

SELEÇÃO DE ESPÉCIES ARBÓREAS PARA REVEGETAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR MINERAÇÃO DE PIÇARRA NA CAATINGA¹

KHADIDJA DANTAS ROCHA DE LIMA^{2*}, GUILHERME MONTANDON CHAER³, JANAÍNA RIBEIRO COSTA ROWS⁴, VANDER MENDONÇA⁵, ALEXANDER SILVA DE RESENDE⁶

RESUMO – A piçarra, material de subsolo formado por silte, areia e cascalho, é comumente usada na construção civil e atividades ligadas à produção de petróleo em terra no bioma Caatinga. A revegetação das jazidas de piçarra com exploração finalizada é obrigatória e normalmente demanda o plantio de árvores de espécies nativas. No entanto, há pouca informação sobre espécies arbóreas capazes de se desenvolver nesses ambientes degradados. Este trabalho avalia o desenvolvimento inicial e a sobrevivência de 20 espécies arbóreas, incluindo espécies nativas e exóticas, e espécies nodulantes e não-nodulantes, plantadas em cinco jazidas de extração de piçarra distribuídas em três municípios do Rio Grande do Norte (RN). O experimento foi delineado em blocos com parcelas subdivididas onde se comparou 10 espécies nodulantes em relação a outras 10 não-nodulantes em áreas com e sem aplicação de solo superficial (camada de 20 cm) e/ou de esterco bovino na cova de plantio (2 L/cova). Foram realizadas avaliações biométricas ao final das estações seca e chuvosa (fevereiro de 2008 a fevereiro de 2010) até aos 660 dias após o plantio. A adição de solo superficial reduziu a sobrevivência das árvores, especialmente das espécies não-nodulantes. Ao contrário, a adição de esterco favoreceu o crescimento das árvores. As espécies nodulantes superaram as demais quanto à taxa de sobrevivência, altura total, diâmetro da base e taxa de crescimento. As espécies nativas que obtiveram o melhor desenvolvimento no substrato foram *Mimosa tenuiflora*, *Mimosa caesalpiniiifolia*, *Caesalpinia ferrea* e *Tabebuia caraiba* e dentre as exóticas foram *Azadirachta indica* e *Pseudosamanea guachapele*.

Palavras-chave: Degradação do solo. Fixação biológica de nitrogênio. Leguminosas arbóreas. Áreas de mineração. Recuperação de áreas degradadas.

SELECTION OF TREE SPECIES FOR REVEGETATION OF AREAS DEGRADED BY PIÇARRA MINING IN THE CAATINGA BIOME

ABSTRACT – The piçarra (subsoil material mainly formed by silt, sand and gravel) is commonly used in the civil construction and activities related to the onshore oil production in the Caatinga biome. The revegetation of the piçarra mines at the end of exploration cycle is mandatory and generally demands the planting of native tree species. However, there is scarce information about tree species able to grow in these degraded environments. This study aimed to evaluate the development and survival of 20 tree species, including native and exotic species, and nodulating and non nodulating species, planted in five piçarra mines located in three cities in the state of Rio Grande do Norte, Brazil. The experiment was a split-split block design, where 10 nodulating tree species were compared with ten other non nodulating species in areas with and without addition of a 20 cm topsoil layer and/or 2 L cattle manure in the planting hole. Biometric measurements were made at the end of the dry and rainy seasons (February 2008 to February 2010) up to 660 days after planting. The addition of topsoil reduced the survival of trees, especially of non nodulating species, likely due to the vigorous herbaceous regeneration in this treatment. Conversely, the addition of manure favored the tree growth. The nodulating species outperformed the non nodulating in respect to survival rate, total height, trunk diameter, and growth rate. The native species with the best survival and development rates were *Mimosa tenuiflora*, *Mimosa caesalpiniiifolia*, *Caesalpinia ferrea* and *Tabebuia caraiba*, and among the exotics were *Azadirachta indica* and *Pseudosamanea guachapele*.

Keywords: Soil degradation. Biological nitrogen fixation. Legume tree species. Mining areas. Reclamation of degraded lands.

*Autor para correspondência

¹Recebido para publicação em 07/03/2014; aceito em 26/09/2014.

Trabalho de Dissertação do primeiro autor apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo da UFERSA, Caixa postal 137, 59 625 900, Mossoró (RN), Brasil.

²Engenheira Agrônoma, Mestre em Ciência do Solo pela UFERSA e Doutoranda do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo da UFRRJ, Seropédica (RJ), Brasil, khadidjadantas@hotmail.com.

^{3,4,6}Pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica (RJ), Brasil, guilherme.chaer@embrapa.br, janaina.rows@embrapa.br, alexander.resende@embrapa.br.

⁵Professor do Departamento de Ciências Vegetais, UFERSA, Caixa Postal 137, 59625-900, Mossoró (RN), Brasil, vander-m2000@hotmail.com.

INTRODUÇÃO

A produção de petróleo em terra firme (“*onshore*”) é uma das principais atividades econômicas do Estado do Rio Grande do Norte (ANP, 2012). Um impacto ambiental pontual, mas importante dessa atividade, é causado pela extração de piçarra, um material de subsolo composto principalmente por silte, areia e cascalho e usado para a construção de acessos e bases para instalação das estruturas de exploração e produção de petróleo e gás natural. No Estado, a extração da piçarra é originária de inúmeras jazidas e promove alterações na paisagem e nos fluxos hidrológicos, na eliminação da diversidade biológica e na degradação do solo (BATISTA et al., 2009; SHRESTHA; LAL, 2011; SILVA et al., 2012).

Ao final da atividade de mineração, a área deve ser recuperada buscando o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo, visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente (Decreto lei 97.632/89). No entanto, esses ambientes possuem baixa capacidade de resiliência, decorrente da baixa densidade de propágulos, baixa qualidade físico-química do substrato e baixa oferta de chuvas, característica da região semiárida (PAGANO et al., 2011; FIGUEIREDO et al., 2012; SOLIVERES; MONERRIS; CORTINA, 2012). Dessa forma, a recuperação dessas jazidas é um grande desafio, agravado pela carência de informações, como sobre a adaptabilidade de espécies vegetais ao substrato das jazidas e técnicas de manejo que propiciam o melhor desenvolvimento e sobrevivência destas.

Na recuperação de ambientes degradados por mineração é desejável a introdução de espécies com altas taxas de crescimento e sobrevivência que permitam promover o rápido recobrimento do solo, alta produção de matéria orgânica e proteção do solo contra erosão, propiciando o restabelecimento de outras espécies vegetais durante o processo sucessional (CHAER et al., 2011; RESENDE et al., 2013). Vários estudos têm destacado essas características em várias espécies de leguminosas arbóreas (que se associam a bactérias do gênero *Rhizobium* (rizóbios) e a fungos micorrízicos arbusculares (FMA), respectivamente) na recuperação de áreas degradadas por atividade de mineração (MACEDO et al., 2008; KHADE; RODRIGUES, 2009; SHEORAN; POONIA, 2010; CHAER et al., 2011). No entanto, a maioria desses estudos foi realizada em regiões tropicais úmidas do Brasil (RODRIGUES et al., 2007; MACEDO et al., 2008; ALVES; SOUSA, 2011).

Outro ponto fundamental para acelerar a recuperação ambiental de áreas degradadas por mineração é a melhoria das condições químico-físicas do substrato. Dentre as técnicas mais recomendadas, a aplicação de *topsoil* permite repor parte da camada de solo fértil e rica em propágulos perdida durante o

processo de exploração mineral e, portanto, o rápido recobrimento da área por vegetação (JACINTHE; LAL, 2007; MUKHOPADHYAY; RIVERA et al., 2012; MAITI; MASTO, 2014;). No entanto, não há estudos que relatem a eficiência da aplicação dessa técnica em áreas degradadas pela exploração e piçarra no semiárido brasileiro.

Este trabalho objetivou comparar o estabelecimento (crescimento e sobrevivência) de 10 espécies de leguminosas nodulantes (inoculadas com FMA e rizóbios) com 10 espécies não-nodulantes (inoculadas apenas com FMA) plantadas em áreas com e sem a aplicação de *topsoil* e adubação orgânica, durante 22 meses. Visando aumentar o escopo de inferência dos resultados, o estudo foi conduzido simultaneamente em cinco jazidas de piçarra localizadas em três municípios da mesorregião Oeste Potiguar do Rio Grande do Norte.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionadas cinco jazidas de piçarra com lavras exauridas para a condução do estudo. As jazidas estão situadas na área de atuação da Unidade de Operações de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará (UO-RNCE; Petrobras S.A.), sendo uma localizada no município de Assu (jazida DJ-118-1 (UTM 24M 9401656,33E/733895,43S)), três no município de Pendências (jazidas SJ-155 (UTM 24M 9414244,59E/755907,98S), AJ-111-1 (UTM 24M 9418027,14E/768278,6S) e ZJ-111-2 (UTM 24M 9418219,06E/768376,11S)), e uma no município de Areia Branca (FJ-072 (UTM 24M 9446114,32E/719250,65S)), todas no Estado do Rio Grande do Norte (mesorregião Oeste Potiguar).

O clima da região, pelo sistema de Thornthwaite, é semiárido, e de acordo com a classificação de Köppen é do tipo BSw^h, portanto seco e muito quente, com duas estações climáticas: uma seca, que vai geralmente de junho a janeiro; e outra chuvosa (fevereiro a maio) (CARMO FILHO et al., 1991). A série mensal de precipitação e temperatura máxima média durante o período experimental é apresentada na figura 1.

O experimento foi instalado em março de 2008, com delineamento em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas (*split-splitplot design*), com cinco repetições. Cada bloco experimental foi constituído de uma área homogênea de 60 x 70 m locada em cada uma das jazidas. Em cada bloco experimental foram dispostas duas parcelas de 20 x 40 m, onde em uma delas foi aplicada uma camada de 20 cm de solo superficial (*topsoil*), e na outra não foi aplicado *topsoil*, permanecendo apenas o substrato da jazida (piçarra). O *topsoil* foi originado da abertura de novas frentes de lavra de jazidas de piçarra ou de novas locações de poços petrolíferos

próximos a cada jazida. Logo, os *topsoil* adicionados, assim como o substrato inerente de cada jazida,

apresentavam origem e características químicas e físicas diferentes (Tabela 1).

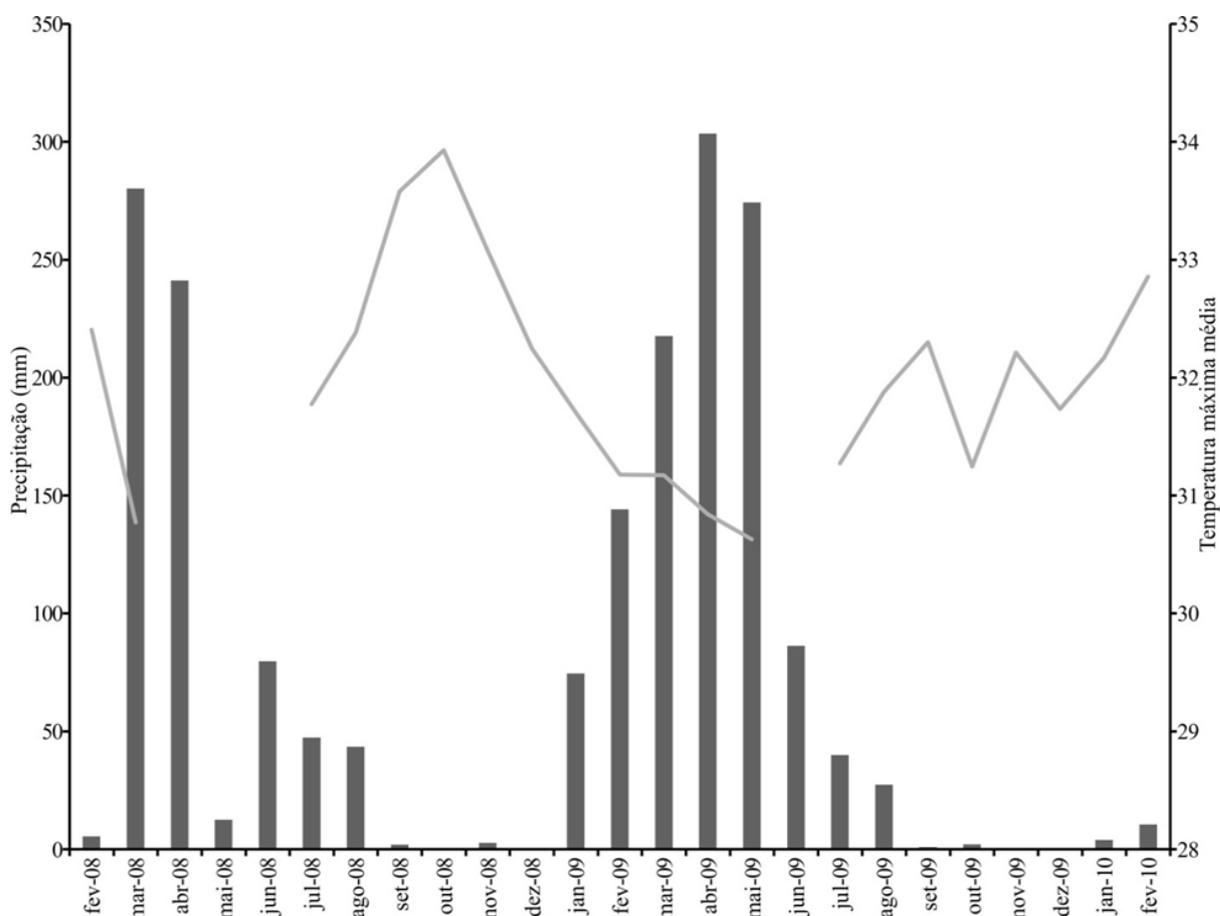


Figura 1. Precipitação e temperatura máxima média mensal do período compreendido entre fevereiro de 2008 a fevereiro de 2010 obtidos pela estação meteorológica de Macau (RN) (Fonte: INMET, <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>).

Tabela 1. Caracterização química e classe textural do solo superficial (*topsoil*) adicionado e do substrato nativo (piçarra) das cinco jazidas estudadas.

Substratos	Jazidas	pH Unid.	C ... (%)...	N	P (mg/L)	Al	H+Al	Ca	K	Mg	SB	CTC	V (%)	*Casse textural
Solo superficial (<i>Topsoil</i>) Utilizado	DJ-118-1	5,3	0,18	0,05	3,41	0,06	0,48	0,9	0,40	0,6	1,90	4,01	47	Ar
	SJ-155	7,9	0,76	0,14	0,92	0,00	0,47	16,8	0,22	2,19	19,21	20,34	94	FrAgAr
	AJ-111-1	8,0	0,65	0,12	1,56	0,00	0,31	14,7	0,20	1,92	16,82	17,12	98	FrAgAr
	ZJ-111-2	5,3	0,11	0,04	1,79	0,15	0,94	0,9	0,08	0,31	1,29	2,59	50	Are
	FJ-072	7,8	0,89	0,15	5,03	0,00	0,27	17	0,83	5,13	22,96	25,61	90	FrAgAr
Substrato nativo da jazida (piçarra)	DJ-118-1	4,9	0,12	0,07	3,09	0,17	2,81	2,2	0,56	2,35	5,11	9,21	55	Ag
	SJ-155	5,2	0,05	0,03	1,19	1,59	3,83	14,3	0,06	9,44	23,80	24,98	95	Ag-Ar
	AJ-111-1	5,2	0,03	0,03	1,78	0,97	2,65	3	0,12	4,73	7,85	9,39	84	FrAgSi
	ZJ-111-2	4,6	0,27	0,03	1,00	0,53	3,28	1,7	0,09	1,32	3,11	3,61	86	FrAgSi
	FJ-072	4,5	0,05	0,02	1,85	1,06	1,97	0,8	0,02	0,82	1,64	3,74	44	FrAgSi

*Classe textural: Ag – Argilosa; Ar – Arenosa; FrAgAr – Franco-argilo-arenosa; Ag-Ar – Argilo-Arenosa; e FrAgSi – Franco-Argilo-Siltosa.

Métodos: pH – água 1:2,5; C – Walkley; Black; N – Kjeldahl; P – Melich 3/colorimetria; K – Melick 3/fotometria de chama; Ca e Mg – extrato KCl/absorção atômica; Al – extrato KCl/titulometria; e H+Al – tampão acetato de cálcio/titulometria. Métodos descritos em detalhe por Embrapa (1997).

Em cada parcela (com ou sem *topsoil*) foram plantadas 10 mudas de leguminosas arbóreas nodulantes (seis nativas e quatro exóticas ao bioma Caatinga) e 10 mudas de espécies não-nodulantes (sete

nativas e três exóticas ao bioma Caatinga) pertencentes a diversas famílias botânicas (Tabela 2). O principal critério de escolha das espécies nativas foi a disponibilidade de sementes no período de implantação

do experimento. Para as espécies exóticas, além da disponibilidade de sementes, levou-se em consideração o fato de algumas das espécies escolhidas apresentarem bom crescimento em estudos de revegetação de áreas degradadas por remoção de horizontes realizados em outros biomas (FRANCO; FARIA, 1997; MACEDO et al., 2008; RESENDE et al., 2013), portanto, servindo como referencial para o desenvolvimento das espécies nativas testadas. As espécies leguminosas nodulantes foram inoculadas, ainda na fase de produção das mudas em viveiro,

com estirpes de rizóbios e propágulos de FMA, conforme recomendações de Resende et al. (2010) e Faria et al. (2010). Todos os inoculantes foram produzidos e fornecidos pela Embrapa Agrobiologia, localizada em Seropédica (RJ). As espécies arbóreas não-nodulantes foram inoculadas apenas com FMA. Para contrastar o desenvolvimento das 10 espécies nodulantes em relação às 10 espécies não-nodulantes estes dois grupos foram separados espacialmente em subparcelas.

Tabela 2. Espécies arbóreas testadas para revegetação das cinco jazidas de exploração de piçarra na Caatinga.

Espécies	Nome Científico	Nome Vulgar
Nodulantes	<i>Erythrina velutina</i> Willd.	mulungu
	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) KunthexWalp.*	gliricidia
	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	jurema preta
	<i>Pseudosamanea guachapele</i> (Kunth) Harms*	guachapele
	<i>Acacia angustissima</i> *	angustissima
	<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Benth.	sabiá
	<i>Enterolobium timbouva</i> Mart.	timbaúba
	<i>Parkinsonia aculeata</i> L.	turco
	<i>Calliandra selloi</i> (Spreng.) J.F. Macbr.*	caliandra
	<i>Vachellia farnesiana</i> (L.) Wight & Arn.	farnesiana
Não-nodulantes	<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.*	neen
	<i>Myracrodruon urundeuva</i> Allemão	aroeira
	<i>Caesalpinia ferrea</i> Mart. Extul.	jucá/pau ferro
	<i>Tabebuia caraiba</i> (Mart.) Bureau	caraibeira
	<i>Adenantha pavonina</i> L.*	tento
	<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart.	pereiro
	<i>Tabebuia impetiginosa</i> Mart. ex DC.	Ipê-roxo
	<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi.*	aroeirinha
	<i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C.Sm.	cumaru
<i>Caesalpinia bracteosa</i> Tul.	catingueira	

* Espécies exóticas à flora da Caatinga. Fonte: Lista de Espécies da Flora do Brasil. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/listaBrasil/PrincipalUC/PrincipalUC.do?lingua=PT>

As mudas foram produzidas no viveiro da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em substrato feito a partir da mistura de arisco e composto orgânico na proporção 2:1 v/v. Todos os indivíduos possuíam entre 30 e 50 cm de altura na ocasião do plantio definitivo nas jazidas.

Cada espécie arbórea foi disposta em uma única linha de plantio contendo 10 plantas por linha em cada subparcela experimental. O espaçamento de plantio foi de 2 x 2 m. Em metade das mudas de cada espécie foi aplicado dois litros de esterco bovino curtido na cova de plantio em suplemento à adubação feita em todas as covas (40 g de superfosfato simples e 10 g de FTE BR-15 por cova). Assim, o tratamento de aplicação de esterco constituiu-se na subsubparcela do delineamento experimental. Todas as áreas selecionadas possuíam relevo relativamente plano e foram isoladas com cercas para evitar a entrada de animais. Não foi efetuada irrigação das mudas em qualquer fase do experimento.

Foram realizadas seis avaliações da altura total (AT) das plantas aos 10, 95, 136, 360, 510 e 660 dias após o plantio (DAP), datas que, em sua

maioria, corresponderam ao final das estações seca e chuvosa de cada ano. A AT foi medida utilizando-se uma vara graduada em centímetros.

O diâmetro da base do tronco (DB) foi medido aos 660 DAP, utilizando-se um paquímetro digital graduado em milímetros. Aos 660 DAP foi realizada uma contagem das plantas vivas em cada tratamento para a obtenção da taxa de sobrevivência (TS). Para a obtenção dos valores referentes à taxa de crescimento mensal (TCM) foi subtraído o valor da altura média das espécies em cada tratamento aos 660 DAP pelo valor obtido aos 10 DAP. O valor resultante foi dividido pelo resultado da subtração do número de dias da última avaliação pelo número de dias da primeira avaliação e multiplicado por 30 para se obter a taxa de crescimento em centímetros por mês.

Os valores médios referentes à AT (cm), DB (mm), TCM (cm/mês) e TS (%) obtidos aos 660 DAP foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Previamente, os resíduos dos dados foram verificados quanto ao atendimento das pressuposições para a realização da ANOVA e não foi observada a necessidade de transformação dos dados ori-

ginais. As significâncias entre os níveis dos fatores solo superficial, grupos de espécies arbóreas, esterco na cova de plantio e da interação entre eles foram verificadas por meio do teste F da ANOVA a 5% de probabilidade. As análises foram realizadas no programa computacional Sistema para Análise de Variância – SISVAR (FERREIRA, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efeitos dos tratamentos

Foi observado que a adição de solo superficial interferiu negativamente na taxa de sobrevivência

das plantas, de modo que estas apresentaram sobrevivência de 70,9%, contra 85,2% daquelas plantadas em área sem solo superficial (Tabela 3). Outra característica influenciada negativamente pela adição de solo superficial foi o diâmetro da base do tronco, o qual foi significativamente menor nas árvores plantadas neste solo (20,0 mm), comparado às árvores plantadas no tratamento sem a adição do mesmo (24,9 mm). O efeito negativo da aplicação de solo superficial sobre a taxa de sobrevivência e o diâmetro da base foi mais pronunciado nas espécies não-nodulantes do que nas nodulantes (Tabela 4). Entretanto, a aplicação de solo superficial não influenciou a altura total ou a taxa de crescimento médio das plantas, independente do grupo quanto à nodulação.

Tabela 3. Valores médios gerais referentes à taxa de sobrevivência (TS), altura total (AT), taxa de crescimento mensal (TCM) e diâmetro da base do tronco (DB) das plantas, aos 660 dias após o plantio, nos tratamentos com e sem adição de solo superficial e esterco e com plantio de espécies arbóreas nodulantes e não-nodulantes.

Solo Superficial			Espécies			Esterco		
TS (%)								
Com	70,9*	B	Nodulantes	84,3	A	Com	80,1	A
Sem	85,2	A	Não-nodulantes	71,8	B	Sem	76,0	A
CV (%)	12,9			8,76			9,1	
AT (cm)								
Com	133,0	A	Nodulantes	190,6	A	Com	145,3	A
Sem	133,2	A	Não-nodulantes	75,6	B	Sem	120,9	B
CV (%)	12,9			27,3			14,26	
TCM (cm/mês)								
Com	4,5	A	Nodulantes	6,6	A	Com	5,0	A
Sem	4,3	A	Não-nodulantes	2,2	B	Sem	3,7	B
CV (%)	20,1			41,8			23,97	
DB (mm)								
Com	20,0	B	Nodulantes	30,9	A	Com	25,25	A
Sem	24,9	A	Não-nodulantes	14,0	B	Sem	19,64	B
CV (%)	12,3			26,56			12,9	

* Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste F a 5 % de probabilidade. Valores médios provenientes de 20 repetições.

Os resultados obtidos com a aplicação de solo superficial são contrastantes com o que se observa na recuperação de áreas degradadas em regiões úmidas do Brasil, onde a adição de solo superficial sobre substratos desprovidos de matéria orgânica e pobres em nutrientes leva a melhorias das condições de crescimento e sobrevivência das espécies vegetais introduzidas (SALOMÃO et al., 2007). Entretanto, vale ressaltar a elevada saturação por bases (V%) do substrato das jazidas de piçarra estudadas (Tabela 1), fato que difere dos substratos normalmente encontrados em regiões úmidas, os quais são predominantemente distróficos e com alta saturação de alumínio (MOREIRA; MALAVOLTA, 2004; NATALE et al., 2007; KITAMURA et al., 2008; SILVA et al., 2009). Dessa forma, pode-se inferir que o solo superficial no presente estudo não foi importante, no que tange ao fornecimento de vários macronutrientes (K, Ca, Mg e P) para as plantas. Por outro lado, a textura mais arenosa dos solos superficiais adicionados nas jazidas,

em relação aos substratos das áreas de piçarra (Tabela 1), pode ter limitado o crescimento das plantas em função da menor capacidade de retenção de água no substrato arenoso.

Outra explicação pode estar relacionada ao fato de haver abundante regeneração de plantas herbáceas no tratamento com solo superficial durante o período das chuvas. Apesar de não mensurado, foi observado que após as primeiras chuvas, nesse tratamento houve um crescimento vigoroso de várias espécies herbáceas, recobrando praticamente 100% do solo. Isso pode ter favorecido o aumento da competição por água e nutrientes com as mudas durante o início da estação seca, especialmente com as espécies não-nodulantes, as quais apresentaram crescimento mais lento. Mais estudos devem ser realizados para estabelecer as causas desse efeito e definir o manejo adequado do solo superficial, uma vez que este possui papel importante no aumento da biodiversidade do sistema em recuperação.

O grupo de espécies nodulantes apresentou valores de altura, taxa de crescimento e diâmetro da base do tronco 100% superiores, em geral, aos observados para espécies não-nodulantes (Tabela 3). Ainda, as espécies nodulantes apresentaram taxas mais elevadas de sobrevivência (84,3%) que as não-nodulantes (71,8%). Esses resultados estão em consonância aos observados em outros estudos envolvendo a revegetação de solos degradados (FRANCO et al., 2006). Considerando os baixos teores de carbono orgânico, principal fonte de N para as plantas, tanto nos substratos de piçarra quanto nos solos superficiais aplicados nas jazidas (Tabela 1) podemos atribuir o melhor desempenho das espécies nodulantes principalmente à sua capacidade de formar associações simbióticas com bactérias do gênero *Rhizobium*, capazes de realizar a fixação biológica de nitrogênio (FBN) (MARTÍNEZ-ROMERO, 2009). O potencial de FBN foi estudado por Freitas et al. (2010) em 14 espécies nodulantes nativas da Caatinga. O percentual de N fixado biologicamente pelas plantas avaliadas variou de 27% a 68%. As estimativas feitas por esses autores indicam que em situações

de regeneração da vegetação nativa, quando a sucessão é dominada por espécies com potencial para FBN, o aporte de nitrogênio ao ecossistema via FBN simbiótica pode chegar a 130 kg ha⁻¹ ano⁻¹.

A resposta ao N também pode ser observada pela reação das mudas à aplicação de esterco na cova de plantio. Plantas que receberam esterco, independente da aplicação de solo superficial ou do grupo de nodulação, tiveram altura total, taxa de crescimento e diâmetro da base do tronco 20%, 35% e 30% superiores, respectivamente, aos de plantas que não receberam adubo orgânico (Tabela 3). Entretanto, a aplicação de esterco não afetou a sobrevivência das mudas.

Na ausência de solo superficial, independente da aplicação de esterco, não foi observada variação nos valores médios da taxa de sobrevivência tanto entre espécies nodulantes quanto entre as não-nodulantes. Em todas as demais situações, as espécies nodulantes superaram, em média, as não-nodulantes, tanto para a taxa de sobrevivência como para altura total, diâmetro da base do tronco e taxa de crescimento médio mensal (Tabela 4).

Tabela 4. Valores médios referentes à taxa de sobrevivência (TS), altura total (AT), taxa de crescimento mensal (TCM) e diâmetro da base do tronco (DB) das plantas, aos 660 dias após o plantio, em tratamentos com e sem solo superficial para cada nível de grupo de espécie arbórea (nodulantes ou não) combinado com tratamentos com e sem esterco.

Solo Superficial	Com Esterco				Sem Esterco			
	Nodulantes		Não-nodulantes		Nodulantes		Não-nodulantes	
TS %								
Com	81,0*	B aα	62,4	B bα	78,4	A aα	62,0	B bα
Sem	92,0	A aα	84,8	A aα	85,6	A aα	78,0	A aα
AT (cm)								
Com	213,4	A aα	71,1	A bα	184,6	A aβ	62,9	A bα
Sem	201,4	A aα	95,4	A bα	163,1	A aβ	72,8	A bα
TCM (cm/mês)								
Com	7,8	A aα	2,0	A bα	6,7	A aα	1,6	A bα
Sem	7,2	A aα	3,1	A bα	4,7	B aβ	2,1	A bα
DB (mm)								
Com	32,1	B aα	11,8	B bα	25,8	A aβ	10,4	A bα
Sem	37,0	A aα	20,1	A bα	28,6	A aβ	13,7	A bβ

* Duas médias seguidas de letras maiúsculas na coluna comparam os níveis de solo superficial (ausência e presença) para cada combinação entre os níveis de espécies arbóreas (nodulantes ou não) e de esterco (presença ou ausência). Duas médias seguidas de letras minúsculas na linha comparam os níveis de espécies (nodulantes ou não) para cada combinação entre os níveis de solo superficial e de esterco. As letras gregas (α e β) comparam presença e ausência de esterco para cada combinação entre os níveis de solo e de espécies arbóreas. Letras distintas diferem entre si pelo teste F a 5% de probabilidade. Valores médios provenientes de 5 repetições (jazidas).

A literatura específica tem recomendado o plantio de leguminosas arbóreas de rápido crescimento para a revegetação de áreas degradadas por remoção de horizontes superficiais, embora esses estudos tenham sido realizados em regiões úmidas do Brasil, especialmente nos biomas Mata Atlântica e Amazônia (FRANCO et al., 1995; FRANCO et al., 2006; MACEDO et al., 2008). Franco e Campello (2005), por exemplo, avaliaram a sucessão vegetal de uma área previamente degradada por mineração de bauxita em solo arenoso, na região de Porto de Trombetas, Oriximiná (PA), 12 anos após a implan-

tação do projeto de recuperação da área em questão. Eles observaram que as áreas plantadas com leguminosas arbóreas nodulantes apresentaram maior riqueza de espécies nativas oriundas de regeneração natural e maior biomassa vegetal, cumprindo, assim, o papel de recuperação da resiliência do ambiente e o andamento da sucessão ecológica. Em outro estudo, Franco et al. (2006) avaliaram o processo da revegetação de áreas de rejeito de lavagem de bauxita testando diferentes espécies arbóreas, incluindo leguminosas nodulantes e não-nodulantes e outras não leguminosas. Foi observado que após 22 meses as espé-

cies de leguminosas nodulantes apresentaram maior crescimento e produção de biomassa aérea em relação às outras espécies, demonstrando o valor e a eficiência da FBN no processo de regeneração de áreas degradadas e a capacidade destas espécies vegetais de se desenvolver em substratos com baixos teores de nutrientes.

Avaliação do crescimento por espécie

As espécies *Mimosa tenuiflora*, *Azadirachta indica* e *Enterolobium timbouva* apresentaram curva de crescimento praticamente linear durante o período avaliado. Considerando que as avaliações de altura total foram feitas sempre ao final dos períodos seco e chuvoso, esse resultado, possivelmente, indica que o desenvolvimento dessas espécies não foi limitado pelo período de seca, mostrando sua alta adaptabilidade às condições edafoclimáticas locais. Todas as demais espécies avaliadas apresentaram crescimento significativo apenas no período das chuvas e pouco ou nenhum crescimento na seca (Figura 2A, B).

Dentre as espécies de leguminosas nodulantes, quatro se destacaram tanto em relação ao crescimento em altura (Figura 2A) quanto em relação à taxa de sobrevivência, a saber: *M. tenuiflora*; *Pseudosamanea guachapele*; *Mimosa caesalpinifolia*; e *Vachellia farnesiana* (Figura 3A). Dentre essas, o maior destaque foi para a espécie *M. tenuiflora*, a qual atingiu média de 3,0 m de altura aos 660 dias, aproximadamente 50 cm acima da *P. guachapele*, segunda colocada (Figura 2A). Deve-se ressaltar ainda que a espécie *M. tenuiflora* apresenta forte ramificação e crescimento lateral, o que levou a produção de biomassa bastante superior às demais espécies avaliadas (observação visual em campo). Freitas et al. (2010) destacam a espécie *M. tenuiflora* como parte de um grupo de 14 espécies de leguminosas nodulantes, nativas da Caatinga, com alta taxa de crescimento e capacidade de fixação biológica de nitrogênio. O presente estudo possivelmente corrobora essa afirmação e pode ser um dos motivos que explica sua alta taxa de crescimento.

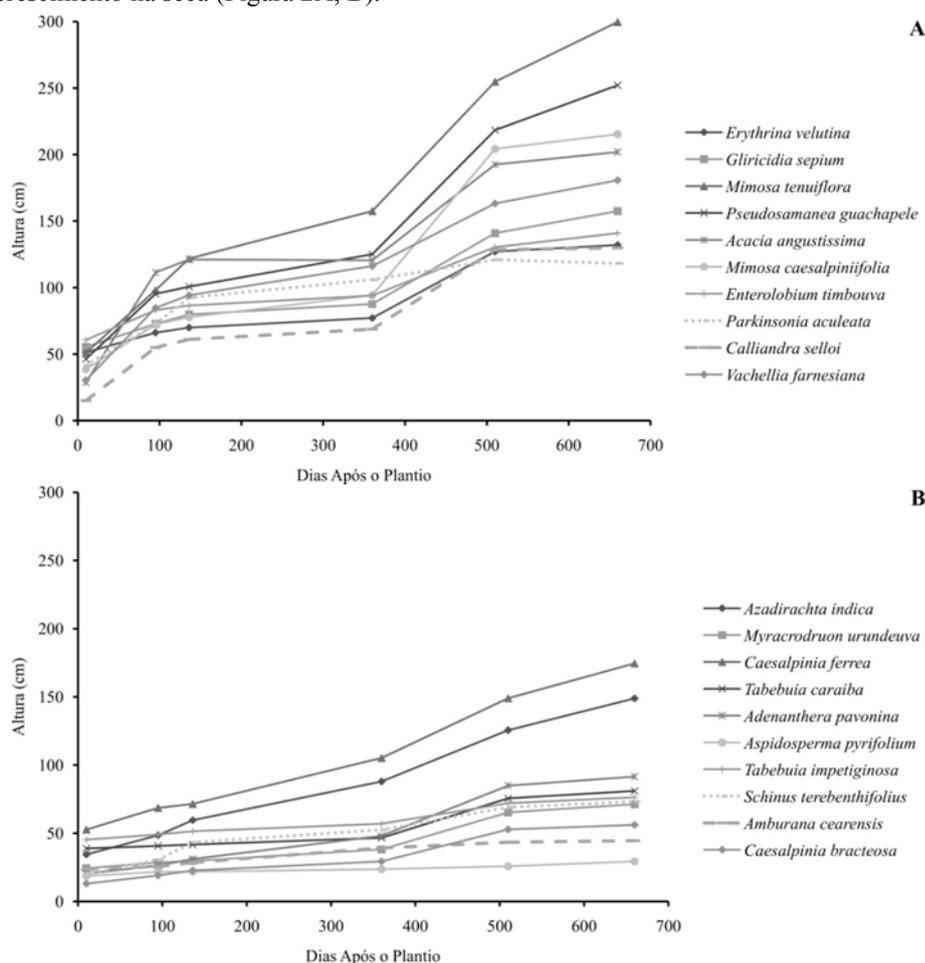


Figura 2. Curva de crescimento de 20 espécies arbóreas, sendo 10 leguminosas nodulantes (A) e 10 espécies não-nodulantes (B), com medições tomadas aos 10 dias após o plantio (DAP), 95 e 136 DAP (época chuvosa), 360 DAP (época seca), 510 DAP (época chuvosa) e 660 DAP (época seca) em cinco jazidas de extração de piçarra no Rio Grande do Norte.

Dentre as espécies não-nodulantes, a *A. indica* e a *Caesalpinia ferrea* apresentaram os melhores crescimentos em altura, atingindo altura média de 149 e 174 cm, respectivamente, aos 660 DAP

(Figura 2B). Essas duas espécies apresentaram taxa de sobrevivência de 82% e 100%, respectivamente (Figura 3B).

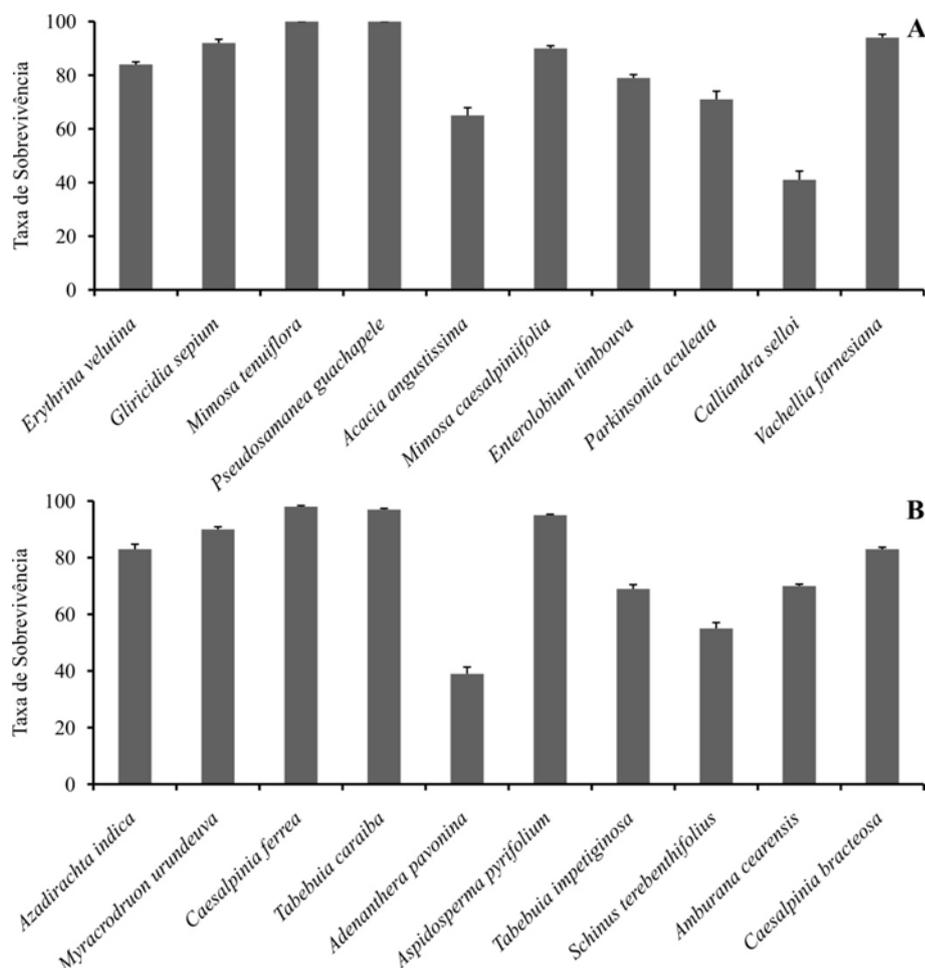


Figura 3. Taxa de Sobrevivência (TS) de 20 espécies, sendo 10 espécies nodulantes (A) e 10 espécies não-nodulantes (B), com medições tomadas aos 660 DAP (época seca) em cinco jazidas de extração de piçarra no Rio Grande do Norte. Barras de desvio correspondem ao erro padrão (n=5).

Algumas espécies que não se destacaram no crescimento em altura apresentaram, por outro lado, altas taxas de sobrevivência. Incluem-se nesse grupo as leguminosas nodulantes *Erithrina velutina* e *Gliricidia sepium* (Figura 3A), apesar destas terem sido classificadas como espécies de rápido crescimento por Lorenzi (2002) e Drumond e Carvalho Filho (2005), respectivamente. Entre as não-nodulantes, *Myracrodruon urundeuva* e *Aspidosperma pyrifolium* também apresentaram alta taxa de sobrevivência, apesar do baixo crescimento (Figura 3B). Essas duas espécies foram definidas como sendo de crescimento moderado e lento, respectivamente, por Lacerda et al. (2011). A taxa de crescimento relativamente baixa das espécies citadas não deve necessariamente desqualificá-las para a revegetação de jazidas de piçarra, uma vez que a alta taxa de sobrevivência dessas espécies indica adaptabilidade e resistência às condições do bioma Caatinga e das áreas degradadas em estudo. Ademais, a menor velocidade de cresci-

mento pode ser uma característica inerente à espécie e não a limitações do ambiente onde ela se encontra. Ao contrário, espécies como *Parkinsonia aculeata*, *Calliandra selloi*, *Schinus terebinthifolius* e *Amburana cearensis* apresentaram baixas taxas tanto de crescimento quanto de sobrevivência e, portanto, recomenda-se a não utilização dessas espécies em revegetação em áreas de jazidas.

Das sete espécies com menor taxa de sobrevivência (*A. angustissima*, *P. aculeata*, *C. selloi*, *A. pavonina*, *Tabebuia impetiginosa*, *S. terebinthifolius* e *A. cearensis*) quatro são exóticas ao bioma Caatinga. Apesar de algumas espécies exóticas terem apresentado boa adaptação e desenvolvimento, a exemplo da nodulante *P. guachapele* e da não-nodulante *A. indica*, o plantio de espécies exóticas deve ser evitado ou se feito respeitado o uso futuro que se pretende dar a área. Além disso, deve-se ter o conhecimento prévio de que a espécie exótica em questão

não possui o potencial de se tornar uma espécie invasora do ecossistema natural adjacente.

CONCLUSÕES

Das 20 espécies avaliadas nesse estudo, sete se sobressaíram pela alta sobrevivência e crescimento, apresentando potencial para estabelecimento nas áreas degradadas por extração de piçarra. São elas, as nodulantes *Mimosa tenuiflora*, *Mimosa caesalpiniiifolia*, *Vachellia farnesiana* e *Pseudosamanea guachapele* e as não-nodulantes *Caesalpinia ferrea*, *Tabebuia caraiba* e *Azadirachta indica*. Entretanto, conforme o uso futuro planejado para a área, restrições podem se aplicar às espécies *P. guachapele* e *A. indica* por serem exóticas ao bioma Caatinga.

Em geral, espécies de leguminosas arbóreas nodulantes apresentaram maiores taxas de sobrevivência e crescimento em relação às espécies não-nodulantes. Dentre essas, a *M. tenuiflora* se destacou, chegando a três metros de altura e 100% de sobrevivência aos 20 meses após o plantio.

A adição de solo superficial (topsoil), em uma camada de 20 cm sobre o substrato degradado, proveu no curto prazo completa cobertura do solo com espécies herbáceas, mas interferiu negativamente na taxa de sobrevivência e diâmetro da base do tronco das espécies arbóreas plantadas, principalmente das espécies não-nodulantes. Mais estudos devem ser realizados para estabelecer as causas desse efeito e definir o manejo adequado desse topsoil.

A adição de esterco na cova de plantio, em complementação a adubação, não afetou de forma significativa a sobrevivência das espécies plantadas. Por outro lado, foi observado que o crescimento de todas as espécies foi significativamente maior com a adição de esterco, portanto, sendo recomendado o seu uso quando o mesmo estiver disponível.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural do Semi-Árido e à Embrapa Agrobiologia pela infraestrutura disponibilizada, à CAPES pela concessão de bolsa de pesquisa à primeira autora, à José Erivaldo de Araújo, Jeane Cruz Portela, Carlos Fernando Cunha, Cid Rodrigo Cavalcanti de Azevedo, Raul Farias, Augusto Neto e Gabriela Cemirames de Sousa Gurgel pelo apoio durante a condução e análises do experimento.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. Subsoil reclamation in loan area used for hydroelectric construction. **Re-**

vista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 301-309, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Reservas Nacionais de Petróleo e Gás Natural**. 2009. Disponível em: <[http://www.anp.gov.br / Petróleo e Derivados / Desenvolvimento e Produção / Dados D&P](http://www.anp.gov.br/Petróleo%20e%20Derivados/Desenvolvimento%20e%20Produção/Dados%20D&P)>. Acesso em: 05 jul. 2012.

BATISTA, Q. R. et al. Bioqualidade de área degradada pela extração de argila, revegetada com *Eucalyptus* spp. e sabiá. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 1, p.146-154, 2009.

BRASIL. **Decreto nº 97.632, de 10 de Abril de 1989**. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/topicos/11926352/artigo-1-do-decreto-n-97632-de-10-de-abril-de-1989>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

CARMO FILHO, F.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MAIA NETO, J. M. **Dados climatológicos de Mossoró**: um município semi-árido nordestino. Mossoró: ESAM, 1991. 121 p. (Coleção Mossoroense, C.30).

CHAER, G. M. et al. Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil. **Tree Physiology**, Oxford, v. 31, n. 2, p. 139-149, 2011.

DRUMOND, M. A.; CARVALHO FILHO, O. M. de. Gliricidia. In: KIILL, L. H. P.; MENEZES, E. A. (Ed.). **Espécies vegetais exóticas com potencialidades para o semi-árido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido; Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. cap. 10, p. 301-321.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1997. 212 p.

FARIA, S.M. et al. Evaluating the nodulation status of leguminous species from the Amazonian forest of Brazil. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 61, n. 11, p. 3119-3127, 2010.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FIGUEIREDO, J. M. et al. Revegetation of degraded Caatinga sites. **Journal of Tropical Forest Science**, Malasia, v. 24, n. 3, p. 332-343, 2012.

FRANCO, A. A. et al. Uso de leguminosas florestais noduladas e micorrizadas como agentes de recuperação e manutenção da vida do solo: um modelo tecnológico. **Oecologia Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 459-467, 1995.

- FRANCO, A. A.; FARIA, S. M. The contribution of N₂-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 29, n. 5/6, p. 897-903, 1997.
- FRANCO, A. A.; CAMPELLO, E. F. C. Manejo nutricional integrado na recuperação de áreas degradadas e na sustentabilidade dos sistemas produtivos utilizando a FBN como fonte de nitrogênio. In: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (Ed.). **Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2005. Cap. 8, p. 201-220.
- FRANCO, A. A. et al. Revegetação de áreas degradadas pela mineração e processamento de bauxita. In: ALBA, J. M. F. (Ed.). **Recuperação de áreas mineradas: a visão dos especialistas brasileiros**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 2006. Cap. 14.
- FREITAS, A. D. S. et al. Biological nitrogen fixation in tree legumes of the Brazilian semi-arid caatinga. **Journal of Arid Environments**, Londres, v. 74, n. 3, p. 344-349. 2010.
- JACINTHE P. A, LAL R. Carbon storage and minesoil properties in relation to topsoil application techniques. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 6, p. 1788-1791, 2007.
- KHADE, S. W.; RODRIGUES, B. F. Applications of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, México, v. 10, n. 3, p. 337-354, 2009.
- KITAMURA, A. E. et al. Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 405-416, 2008.
- LACERDA, R. M. de; LIRA FILHO, J. A. de; SANTOS, R. V. dos. Indicação de espécies de porte arbóreo para a arborização urbana no semi-árido paraibano. **REVSBAU**, Piracicaba, v. 6, n. 1, p. 51-68, 2011.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 2002. v. 2, 368 p.
- MACEDO, M. O. et al. Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 5-6, p. 1516-1524, 2008.
- MARTÍNEZ-RODRIGUES, E. Coevolution in Rhizobium-legume symbiosis. **DNA and Cell Biology**, v. 28, n. 8, p. 60-70, 2009.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica da matéria orgânica e da biomassa microbiana em solo submetido a diferentes sistemas de manejo na Amazônia Ocidental. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1103-1110, 2004.
- MUKHOPADHYAY, S.; MAITI, S. K.; MASTO, R. E. Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study. **Ecological Engineering**, Oregon, v. 71, p. 10-20, 2014.
- NATALE, N. et al. Efeitos da calagem na fertilidade do solo e na nutrição e produtividade da goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1475-1485, 2007.
- PAGANO, M. C. et al. Plant-type dependent changes in arbuscular mycorrhizal communities as soil quality indicator in semi-arid Brazil. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 11, p. 643-650, 2011.
- RESENDE, A. S. et al. Produção e qualidade de mudas de espécies florestais. In: RESENDE, A. S. D.; CHAER, G. M., (ed.) **Manual para recuperação de áreas degradadas por exploração de piçarra na Caatinga**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2010. p. 13-28.
- RESENDE A. S. et al. Uso de leguminosas arbóreas na recuperação de áreas degradadas. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 71-92, 2013.
- RIVERA, D.; JÁUREGUI, B. M.; PECO, B. The fate of herbaceous seeds during topsoil stockpiling: Restoration potential of seed banks. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 44, p. 94-101, 2012.
- RODRIGUES, G. B; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 73-80, 2007.
- SALOMÃO, R.P.; ROSA, N. A.; MORAIS, K.A.C. Dinâmica da regeneração natural de árvores em áreas mineradas na Amazônia. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais**, Belém, v. 2, n. 2, p. 85-139, 2007.
- SHEORAN, V.; SEORAN, A. S.; POONIA, P. Soil Reclamation of Abandoned Mine Land by Revegetation: A Review. **International Journal of Soil, Sediment and Water**, Amherst, v. 3, n. 2, Article 13, 2010.
- SHRESTHA, R. K., LAL, R., Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 161, n. 3-4, p. 168-176, 2011.

SILVA, L. G. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de cerrado em plantio de espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 6, p. 613-620, 2009.

SILVA, C. F. et al. Fungos micorrízicos arbusculares e proteína do solo relacionada à glomalina em área degradada por extração de argila e revegetada com eucalipto e acácia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 749-761, 2012

SOLIVERES, S.; MONERRIS, J.; CORTINA, J. Irrigation, organic fertilization and species successional stagemodulate the response of woody seedlings to herbaceous competition in a semi-arid quarry restoration. **Applied Vegetation Science**. Chapel Hill, v. 15, n. 2, p. 175–186. 2012.