparo do rejeito de minério de ferro para secagem para posterior utilização em vasos experimentais. Sete Lagoas, 2016.

**Tabela 1.** Cascalho, areia grossa, fina e total, silte, argila, argila disponível, grau de floculação, relação silte/argila, densidade de partículas, pH em água e KCl, carbono orgânico, nitrogênio e relação carbono/nitrogênio, na comparação de amostras do rejeito e do solo (pastagem, área agrícola, área com mata) na área do derramamento.

Param.	Rejeito		Solo	
	Média	DP	Média	DP
Casc. (g/kg)	6.1	4.77	20.8	23.08
A.G. (g/kg)	39.4	9.29	316.0	164.75
A.F. (g/kg)	510.3	11.15	307.0	106.68
Areia total. (g/kg)	549.7	12.73	623.0	94.78
Silte. (g/kg)	362.3	25.96	154.6	57.20
Arg. (g/kg)	88.0	21.50	222.4	62.62
Arg. Disp. (g/kg)	10.0	31.62	210.4	54.98
G.F.(%)	90.0	31.62	4.8	4.44
Silte/Argila	4.6	2.21	0.7	0.28
DensPart (g/cm <sup>3</sup> )	3.0	0.14	2.6	0.14
pH H <sub>2</sub> O	8.1	0.55	5.5	0.69
pH KCl	7.7	0.66	4.4	0.63
C org. (g/kg)	1.0	0.69	9.2	3.16
N (g/kg)	0.1	0.06	1.0	0.32
C/N	7.9	2.64	8.8	1.60



**Figura 3.** Teores de Ca e Mg, K e Na, soma de bases, alumínio e hidrogênio trocável em cmolc/kg, dióxido de titânio, fósforo, manganês em g/kg, índices de intemperismo ki e kr, e relação alumínio/ferro, na comparação de amostras do rejeito e do solo (pastagem, área agrícola, área com mata) na área do derramamento.



**Figura 4.** Valor T (cmolc/kg) e V, saturação por alumínio, saturação por sódio em %, fósforo assimilável, teor de sílica, alumínio trocável em mg/kg, e teor de Fe em g/kg, na comparação de amostras do rejeito e do solo (pastagem, área agrícola, área com mata) na área do derramamento.

Dentre as plantas selecionadas, todas da família Fabaceae, duas, denominadas de E1 e E2, foram espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual na região de Sete Lagoas; duas são espécies usualmente indicadas para recuperação de áreas degradadas (maricá, *Mimosa bimucronata* (DC.) O. Kuntze e *Acacia mangium*), subfamília Mimosoideae; uma (*Cratylia argentea*) é nativa dos biomas Cerrado e Amazônia (Queiroz; Coradin, 1995), pesquisada na Embrapa Milho e Sorgo; e uma é espécie da Restinga (feijão-da-praia, *Sophora tomentosa*), adaptada às condições de elevada salinidade.

As plantas das espécies nativas originaram-se de sementes coletadas de redes fixadas em parcelas do inventário florestal nos anos 2011/2012 (Ribeiro et al., 2011; Costa et al., 2015), que estavam armazenadas em câmara fria a 10 °C e seca a 30% UR. Por causa da grande variação de sementes (Figura 5), foi realizado um tratamento genérico para quebra de dormência, de embebição em água a 80 °C por 10 minutos. As sementes tratadas foram plantadas em canteiro, e apenas duas espécies (E1 e E2), que germinaram com maior velocidade e em quantidade suficiente para o ensaio, foram transplantadas para o vaso (Figura 6).

As sementes de maricá e *Acacia mangium*, adquiridas em 2011, armazenadas em câmara fria, passaram por tratamento indicado para quebra de dormência. Para o maricá, usou-se água aquecida a 80 °C e em seguida embebição durante 16 horas. Já as sementes de acácia foram submetidas a escarificação química com ácido sulfúrico (95%) por 75 minutos.

As sementes de *Cratylia argentea* (Desvaux) O. Kuntze foram coletadas de bancos de sementes na região central de Minas Gerais, e germinadas diretamente, sem tratamento para quebra de dormência. As sementes do feijão-da-praia (*Sophora tomentosa* L.) foram coletadas na praia de Itaipuaçu, em Maricá-RJ (Figura 7) e, para quebrar dormência, aplicou-se um corte no tegumento seguido de imersão em água.

As sementes, com exceção de E1 e E2, foram semeadas em substrato papel germitest e papel mata-borrão em caixas gerbox e colocadas em germinador com temperatura controlada.

Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa



**Figura 5.** Triagem de sementes coletadas da flora local e verificação de quantidade de sementes suficientes para o ensaio. Sete Lagoas, 2016.

Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa



**Figura 6.** Transplântio das espécies E1 e E2 do canteiro com solo para vasos com lama de rejeito. 3ª foto com E1 (esquerda) e E2 (direita) em 27/01/2017.



**Figura 7.** Feijão-da-praia (*Sophora tomentosa*) na faixa da restinga em contato com a praia.

Foram definidos dois experimentos dispostos em delineamentos ao acaso com os tratamentos em fatorial com 3 repetições (Tabela 2), com duração de 14 meses, implantados em 13/06/2016. Os parâmetros foram mensurados 92, 270 e 511 dias após o plantio, finalizando com a pesagem da biomassa. No 1º experimento, foram utilizados 36 vasos (0,006842 m<sup>3</sup>), para dois níveis de P (100 e 300 g/m<sup>3</sup>), três níveis de condicionador de solo (0, 1 e 2% de moinha de carvão) (Figura 8), e dois níveis de inoculação (Figura 9): inoculados (inoc.), não inoculados (nInoc.). A inoculação de micorrizas foi realizada com um coquetel de fungos pertencentes a diferentes gêneros com riqueza total de 12 espécies. A inoculação com rizóbio utilizou uma espécie associada ao angico-branco.

No 1º experimento, foram plantadas E1, E2, maricá e *Acacia mangium*, e no 2º experimento, as espécies plantadas foram maricá, *Acacia mangium*, cratília e feijão-da-praia. No 2º experimento, foi aplicado somente o nível de 100 g/m<sup>3</sup> de P (18 vasos). Para cada vaso dos experimentos foram transplantadas quatro mudas, uma de cada espécie.

**Tabela 2.** Tratamentos aplicados nos experimentos 1 e 2.

Exper.	% carvão	P (g/m <sup>3</sup> )	Inoculação Micorrizas e Rizóbio	Espécies	Código
1	0	100	Inoc	E1,E2,	0100Inoc
1	0	100	nInoc	Maricá (M),	0100nInoc
1	0	300	Inoc	<i>Acacia mangium</i> (A)	0300Inoc
1	0	300	nInoc		0300nInoc
1	1	100	Inoc		1100Inoc
1	1	100	nInoc		1100nInoc
1	1	300	Inoc		1300Inoc
1	1	300	nInoc		1300nInoc
1	2	100	Inoc		2100Inoc
1	2	100	nInoc		2100nInoc
1	2	300	Inoc		2300Inoc
1	2	300	nInoc		2300nInoc
2	0	100	Inoc	Maricá (M),	0100Inoc
2	0	100	nInoc	<i>Acacia mangium</i> (A),	0100nInoc
2	1	100	Inoc	Cratília (C),	1100Inoc
2	1	100	nInoc	Feijão-da-praia (Fj)	1100nInoc
2	2	100	Inoc		2100Inoc
2	2	100	nInoc		2100nInoc

Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa



**Figura 8.** Mistura dos nutrientes e teores do fino de carvão à lama de rejeito. Sete Lagoas, 2016.

Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa



**Figura 9.** Inoculação com micorrizas (esquerda), e a inoculação com rizóbio (direita).

As testemunhas foram plantadas em sacos plásticos de 0,00389 m<sup>3</sup>, com solo adubado. As espécies 1 e 2, oriundas da flora local, não germinaram mudas suficientes para testemunha.

A adubação base para ambos os tratamentos foi gesso agrícola 3 kg/m<sup>3</sup>, calcário dolomítico 2 kg/m<sup>3</sup>, adubo solúvel supertriplo 100 e 300 g/m<sup>3</sup>, KCl 80 g/m<sup>3</sup>, FTE Br 12 = 87,7 g/m<sup>3</sup>, sulfato de amônio (20% N) 160,7 g/m<sup>3</sup>. Os teores de moinha de carvão foram 0, 1 e 2% por volume do rejeito (volume do vaso = 0,006842 m<sup>3</sup>).

A *Acacia mangium* apresentou baixo pegamento no transplante, por isso não foi considerada na análise. A fragilidade de sua raiz não a indica para germinação em caixas plásticas, pois sua tortuosidade dificultou o plantio, causando quebra.

Os experimentos foram instalados em casa telada com sombrite de 50% em delineamentos inteiramente casualizados em esquema fatorial com três repetições, e foram conduzidos sem restrição hídrica, com volume de rega de 0,18 L/volume do vaso de 2 em 2 dias, no período de estiagem.

Os parâmetros avaliados foram sobrevivência, crescimento em altura, fitomassa das espécies e teores de nutrientes no rejeito. Foram mensuradas as alturas totais das plantas nas três datas de monitoramento, e obtidos os pesos secos da parte aérea e da raiz das plantas em 09/11/2017. A parte aérea e raiz foram levadas para a estufa a 65 °C por 72 h para determinação do peso seco. As raízes não foram lavadas, mas foram retirados resíduos de solo remanescente, e os resíduos de solo não foram peneirados para separação de fragmentos mais finos de raiz. Assumiu-se que este procedimento não afeta a comparação relativa entre espécies.

A análise de variância foi realizada apenas para sobrevivência de plantas. Os dados de altura de plantas e fitomassa foram analisados graficamente, pois o número de amostras tornou-se insuficiente com a mortalidade de plantas, inviabilizando a estatística de dispersão em algumas amostras. Neste caso, a constatação da diferença entre tratamentos pode ser inferida pela constância ou frequência de resultados favoráveis ou desfavoráveis à hipótese.

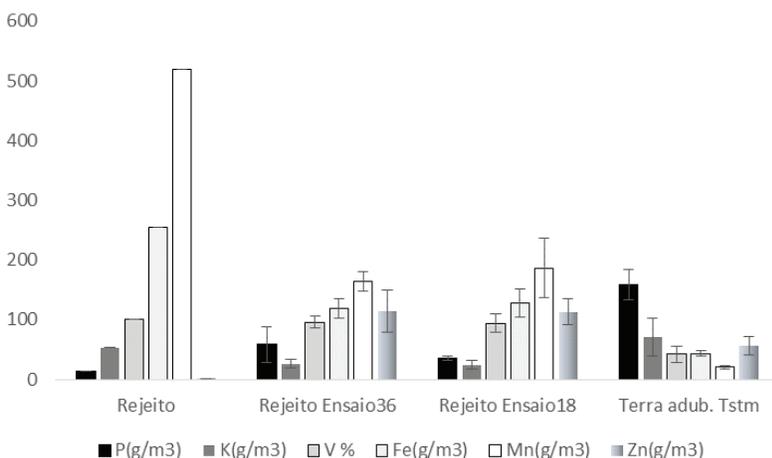
## Resultados

### Propriedades físicas e químicas do rejeito e do solo

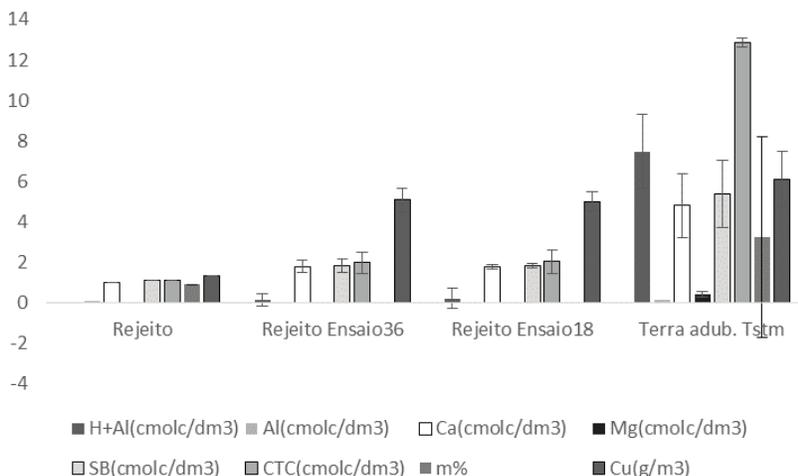
Na comparação do rejeito com o solo dos tratamentos-testemunha todos os parâmetros de fertilidade e granulometria são discrepantes entre seus teores (Figuras 10, 11 e Tabela 3). A alcalinidade do rejeito, pH-água=8, indica que não existe acidez potencial (H+Al), em contraposto ao solo adubado, que tem um pH-água em torno de 5,6, na faixa de maior absorção de nutrientes pelas plantas. Além do pH alcalino, o rejeito é estéril, com teores muito baixos de P, Zn, Ca, Mg e Cu.

Com a realização do ensaio, o rejeito apresentou melhoras em suas propriedades químicas, com aumento nos teores de P, Ca, Zn e Cu, com sutil aumento na soma de bases e capacidade de trocas catiônicas (Figuras 10 e 11). Ocorreram reduções consideráveis nos teores de Fe e Mn, provavelmente lixiviados ou absorvidos pelas plantas.

A granulometria (Tabela 3) mostra que o rejeito tem grande quantidade de partículas de silte e areia, com apenas 50 g/kg de argila, em contraposição ao solo, com 660 g/kg de argila. Com um substrato dominado por areia fina e silte, o tamanho de poros será menor, assim como a permeabilidade do solo.



**Figura 10.** Teor de P e K em g/m<sup>3</sup>, V (%), Fe, Mn e Zn em g/m<sup>3</sup>, no rejeito em situação de origem e após a realização dos ensaios 1 e 2, e do tratamento testemunha.

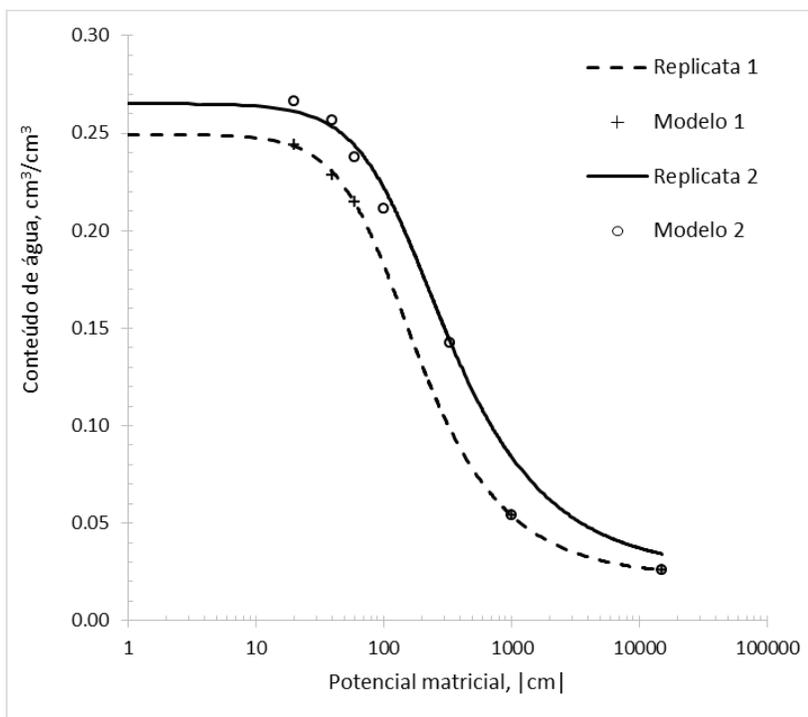


**Figura 11.** Teor de H+Al, Al, Ca, Mg, SB, CTC em  $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ , Sat. Al, m (%) e Cu ( $\text{g}/\text{m}^3$ ), no rejeito em situação de origem, e após a realização dos ensaios 1 e 2, e do tratamento testemunha.

**Tabela 3.** Granulometria (densidade de partículas, areia grossa, silte, argila) para os tratamentos no rejeito e no solo.

Tratam	Dens.part. ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Areia gros. ( $\text{g}/\text{kg}$ )	Silte ( $\text{g}/\text{kg}$ )	Argila ( $\text{g}/\text{kg}$ )
Rejeito Exper. 18/36	3.05	490	430	50
Solo Tstm	2.48	170	140	660

Este resultado é corroborado pela curva de retenção (Figura 12, Tabela 4), que mostra macroporosidade muito reduzida, indicando ser impossível atingir a aeração mínima de  $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , considerando-se apenas os macroporos. A presença de areia muito fina e silte normalmente está associada ao entupimento de poros maiores, impondo restrição na circulação de fluidos. A porosidade total, estimada pela umidade na saturação, é relativamente baixa, semelhante a solos de textura mais fina.



**Figura 12.** Resultado das curvas de retenção do material de rejeito usado no experimento, com os pontos e os modelos ajustados (2 replicatas).

**Tabela 4.** Dados\* do modelo ajustado das curvas de retenção e indicadores físicos associados.

Parâmetro	Valor	
	Modelo 1	Modelo 2
Umidade na saturação (Theta S (g/g))	0.249	0.265
Umidade residual (Theta R (g/g))	0.022	0.025
m do modelo de van Genuchten	0.452	0.408
n do modelo de van Genuchten	1.824	1.688
$\alpha$ do modelo de van Genuchten	0.011	0.008
Coefficiente de correlação do modelo ( $R^2$ )	0.999	0.994
$\psi$ mpi (cm)	142.75	226.320
$\theta$ pi ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	0.156	0.170
microporosidade	0.21	0.24
macroporosidade	0.03	0.03
umidade na tensão de 33 kPa	0.10	0.14
umidade na tensão de 1.500 kPa	0.03	0.03
Capacidade de Água Disponível na tensão de 33 kPa (CAD33)	0.07	0.11
CAD pi	0.13	0.14
Amplitude	0.23	0.24
Índice S	0.076	0.071

Além disso, a alta inclinação da curva de retenção, indicada pelo alto valor de n, indica uma baixa quantidade de poros intermediários, responsáveis por reter água no solo na faixa de umidade disponível para as plantas. Assim, o material pode apresentar-se úmido, mas essa umidade pode não estar disponível para ser aproveitada pela planta. Os baixos valores de Capacidade de Água Disponível, próximos de  $0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , estão no limiar para caracterizar os solos com baixa disponibilização de água.

Também foi observada uma umidade residual muito baixa, sugerindo baixa retenção por causa da adsorção. Essa se manifesta predominantemente em coloides com presença significativa de cargas, como a matéria orgânica e a fração argila, que é coerente com os baixos valores desses componentes

e da CTC do material. O índice S refletiu a distribuição relativa de poros, com a presença de poros grandes e de pequenos. No entanto, isoladamente, a macroporosidade é muito baixa, implicando baixa qualidade física e problemas para o desenvolvimento radicular a difusão de gases no material.

Com estas características, o rejeito tem menor retenção de umidade e menor capacidade de reter cátions, com maior perda de nutrientes por lixiviação. Na sua origem, o rejeito apresenta um material com baixos teores de cátions trocáveis, alumínio trocável e matéria orgânica, pH elevado, baixa acidez trocável, comparados aos valores de referência para solos agrícolas (CFSEMG,1995). A capacidade de fixação de fósforo também é elevada.

## **Sobrevivência e Desenvolvimento das Plantas no Rejeito**

A comparação do ensaio em 16/09/2016 (Figura 13), 13/03/2017 (Figura 14) e 01/08/2017 (Figura 15) mostra a estabilização da mortalidade e a dominância de algumas espécies. A variação no crescimento de plantas de mesma espécie, independentemente do teor de carvão, dos níveis de fósforo e da inoculação é devida à variabilidade genética entre as plantas, pois o material utilizado é nativo e foi colhido de chuva de sementes, sem escolha de árvore matriz. Nos três primeiros meses a inoculação foi mais responsiva, com menor efeito no 2º monitoramento em diante.

A Figura 16 mostra as testemunhas para cratília, maricá e feijão-da-praia, evidenciando o maior desenvolvimento das plantas de cratília e do maricá, considerando que o volume de solo para plantas testemunhas é aproximadamente 40% maior, comparado ao volume de rejeito particionado por três plantas. Já o feijão-da-praia apresentou crescimento similar às plantas no rejeito, inclusive no vigor da planta e coloração das folhas.

Os sintomas de deficiência nutricional, ou toxidade, foram amarelecimento das folhas inferiores começando pelas extremidades, em E1, E2 e maricá, que apresentou leve deficiência com amarelecimento na borda das folhas. Especula-se que a causa seja a toxidade do manganês, por seu alto teor. As espécies E1 e E2 sofreram ainda o ataque de cochonilhas. A cratília apresentou sintoma similar ao ataque de vírus, com pontos prateados na folha. O feijão-da-praia manteve-se sadio (Figura 17).

Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa



Figura 13. Experimentos 1 e 2, com monitoramento em 16/09/2016.

Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa



**Figura 14.** Experimentos 1 e 2, com monitoramento em 13/03/2017.

Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa



**Figura 15.** Experimentos 1 e 2, com monitoramento em 01/08/2017.

Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa



**Figura 16.** Plantas testemunhas de cratília, Maricá e Feijão da Praia.

Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa



Figura 17. Sintomas de deficiência nutricional ou de toxicidade.

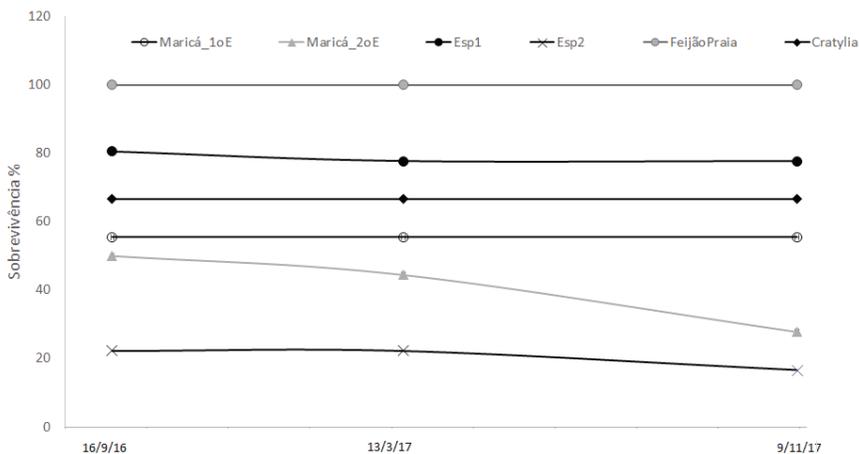
Uma das avaliações de tolerância e adaptação da espécie às condições ambientais é a sobrevivência das plantas. Na Tabela 5 estão os resultados da análise de variância de sobrevivência de plantas na 1ª mensuração para os 2 experimentos. Conforme os valores de probabilidade, todos maiores do que 5%, o número de plantas vivas remanescentes no rejeito não tem relação com nenhum fator, nem com a interação entre eles.

**Tabela 5.** Análise de variância da sobrevivência de plantas por espécie em 16/09/2016, no modelo linear generalizado, para o 1º experimento (fatorial 3 (0, 1, 2% carvão) x 2 (P100, 300 g/m<sup>3</sup>) x 2 (inoc, lnoc) = 12 tratamentos com 3 repetições, 36 vasos) e 2º experimento (fatorial 3 (0, 1, 2% carvão) x 2 (inoc, lnoc) = 6 tratamentos com 3 repetições, 18 vasos).

Pr(>F)	Exper.36			Exper.18		
	AOV GLM Binomial	M	E1	E2	M	FjPr
Carv	0.88	0.82	0.32	0.61	1	0.28
P	0.48	0.03	0.68			
Inocula	0.17	0.65	0.23	0.69	1	0.66
Carv: P	0.21	0.82	0.32			
Carv: Inocula	0.21	0.09	0.61	0.84	1	0.82
P: Inocula	0.48	0.65	0.68			
Carv: P: Inocula	0.06	0.09	0.32			

Na Figura 18 é verificada a evolução da mortalidade nas datas de monitoramento. Com exceção do maricá no exper. 36, cuja mortalidade caiu de 50 para 28%, as demais espécies estabilizaram o número de plantas vivas até o final do ensaio. Em 16/09/2016, a sobrevivência da Espécie 2 foi de 22%, finalizando em 17%. A Espécie 1 apresentou maior resistência, lançando novas folhas, e sua sobrevivência caiu de 81 para 78%. A cratília estabilizou em 67% e o feijão-da-praia não apresentou mortalidade.

O feijão-da-praia ocorre no litoral de todas as regiões tropicais do mundo. No Brasil, pode-se encontrá-la do Nordeste ao Sul. É considerada espécie típica de dunas móveis e semifixas (Nogueira, 2003). Essas características



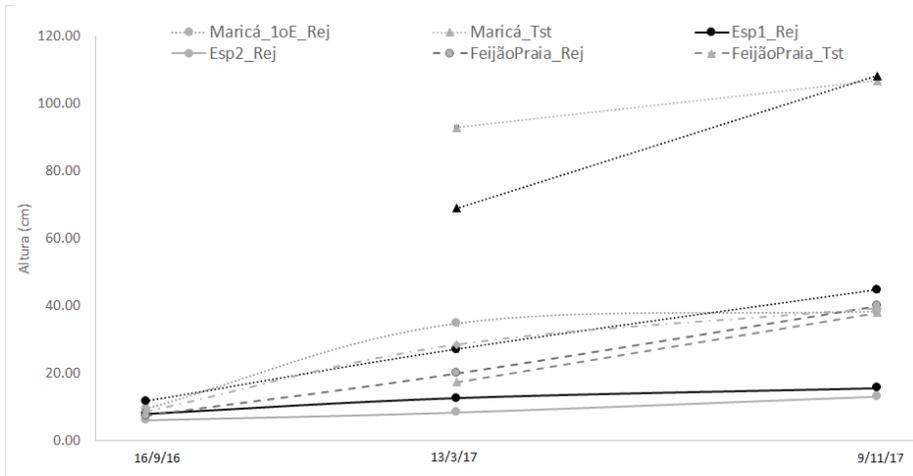
**Figura 18.** Percentagem de sobrevivência das espécies nos experimentos com rejeito.

indicam tratar-se de uma espécie cosmopolita e com rusticidade, embora sua região de ocorrência seja o litoral.

## Crescimento em altura

A Figura 19 mostra as tendências de crescimento das espécies em comparação com as testemunhas. E1 e E2 apresentaram o pior crescimento. O crescimento do maricá foi drasticamente afetado pelas características do rejeito. Suas plantas testemunhas cresceram até 4 vezes mais na testemunha. De forma similar, plantas testemunhas de cratília cresceram 3 vezes mais do que no rejeito. A única espécie que mostrou alta tolerância ao rejeito foi o feijão-da-praia, com crescimento quase idêntico, comparado à testemunha. Santos et al. (2001) já haviam detectado maior crescimento do feijão-da-praia em resíduo industrial salino, comparado com o substrato turfa. Essas evidências mostram que esta espécie pode ser indicada para substratos salinos, como o rejeito de Mariana. A dúvida seria sua adaptação na região de Mariana, em razão da sua ocorrência restrita ao litoral, diferente da condição climática estacional.

Para inferir sobre a possibilidade de resposta dos efeitos de tratamento no crescimento das plantas sem análise de variância, foram analisadas

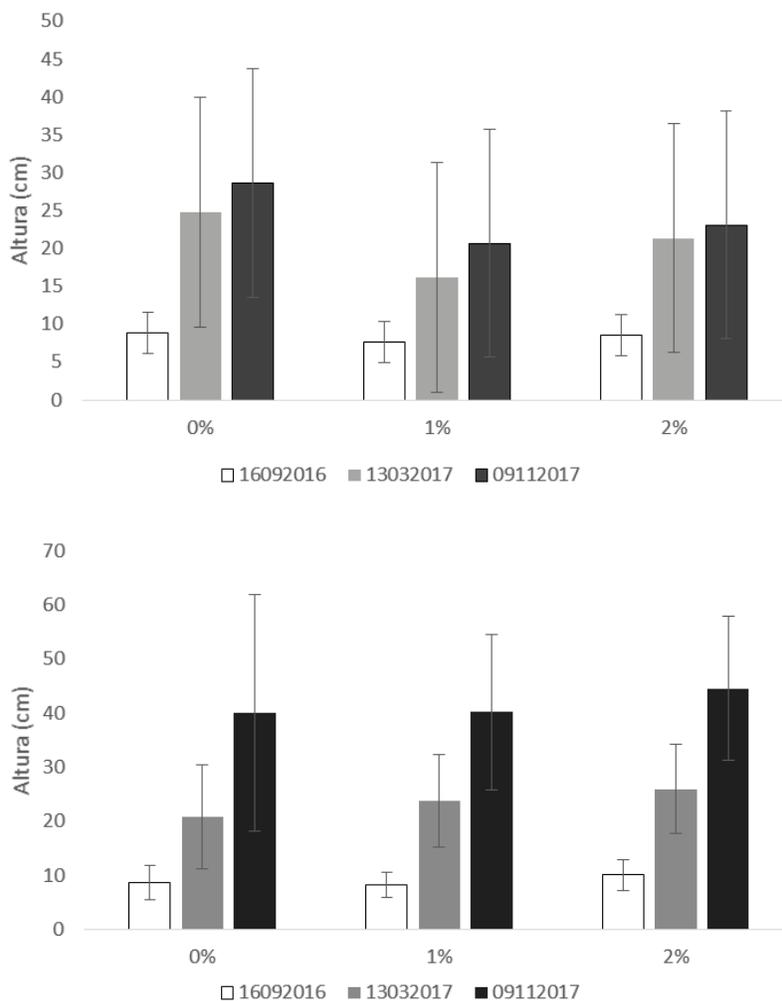


**Figura 19.** Crescimento em altura das espécies no rejeito (Rej) e das testemunhas em solo (Tst).

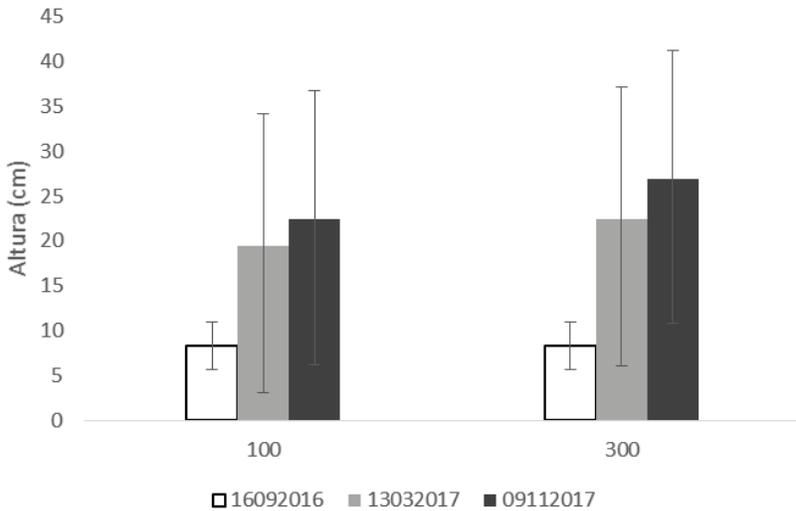
graficamente as tendências para teor de moinha de carvão no rejeito, nível de fósforo, desconsiderando a espécie, e o efeito da inoculação nos níveis de fósforo e teores de moinha de carvão, em relação às tendências esperadas. Desvios padrões estão elevados pela não separação da altura por espécie.

Para teores de moinha de carvão, a hipótese é que quanto maior o teor no rejeito maior a altura de plantas. Na Figura 20, observando valores médios, além de não constatar tendências, as maiores alturas foram observadas nas amostras com ausência da moinha de carvão para o exper.36. No exper.18 as alturas apresentaram variações mais próximas da tendência esperada, mas com sutis diferenças. Pode-se inferir que os teores de moinha de carvão aplicados não foram suficientes para detectar seus efeitos. Por outro lado, não justifica aumentar seu percentual no volume de solo, pois sua recomendação torna-se inviável na prática. A aplicação de 2% de moinha de carvão em 1 ha já exigiria 2 toneladas para 20 cm de profundidade no solo.

No caso da aplicação de P, as plantas cresceram, a partir do 2º período, entre 3 e 5 cm a mais na aplicação de 300 g/m<sup>3</sup> (Figura 21).



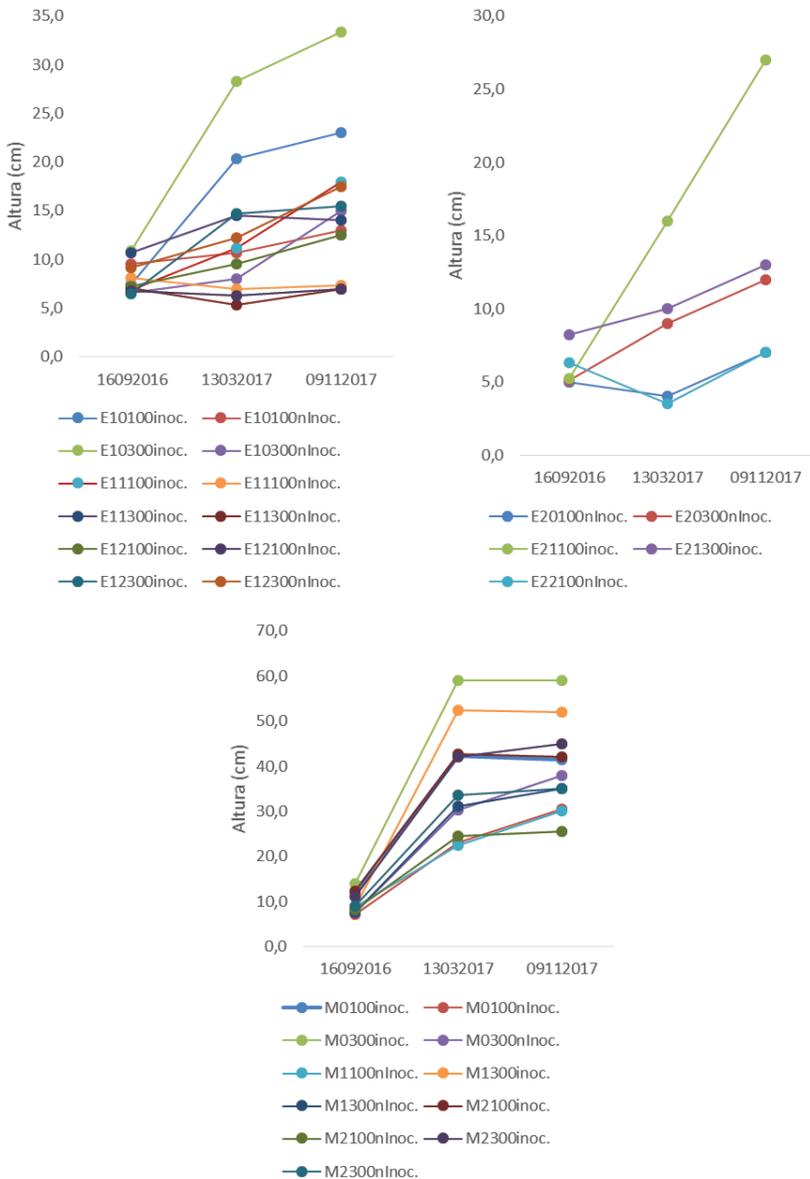
**Figura 20.** Média e desvio padrão entre altura de plantas nos vasos com teores de 0, 1 e 2% de moinha de carvão para os experimentos 1 e 2.



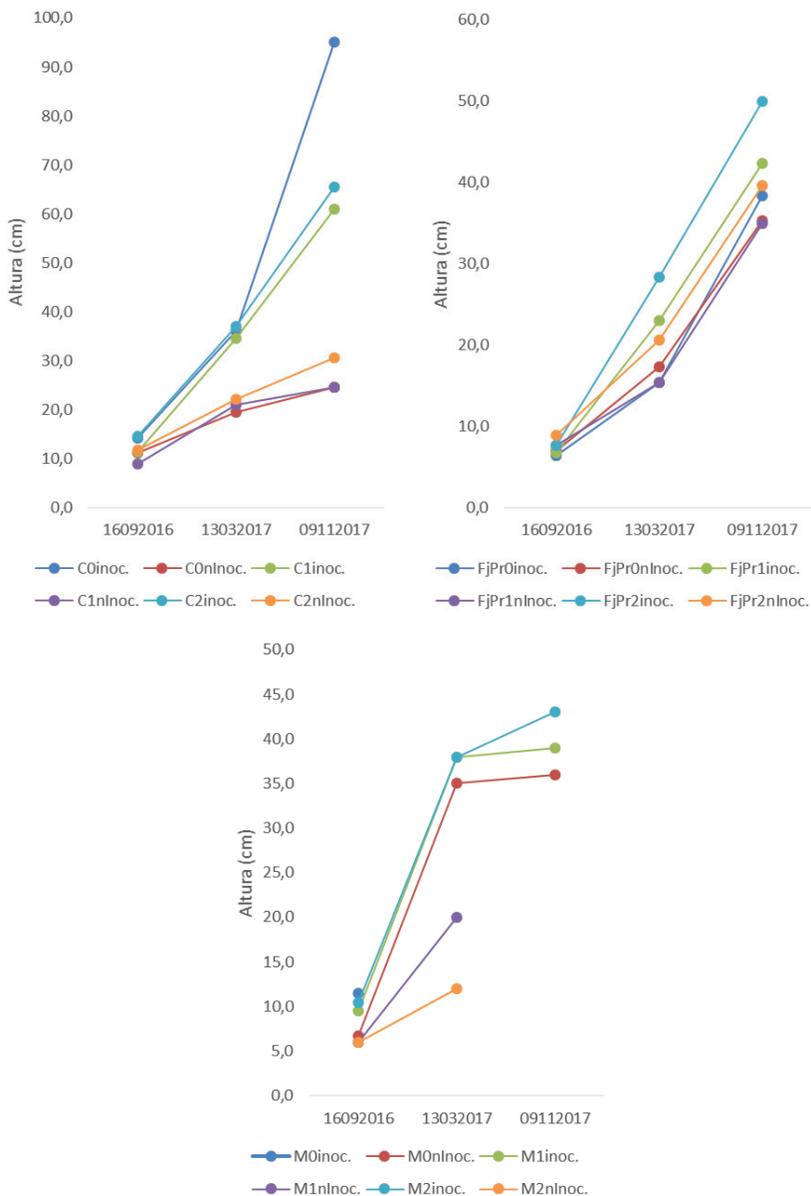
**Figura 21.** Média e desvio padrão entre altura de plantas nos vasos com teores de P de 100 e 300 g/m<sup>3</sup> para o exper.36.

Na avaliação do efeito da inoculação, em E1 verificou-se que as combinações sem inoculação tiveram menor crescimento (Figura 22). A única exceção ocorreu no tratamento E12300Inoc, que combinou nível de fósforo 300 g/m<sup>3</sup> e 2% de teor de moinha de carvão. Os tratamentos que se destacaram foram os inoculados com 300 de P e 100 de P, ambos com 0% de moinha de carvão. Para as espécies E2 e maricá (M), os inoculados apresentaram maior crescimento sem exceções, no exper.36.

Na Figura 23, no exper.18, ocorreu nítida diferença entre os tratamentos inoculados e não inoculados para cratília e maricá, indicando que estas espécies desenvolveram relação simbiótica mais eficiente com microrganismos. E a mortalidade de todas as plantas do maricá ocorreu somente nos tratamentos não inoculados, ao final do monitoramento. Já a espécie feijão-da-praia, também com maior crescimento nos tratamentos inoculados, apresentou diferenças sutis entre os dois grupos, inoc. e nInoc.



**Figura 22.** Desenvolvimento em altura das espécies E1, E2 e maricá (M) pela combinação dos efeitos de P e inoculação no experimento 1. Alguns tratamentos não aparecem por causa da ausência de dados ocasionada pela mortalidade.



**Figura 23.** Crescimento em altura das espécies cratílica (C), feijão-da-praia (FjPr), e maricá (M) pela combinação dos efeitos de P e inoculação no exper.18.

Um provável impacto do desastre foi a morte da microbiota do solo na região afetada, ou o alcance inacessível as raízes por causa da camada de lama, indicando a importância do acréscimo de microrganismos nos tratamentos com rizóbios e MA, que foi capaz de ativar o metabolismo e promover maior desenvolvimento das plantas.

## **Avaliação da fitomassa aérea e de raiz**

A Figura 24 mostra as plantas com raízes e seus respectivos nódulos. As plantas de maricá apresentaram desenvolvimento indicando estagnação e estado debilitado. As espécies nativas E1 e E2, embora não atingindo bom desenvolvimento da parte aérea e sofrendo com doenças, pragas e possível toxicidade, desenvolveram volume maior de raízes, desproporcionalmente a parte aérea, com a maioria enovelando no fundo do vaso. Plantas de feijão-da-praia e cratília apresentaram bom desenvolvimento de raízes, compatíveis com o da parte aérea.

As plantas que apresentaram nodulação foram feijão-da-praia, cratília e E2 (Figura 25), indicando que desenvolveram relações simbióticas com bactérias diazotróficas, principalmente para absorção de nitrogênio. Na Figura 26 as espécies que responderam aos tratamentos de inoculação foram maricá e E1, com exceção nos dois últimos tratamentos (2100 e 2300). E2, por sua alta mortalidade, não pôde ser avaliada. No exper.18, feijão-da-praia apresentou maior massa de raízes nos tratamentos não inoculados, e cratília aumentou sua massa de raízes em 2 dos 3 tratamentos. Maricá não pôde ser avaliada em razão mortalidade.

Referente à relação do peso da parte aérea pelo peso da raiz (Figura 27), as plantas testemunhas de maricá desenvolveram maior massa de raízes em relação à parte aérea, mesmo atingindo alturas muito maiores do que as plantas que se desenvolveram no rejeito. As plantas testemunhas de feijão-da-praia e cratília não apresentaram grandes diferenças na relação raiz/parte aérea em comparação com as plantas no rejeito. Outra constatação de tolerância da espécie ao rejeito é dada na Figura 28, que mostra a densidade de raízes. Enquanto maricá e cratília têm grandes diferenças de densidade de raiz entre o tratamento testemunha e plantas que cresceram no rejeito, feijão-da-praia apresentou aproximadamente a mesma densidade, indicando que esta espécie teve relação de parte aérea com raiz aproximadamente iguais no rejeito e em solo testemunha, sendo mais uma indicação de tolerância ao estéril da barragem do Fundão.

Fotos: Thomaz Correia e Castro da Costa



Figura 24. Plantas de feijão-da-praia, cratília, maricá, E1 e E2.

Fotos: Thomaz Correa e Castro da Costa



(FjP)



(E2)

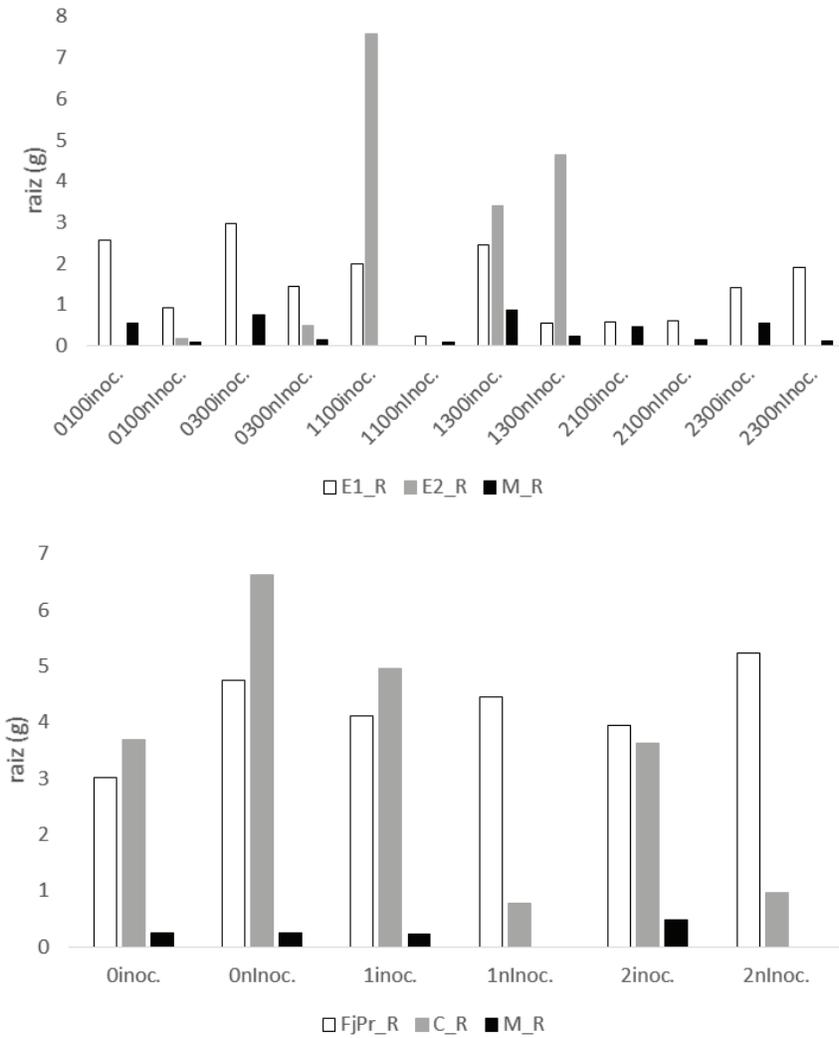


(FjP)

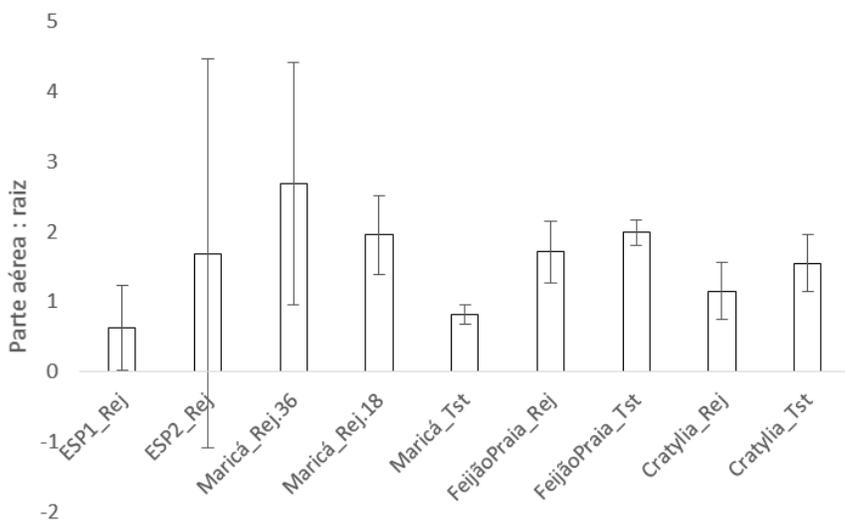


(C)

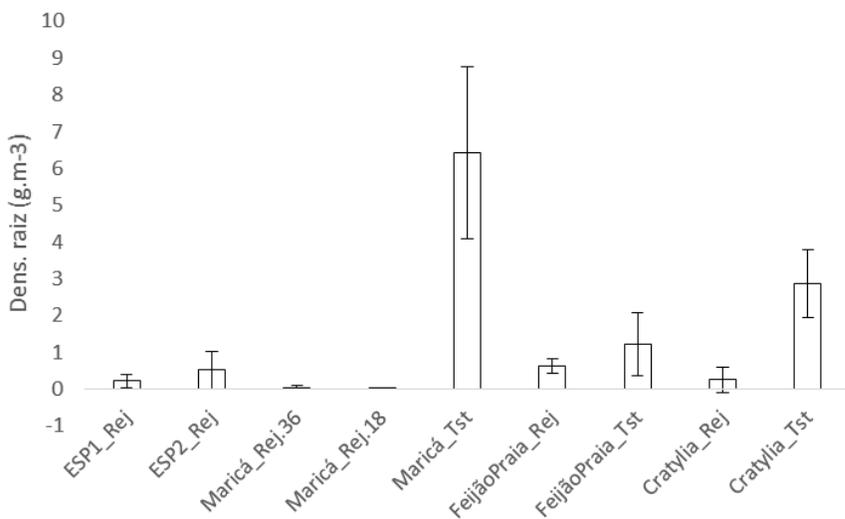
**Figura 25.** Nódulos nas raízes do feijão-da-praia (FjPr) nas raízes de cratília (C) e da E2..



**Figura 26.** Fitomassa de raiz entre tratamentos para espécies E1, E2 e M no exper.36, e para espécies FjPr, C e M no exper.18.



**Figura 27.** Razão Parte aérea: Raiz das espécies no rejeito (Rej) e testemunhas (Tst).



**Figura 28.** Densidade de raiz das espécies no rejeito (Rej) e testemunhas (Tst).

## Conclusão

---

A espécie com melhor desempenho no rejeito foi a *Sophora tomentosa* (feijão-da-praia). Outra espécie que sobressaiu, mas apresentou mortalidade, foi a *Cratylia argentea* (cratília). Maricá não se mostrou tolerante ao rejeito, assim como as espécies E1, que se manteve estagnada, e E2, com estagnação e alta mortalidade. Inoculações com rizóbio e micorriza melhoraram sutilmente o desenvolvimento das plantas, mas os teores de moinha de carvão até 2% não interferiram no desenvolvimento.

## Agradecimento

---

Nosso agradecimento a Monica Imaculada Ribeiro, pelo trabalho de germinação no Laboratório de Sementes; a Vilmar Ferreira Martins, Francimar Roberto da Silva e Cleber Alves da Cruz, pelo suporte na montagem e manutenção deste ensaio; aos funcionários da Samarco, Wilson de Assis Gouveia, Álvaro José Ribeiro Pereira e Luiz Flavio Pereira Costa, pelo estímulo e fornecimento do rejeito para a pesquisa; e a Ivanildo Evódio Marriel pelo fornecimento do inóculo de rizóbio.

## Referências

---

CHANTAL, H. Prospects and problems pertaining to the management of arbuscular mycorrhizae in agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 60, p. 197-210, 1996.

COSTA, T. C. e C. da; SILVA, A. F.; OLIVEIRA, L. M. T. D.; VIANA, J. H. M. Probabilistic classification of tree and shrub vegetation on phytogeographic system. **Journal of Environmental Science and Engineering B**, v. 4, n. 6, p. 315-330, June 2015.

EMBRAPA SOLOS. **Avaliação dos impactos causados ao solo pelo rompimento de barragem de rejeito de mineração em Mariana, MG**: apoio ao Plano de Recuperação Agropecuária. Rio de Janeiro, 2016. 20 p. Relatório técnico.

FRANCO, A. A.; FARIA, S. M. The contribution of N<sub>2</sub>-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 29, n. 5/6, p. 897-903, 1997.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Rompimento da barragem de rejeitos de Fundão**: programa de caracterização geoquímica de rejeitos, solos e sedimentos. Belo Horizonte, 2017. 4.199 p. Relatório RT-015\_159-515-2282\_03-J. Consultoria Golder Associates Brasil. Disponível em: <<http://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2018/01/geoquimico.zip>>. Acesso em: 8 mar. 2018.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, p. 219-230, 2002.

LEHMANN, J.; RONDON, M. Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. In: UPHOFF, N.; BALL, A. S.; FERNANDES, E.; HERREN, H.; HUSSON, O.; LAING, M.; PALM, C.; PRETTY, J.; SANCHEZ, P.; SANGINGA, N.; THIES, J. (Ed.). **Biological approaches to sustainable soil systems**. Boca Raton: CRC, 2006. cap. 36, p. 518-527.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

NOGUEIRA, E. M. L. **Ecologia reprodutiva de Sophora tomentosa L. (Leguminosae) em restinga da praia da Joaquina, Florianópolis, SC**. 2003. 65 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

QUEIROZ, L. P. de; CORADIN, L. Biogeografia de Cratylia e áreas prioritárias para coleta. In: TALLER DE TRABAJO SOBRE CRATYLIA, 1995, Brasília, DF. **Potencial del genero Cratylia como leguminosa forrajera**: memorias. Cali: CIAT, 1995. p. 11-15.

RIBEIRO, J. L.; CARVALHO, S. E. F.; RAID, M. A. M.; NETTO, D. A. M.; COSTA, T. C. C. Avaliação da germinação de sementes de fragmentos florestais receptadas em redes visando recomposição da flora local. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE REFLORESTAMENTO AMBIENTAL, 2011, Guarapari. **Produção de água**: [anais.]. Vitória: Cedagro, 2011. Disponível em: <[http://www.cedagro.org.br/downloads/20121122\\_reflorestamento/Ribeiro.Juliana%20-%20Oral.pdf](http://www.cedagro.org.br/downloads/20121122_reflorestamento/Ribeiro.Juliana%20-%20Oral.pdf)>. Acesso em: 12 set. 2018.

RONDON, M. A.; LEHMANN, J.; RAMÍREZ, J.; HURTADO, M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 43, p. 699-708, 2007.

SANTOS, E. C.; GOI, S. R.; JACOB NETO, J. Proposta de utilização de *Sophora tomentosa* L. sub espécie *littoralis* (Schrad) Yakove para recuperação de áreas com resíduo industrial salino. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 216-218, jan./dez. 2001.

SIQUEIRA, J. O.; FRANCO, A. A. **Biotechnologia do solo**: fundamentos e perspectivas. Brasília, DF: MEC; Lavras: ESAL: FAEPE, 1988. 235 p.

SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. (Ed.). **Micorrizas**: 30 anos de pesquisa no Brasil. Lavras: UFLA, 2010. v. 1. 716 p.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; KLIRONOMOS, J. N.; URSIC, M.; MOUTOGLIS, P.; STREITWOLF-ENGEL, R.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A.; SANDERS, I. R. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. **Nature**, v. 396, p. 69-72, 1998.

## Literatura Recomendada

---

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V. V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5a aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

**Embrapa**

---

**Milho e Sorgo**

BOLETIM DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO 170



Ministério da  
Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento



CGPE 14914

