

FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS PELA APLICAÇÃO DE VINHAÇA⁽¹⁾

Raquel Zanholo da Silva²; Ana Maria Conte^{3*}

SAP 15770 Data envio: 15/12/2016 Data do aceite: 02/06/2017
Sci. Agrar. Parana., Marechal Cândido Rondon, v. 16, n. 3, jul./set., p. 383-392, 2017

RESUMO - Áreas cultivadas com cana-de-açúcar onde se utiliza aplicação contínua de vinhaça, tendem a ter sérios problemas de ordem física, biológica e, principalmente química, pelo excesso de carga nutricional que é veiculada por esse subproduto. Com o objetivo de avaliar a qualidade química do solo após utilização de diversas espécies vegetais fitorremediadoras, foi realizado um experimento em cultivo protegido na área da Fazenda Experimental Professor Eduardo Meneghel Rando, do campus Luiz Meneghel, da Universidade Estadual do Norte do Paraná, no município de Bandeirantes, PR. Para tal, foi empregado um delineamento estatístico em blocos casualizados, em esquema fatorial de parcelas subdivididas, onde a parcela principal foi a época (0, 30, 45 e 60), mensurada em dias após emergência, e a parcela secundária constituída de seis tratamentos com três repetições: T1-crotalária, T2-mucuna anã, T3-milheto, T4-milho, T5-feijão de porco e T6-feijão comum. O experimento foi instalado em vasos com capacidade de 12,6 L, preenchidos com solo amostrado nas profundidades 0-20 e 20-40 cm, na USIBAN-Usina de Açúcar e Álcool Bandeirantes S/A, do município de Bandeirantes, PR, e avaliado inicialmente quanto as suas características químicas de rotina. Através de análise destrutiva, o solo foi avaliado de 0-20 cm e 20-40 cm, para análise de rotina dos parâmetros químicos do solo aos 30, 45 e 60 dias após a emergência (DAE) das culturas. Os resultados permitiram concluir que o cultivo de milho foi o tratamento que melhor remediou potássio até os 45 DAE em solos salinizados pela aplicação de vinhaça.

Palavras-chave: poluição do solo, remediação de solos, salinidade, vinhoto.

PHYTOREMEDIATION OF SALINIZED SOILS BY THE APPLICATION OF VINASSE

ABSTRACT - Areas cultivated with sugarcane, where continuous vinasse application is used, tend to have serious physical, biological and mainly chemical problems due to the excess nutritional load that is transmitted by this byproduct. In order to evaluate the chemical quality of the soil after phytoremediation, an experiment was carried out in protected cultivation in the area of Experimental Farm Eduardo Meneghel Rando, of campus Luiz Meneghel of the State University of Northern Paraná, in the city of Bandeirantes, Paraná State, Brazil, and evaluated by the factorial design at 0, 30, 45 and 60 days after emergence of the crops and the secondary plot of the six treatments with three replicates: T1- *Crotalaria spectabilis*, T2- *Mucuna deeringiana*, T3- *Pennisetum americanum*, T4- *Zea mays*, T5- *Canavalia ensiformis* and T6- *Phaseolus vulgaris*. The experiment was carried out in pots with a capacity of 12.6 L, filled with soil collected at two depths 0-20 and 20-40 cm, at the USIBAN-Açúcar and Álcool Bandeirantes S/A industry, in the city of Bandeirantes, and initially evaluated for their routine chemical characteristics. Through destructive analysis the soil was evaluated from 0-20 cm and 20-40 cm, for routine analysis of soil chemical parameters at 30, 45 and 60 days after emergence (DAE) of the crops. The results allowed conclude that the cultivation of millet was the treatment that best remedied potassium up to 45 DAE in soils salinized by the application of vinasse.

Key words: soil pollution, remediation of soils, salinity, vinhoto.

INTRODUÇÃO

Algumas particularidades da produção agrícola, como o uso de vinhaça aplicada continuamente em solos nas áreas de produção de cana-de-açúcar, são passíveis de comprometer a qualidade do solo, podendo ser um entrave à produção agrícola por salinizar o solo e lixiviar sais solúveis para o lençol freático, principalmente o potássio.

O uso de vinhaça em áreas agrícolas, especialmente em lavouras de cana, traz benefícios indiscutíveis tanto do ponto de vista agrônomo quanto do

econômico e social (GIACHINI; FERRAZ, 2009), porém, quando aplicada em altas doses, pode acarretar efeitos indesejáveis como o comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar, salinização do solo e poluição do lençol freático (DA SILVA et al., 2007).

Apesar de todos os benefícios que a aplicação da vinhaça pode trazer aos solos, sua utilização de forma inadequada pode acarretar sérios problemas ambientais, assim, aplicações em doses acima da capacidade de retenção de água do solo podem resultar em lixiviação de

¹Parte da dissertação do primeiro autor

²Engenheira Agrônoma, Mestre em Agronomia pelo Programa de Mestrado em Agronomia da Universidade Estadual do Norte do Paraná, UENP, Rod. BR 369, Km 54, CEP 86360-000, campus Luiz Meneghel, Bandeirantes, Paraná, Brasil. E-mail: raquelzanholo@gmail.com

³Docente do Centro de Ciências Agrárias do Setor de Produção Vegetal, UENP. E-mail: acastro@uenp.edu.br. *Autor para correspondência

elementos, principalmente o potássio (K), e outros presentes na sua composição, podendo alcançar os lençóis freáticos e águas subsuperficiais (NICOCHELLI et al., 2012).

A utilização de técnicas de remediação do solo pode promover a descontaminação (parcial ou total) de áreas ou ainda pode-se isolar o material como alternativa à dispersão da vinhaça. As técnicas de remediação podem ser classificadas como físicas, químicas e biológicas e sua escolha final depende da relação custo-benefício e dos aspectos ambientais, além do uso previsto da área após a remediação, do tipo de contaminante e de características relacionadas aos seus riscos (MARQUES et al., 2011).

No Brasil, as pesquisas sobre fitorremediação têm focado principalmente solos contaminados por metais pesados (MELO et al., 2006; ROMEIRO et al., 2007) e por herbicidas.

Faz-se necessário investigar e identificar quais espécies vegetais apresentam tolerância às substâncias contaminantes em estudo e, dentre essas espécies, as que poderão ser utilizadas como fitorremediadoras em áreas prejudicadas por aplicação excessiva de vinhaça, posteriormente avaliando sua capacidade em promover o reequilíbrio do solo, atuando direta ou indiretamente na remediação por diferentes mecanismos básicos (MARQUES et al., 2011).

Silva et al. (2013), estudando plantas remediadoras de K, veiculado através da aplicação de vinhaça contínua na cultura de cana de açúcar, constataram aos 50 dias após a emergência das culturas, que o milheto foi a planta que mais K extraiu do solo, seguido do feijão

de porco, sendo semelhantes as culturas do milho, feijão e nabo forrageiro.

A presente pesquisa objetivou remediar solo manejado com aplicações intensivas de vinhaça por longo período, mediante cultivo de espécies fitorremediadoras, bem como determinar o tempo de cultivo necessário para maior eficiência na diminuição da concentração de K do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado de dezembro a fevereiro de 2014, em cultivo protegido na área experimental da Fazenda Escola Professor Eduardo Meneghel Rando, na Universidade Estadual do Norte do Paraná, campus Luiz Meneghel, localizado em Bandeirantes, Paraná, cujas coordenadas geográficas são 23° 06' Latitude Sul e 50° 21' Longitude Oeste, com 440 m de altitude. O clima predominante na região é do tipo subtropical úmido, baseado na classificação climática de Köppen.

O solo classificado como LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef) (EMBRAPA, 2013), de classe textural muito argilosa (760 g kg⁻¹ de argila) e teor de ferro superior a 18% Fe₂O₃, foi amostrado inicialmente para fins de análise química, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm (Figura 1), cujo resultado é apresentado na Tabela 1. A referida área é cultivada intensivamente com cana-de-açúcar, mediante aplicações com dose média de 300 m³ ha⁻¹, pertencente à USIBAN-Usina de Açúcar e Alcool-Bandeirantes S/A, localizada no município de Bandeirantes, Paraná, cuja composição química é apresentada na Tabela 2.



FIGURA 1 - Local da coleta do solo para o experimento e amostragem do solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm. Bandeirantes, PR, 2014. Fonte: Conte (2014).

TABELA 1. Resultado da análise química inicial do solo nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm. Bandeirantes, PR, 2014.

Profundidade (cm)	pH (CaCl ₂)	M.O. (g dm ⁻³)	Pmelich (mg dm ⁻³)	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V (%)
				----- cmolc dm ⁻³ -----						
0-20	6,1	44,3	29,7	3,3	7	2,6	3,7	12,9	16,6	77,7
20-40	6,1	36,2	26,5	3,5	7,2	2,7	3,65	13,4	17	78,6

TABELA 2. Resultados da análise química da vinhaça.

pH	C/N	C	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
4,1	19,1	5,02	0,262	0,011	3,14	0,421	0,274	0,493	ND	0,555	62,2	14,5	0,15	200

Foram transcorridos sete dias entre a amostragem inicial do solo e amostragem do mesmo para a instalação experimental, nesse período não ocorreu chuva e a área permaneceu com a cultura da cana-de-açúcar.

Por ocasião da implantação do experimento, o solo foi coletado nas duas profundidades (Figuras 2 e 3), inicialmente amostrados e transportados até o local experimental (Figura 4), onde foi preparado através de peneiramento em malha de 2 mm, para compor os vasos com capacidade para 12,6 L (Figura 5).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em parcelas subdivididas, onde as parcelas principais foram constituídas pelas épocas de avaliação (0, 30, 45 e 60 dias após implantação dos tratamentos) e as subparcelas pelos tratamentos: T1- crotalaria (*Crotalaria spectabilis*), T2- mucuna anã (*Mucuna deeringiana*), T3-

milheto (*Pennisetum americanum*), T4- milho (*Zea mays*), T5- feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e T6- feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) (Figura 6) e três repetições. O experimento recebeu irrigação conforme necessidade das culturas e as plantas invasoras foram controladas manualmente.

O solo foi amostrado e avaliado em duas profundidades (0-20 e 20-40 cm) nas épocas 0, 30, 45 e 60 (DAE). Através de coleta destrutiva, procedeu-se à análise da condutividade elétrica e química dos solos e sendo os dados avaliados pelo programa estatístico SASM-Agri (CANTERI, 2001), quando encontrada diferença significativa, as médias comparadas pelo teste de Tukey à 5%. Quando a interação foi significativa, o teste de médias foi avaliado pelo programa ESTAT (KRONKA; BANZATO, 1995).

**FIGURA 2** - Coleta de solo de 0-20 cm. Fonte: Silva (2014).**FIGURA 3** - Coleta de solo de 20-40 cm. Fonte: Fonte: Silva (2014).



FIGURA 4 - Solo depositado no local experimental. Fonte: Silva (2014).



FIGURA 5 - Vasos já preenchidos com o solo. Fonte: Silva (2014).



FIGURA 6 - Aspecto geral da distribuição do experimento 30 dias após emergência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Profundidade 0-20 cm

Os resultados experimentais para fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e acidez potencial (H+Al) na camada de 0-20 cm ao longo do ciclo experimental no solo submetido à aplicação contínua de vinhaça, antes e após o

uso de plantas fitorremediadoras estão apresentados na Tabela 3.

Observa-se que não houve diferenças estatísticas significativas para as espécies vegetais fitorremediadoras, porém, ao longo do ciclo de cultivo são observadas, diferenças na concentração de P, Ca, Mg e H+Al.

Para o Ca salienta-se que o resultado inicial deverá ser atribuído a erros amostrais não inerentes à veracidade da análise, mas sim relativo ao que realmente a amostra indicou, já que nenhuma prática de calagem ou adubação foi realizada durante a fase experimental, sendo portanto, incoerentes os teores de cálcio obtidos no início,

já que são inferiores aos obtidos após cultivo das espécies, e isso é demonstrado quando se observa que houve uma redução dos teores de cálcio, pois até 30 DAE o solo apresentou teores de $9,73 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e ao final do experimento valores de $8,06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ com redução superior a 17%.

TABELA 3. Teores de fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), e acidez potencial (H+Al), na profundidade de 0-20 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

Tratamentos	P	Ca	Mg	H+Al
	mg dm ⁻³	----- cmol _c dm ⁻³ -----		
Dias				
0	29,70 A	7,00 C	2,60 A	3,70 C
30	20,35 B	9,73 A	2,11 B	4,74 A
45	16,41 C	8,55 B	2,02 B	4,92 A
60	17,15 C	8,06 B	1,94 B	4,36 B
F	300,80**	43,94**	13,46**	94,36**
C.V. (%)	7,15	8,71	15,87	5,32
Plantas				
Crotalária	20,51 A ⁴	8,32 A	2,18 A	4,29 A
Mucuna ¹	21,08 A	8,22 A	2,08 A	4,53 A
Milheto	20,78 A	8,35 A	2,24 A	4,49 A
Milho	21,18 A	8,41 A	2,22 A	4,47 A
F. porco ²	20,93 A	8,55 A	2,08 A	4,50 A
F. comum ³	20,94 A	8,17 A	2,20 A	4,32 A
F	0,29 ns	0,57 ns	0,80 ns	1,09 ns
C.V. (%)	7,30	7,59	12,21	7,48

Em que: ¹Mucuna: mucuna-anã; ²F.porco: feijão de porco; ³F. comum: feijão comum; ⁴letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; DAE: dias após a emergência; C.V.: coeficiente de variação; *: significativo a 5% pelo teste de Tukey; **: significativo a 1% pelo teste de Tukey; ns: não significativo.

As maiores reduções dos teores de Mg do solo são observadas a partir dos 30 DAE. A acidez potencial teve uma elevação a partir da implantação do experimento, manteve-se até a coleta aos 45 DAE e voltou a reduzir ao final do experimento, onde foram encontradas as menores médias. Essas variações podem ser atribuídas ao conceito de que as plantas absorvem quantidades diferentes de cátions e ânions e, para manter equilibrado o pH intracelular pode ocorrer a extrusão de H⁺, HCO³⁻ ou exsudados radiculares (ácidos orgânicos, açúcares, fenóis), interferindo no pH (HINSINGER et al., 2003; TAIZ; ZEIGER, 2004) e consequentemente na acidez potencial, já que não houve aplicação de calcário nos tratamentos.

Houve interação significativa para os valores de pH na profundidade de 0-20 cm, como mostra a Tabela 4. Observou-se que até 30 DAE, não houve diferença significativa quando o solo foi cultivado com as espécies fitorremediadoras, já aos 45 DAE o solo cultivado com feijão comum apresentou valores maiores de pH em relação às demais espécies, porém, aos 60 DAE menores valores de pH foram observados quando utilizou-se crotalária, mucuna-anã e feijão de porco, ou seja, nas duas

amostragens que houve influência dos cultivos sobre o pH, as gramíneas tiveram o mesmo comportamento.

A interação significativa ao longo do ciclo experimental mostrou que as culturas da mucuna-anã, milheto, milho e feijão de porco, tiveram o mesmo comportamento estatístico: inicialmente valores maiores de pH, reduzindo na amostragem de 30 e 45 DAE, e tendo valores intermediários no final do ciclo (60 DAE). A diferença desse cenário em relação à cultura da crotalária é observada aos 45 DAE, quando os valores de pH se assemelham aos encontrados no final do ciclo experimental. Para o feijoeiro comum, após diminuição dos valores de pH aos 30 DAE, este manteve-se constante até os 60 DAE.

O desdobramento da interação significativa para os teores de matéria orgânica na profundidade de 0-20 cm, após uso de plantas fitoextratoras ao longo do ciclo de amostragem estão apresentadas na Tabela 5, onde se observa que apenas aos 30 DAE houve diferenças estatísticas significativas entre as espécies vegetais fitorremediadoras, sendo que, excetuando a crotalária, as demais culturas tiveram teores de MO inferior e semelhantes entre si. E também se observa que no decorrer

do ciclo experimental, a crotalária diferiu estatisticamente das demais plantas, onde se observa reduções na concentração de matéria orgânica ao longo do ciclo,

enquanto que nas demais culturas, a partir dos 30 DAE, houve comportamento estatístico semelhante.

TABELA 4. Valores de pH_{CaCl_2} na profundidade de 0-20 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

Plantas	pH_{CaCl_2} 0-20 cm			
	Dias após a emergência (DAE)			
	0	30	45	60
Crotalária	6,10 Aa ⁴	5,37 Ac	5,43 Bbc	5,53 Cb
Mucuna ¹	6,10 Aa	5,33 Ac	5,47 Bc	5,63 BCb
Milheto	6,10 Aa	5,30 Ac	5,43 Bc	5,80 ABb
Milho	6,10 Aa	5,40 Ac	5,50 Bc	5,83 Ab
F. porco ²	6,10 Aa	5,27Ac	5,40 Bc	5,63 Bcb
F. comum ³	6,10 Aa	5,37 Ac	5,80 Ab	5,80 ABb
F (épocas)	273,27*			
F (plantas)	0,26*			
F (ép x pls)	4,70*			
C.V. (épocas)	1,49			
C.V. (plantas)	1,23			

Em que: ¹Mucuna: mucuna-anã; ²F.porco: feijão de porco; ³F. comum: feijão comum; ⁴letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; C.V.: coeficiente de variação; *: significativo a 5% pelo teste de Tukey.

TABELA 5. Teores de matéria orgânica (MO), na profundidade de 0-20 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

Plantas	MO (mg dm ⁻³) 0-20 cm			
	Dias após a emergência (DAE)			
	0	30	45	60
Crotalária	43,00 Aa ⁴	24,00 Ab	18,33 Ac	17,86 Ac
Mucuna ¹	43,00 Aa	17,43 Bb	19,23 Ab	17,43 Ab
Milheto	43,00 Aa	18,76 Bb	19,23 Ab	16,53 Ab
Milho	43,00 Aa	20,13 Bb	19,66 Ab	18,80 Ab
F. porco ²	43,00 Aa	17,43 Bb	20,10 Ab	19,23 Ab
F. comum ³	43,00 Aa	18,76 Bb	20,60 Ab	17,43 Ab
F (épocas)	1129**			
F (plantas)	1,58			
F (ép x pls)	2,42*			
C.V. (épocas)	6,34			
C.V. (plantas)	6,49			

Em que: ¹Mucuna: mucuna-anã; ²F.porco: feijão de porco; ³F. comum: feijão comum; ⁴letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; C.V.: coeficiente de variação; *: significativo a 5% pelo teste de Tukey; **: significativo a 1% pelo teste de Tukey.

Os resultados experimentais da análise química de potássio (K), apresentado na Tabela 6, ilustra interação significativa entre as culturas fitorremediadoras ao longo do período experimental, onde se observa, aos 30 e 60 DAE semelhança estatística entre as espécies utilizadas já aos 45 DAE, as gramíneas foram mais eficientes em extrair, K do solo, e, também se observa que os feijoeiros, tanto o de porco como o comum foram menos eficientes.

A absorção preferencial iônica das poáceas (gramíneas) pelos cátions monovalentes pode ser uma explicação para o comportamento do milheto e do milho com relação à absorção de K do solo, pois houve uma redução de 80% e 72% nos teores de K quando se cultivou milheto e milho, respectivamente. Isso pode ser explicado pela alta extração de K do solo, que pode ser atribuída a grande acúmulo de massa verde, segundo Teixeira et al. (2010), sendo que

essa cultura já aos 45 dias de cultivo foi a que mais extraiu K do solo. A CTC das raízes é um dos fatores que determina a diferença entre as espécies vegetais quanto à absorção de nutrientes catiônicos e, conforme observações de Da Silva et al. (2009), é característica de algumas espécies de poáceas possuir CTC radicular

significativamente menor que em algumas fabáceas (leguminosas), o que seria coerente com a maior afinidade do sistema radicular das poáceas por cátions monovalentes como o potássio (K^+) e das fabáceas por cátions divalentes como cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}).

TABELA 6. Teores de potássio ($K_{(cmolc\ dm^{-3})}$), na profundidade de 0-20 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

Plantas	$K_{(cmolc\ dm^{-3})}$ 0-20 cm			
	Dias após a emergência (DAE)			
	0	30	45	60
Crotalária	3,30 Aa ⁴	2,33 Ab	1,13 ABd	1,63 Ac
Mucuna ¹	3,30 Aa	2,17 Ab	1,17 ABd	1,67 Ac
Milheto	3,30 Aa	2,23 Ab	0,63 Cd	1,40 Ac
Milho	3,30 Aa	2,20 Ab	0,93 BCd	1,53 Ac
F. porco ²	3,30 Aa	2,10 Ab	1,40 Ac	1,57 Ac
F. comum ³	3,30 Aa	2,10 Ab	1,53 Ac	1,57 Ac
F (épocas)		593,5*		
F (plantas)		3,11**		
F (ép x pls)		2,99*		
C.V. (épocas)		8,02		
C.V. (plantas)		8,47		

Em que: ¹Mucuna: mucuna-anã; ²F.porco: feijão de porco; ³F. comum: feijão comum; ⁴letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; C.V.: coeficiente de variação; *: significativo a 5% pelo teste de Tukey; **: significativo a 1% pelo teste de Tukey.

Outro aspecto a ser observado na Tabela 6, diz respeito ao desdobramento da interação ao longo do período de amostragem, onde se verifica que para as culturas da crotalária, mucuna-anã, milheto e milho, tem-se comportamento estatístico semelhante, e que aos 45 DAE foram obtidos/encontrados os menores valores de K no solo. Para o feijão de porco e o comum aos 45 e 60 DAE não houve diferenças estatísticas significativas.

Profundidade 20-40 cm

Os resultados de pH, P, K, Ca, Mg e acidez potencial para a profundidade de 20-40 cm estão apresentados na Tabela 7, onde se pode observar diferença significativa para todas as épocas amostradas, bem como variação estatística para os teores de K e da acidez potencial, quando cultivadas plantas para a remediação de solos salinizados por vinhaça.

Assim, houve uma diminuição dos valores de pH quando o solo foi amostrado aos 30 e 45 DAE, porém, no final do ciclo experimental, os valores de pH foram semelhantes ao encontrado no início do experimento, isso pode ser atribuído a exudação dos ácidos orgânicos, açúcares, fenóis na rizosfera, interferindo no pH (HINSINGER et al., 2003; TAIZ; ZEIGER, 2004). Para os demais resultados, todos os valores foram decrescentes ao longo do ciclo de amostragem, excetuando o K que aos 60 DAE foi estatisticamente superior aos resultados observados aos 45 DAE. Os teores de P a partir de primeira avaliação depois da introdução das culturas teve

uma diminuição em média de 77%, em relação à amostragem inicial. Para o K a diminuição aos 45 DAE, chegou a 60%. Para Ca, Mg e H+Al os percentuais de redução dos teores dos elementos no solo foram respectivamente de 30, 40 e 22%.

Na profundidade de 20-40 cm observa-se também (Tabela 7) que as espécies fitorremediadoras alteraram significativamente os teores de K e da acidez potencial. Entre as culturas utilizadas, verifica-se diferença estatística a cultura do milheto e do feijão de porco, sendo que para as demais culturas o comportamento estatístico foi semelhante. O solo cultivado com milheto apresentou a menor concentração de K, corroborando com Silva et al. (2013), onde a cultura do milheto obteve maiores remoções de K em mesma época de amostragem. Alvarenga et al. (2001) afirmaram que o milheto fornece palhada mais duradoura na superfície do solo e, com seu sistema radicular mais desenvolvido, podendo alcançar mais de 2,0 m, absorve nutrientes em maiores profundidades, extraindo e reciclando nutrientes.

A MO em subsuperfície (Tabela 8) mostrou uma interação estatística significativa entre as espécies, com diminuição dos valores ao longo do ciclo experimental. Quanto à época amostrada, houve diferença estatística significativa aos 30 DAE, e, excetuando o cultivo da crotalária, as demais plantas fito extratoras tiveram um comportamento estatístico semelhante, e nesses solos foram obtidos os menores concentrações de MO.

TABELA 7. Teores de pH_{CaCl2}, P (fósforo), K (potássio), Mg (magnésio) e H+Al (acidez potencial) para a profundidade de 20-40 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

Tratamentos	pH _{CaCl2}	PMelich mg dm ⁻³	K	Ca Mg H+Al		
				----- cmolc dm ⁻³ -----		
DAE						
0	6,10 A	26,50 A	3,50 A	7,20 A	2,70 A	3,65 A
30	5,77 B	5,95 B	2,35 B	5,62 B	1,89 B	3,07 BC
45	5,70 B	5,82 B	1,35 D	5,04 B	1,63 BC	3,25 B
60	6,09 A	5,73 B	2,02 C	5,59 B	1,62 C	2,84 C
F	38,46**	440,65**	427,42**	34,35**	94,02**	22,00**
C.V. (%)	2,43	18,98	8	11,48	11,36	9,62
Plantas						
Crotalária	5,89 A ⁴	11,02 A	2,36 AB	5,82 A	1,96 A	3,04 B
Mucuna ¹	5,88 A	11,61 A	2,37 AB	5,88 A	1,96 A	3,43 A
Milheto	5,98 A	10,69 A	2,13 B	5,63 A	1,85 A	3,20 AB
Milho	5,89 A	11,13 A	2,18 AB	6,07 A	1,98 A	3,25 AB
F. porco ²	5,91 A	10,93 A	2,43 A	5,85 A	1,97 A	3,18 AB
F. comum ³	5,94 A	10,63 A	2,38 AB	5,94 A	2,04 A	3,12 AB
F	0,85 ^{ns}	0,39 ^{ns}	3,51*	0,71 ^{ns}	0,66 ^{ns}	2,61*
C.V. (%)	2,39	17,84	9,7	10,23	13,50	8,83

Em que: ¹Mucuna: mucuna-anã; ²F.porco: feijão de porco; ³F. comum: feijão comum; ⁴letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; DAE: dias após a emergência; C.V.: coeficiente de variação; *: significativo a 5% pelo teste de Tukey; **: significativo a 1% pelo teste de Tukey; ^{ns}: não significativo.

TABELA 8. Teores de matéria orgânica (MO) na profundidade de 20-40 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

Plantas	MO (mg dm ⁻³) 20-40 cm			
	Dias após a emergência (DAE)			
	0	30	45	60
Crotalária	36,20 Aa ⁴	14,30 Ab	7,63 Ac	8,53 Ac
Mucuna ¹	36,20 Aa	9,83 Bb	8,93 Ab	9,40 Ab
Milheto	36,20 Aa	8,50 Bb	10,30 Ab	8,97 Ab
Milho	36,20 Aa	8,53 Bb	7,60 Ab	11,20 Ab
F. porco ²	36,20 Aa	8,97 Bb	9,40 Ab	10,30 Ab
F. comum ³	36,20 Aa	8,53 Bb	7,60 Ab	8,53 Ab
F (épocas)		539,26**		
F (plantas)		0,89		
F (ép x pls)		2,21*		
C.V. (épocas)		15,37		
C.V. (plantas)		10,89		

Em que: ¹Mucuna: mucuna-anã; ²F.porco: feijão de porco; ³F. comum: feijão comum; ⁴letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; C.V.: coeficiente de variação; *: significativo a 5% pelo teste de Tukey; **: significativo a 1% pelo teste de Tukey.

As avaliações das culturas no decorrer do ciclo experimental mostraram tendência estatística similar nas diferentes épocas, ou seja, o solo cultivado com a mucuna-

anã, milheto, milho, o feijão de porco e o comum apresentou o menor teor de MO e isso foi constante estatisticamente até o final das amostragens. O teor de MO

no solo cultivado com crotalária, foi decrescente até o 30 DAE, com novo decréscimo após 45 DAE, em seguida mantendo-se constante. A diminuição da MO do solo é resultante, além dos processos que envolvem a sua mineralização, que é acentuado principalmente devido a época do ano em que foi realizado o experimento (verão), acrescido pelo manejo das culturas, já que não houveram problemas de déficit hídrico. Cabe salientar que os

diferentes metabolismos das espécies podem ter ocasionado influências na biodegradação da MO do solo.

A fim de enfatizar as diferenças entre as espécies fitorremediadoras e seu desempenho na remediação de solo salinizado por adição contínua de vinhaça, são apresentados, na Tabela 9, os percentuais de remoção dos teores de K em duas profundidades pelas espécies fitorremediadoras.

TABELA 9. Percentuais de redução dos teores de potássio em função das espécies vegetais na remediação do solo e do tempo de sua aplicação em duas profundidades.

Tratamentos	0-20 cm			20-40 cm		
	30 DAE	45 DAE	60 DAE	30 DAE	45 DAE	60 DAE
	(%)			(%)		
Crotalária	29,4	65,8	50,6	33,4	56,3	40,8
Mucuna ¹	34,5	66,0	49,4	28,6	58,0	42,8
Milheto	29,4	80,9	57,6	42,8	71,4	42,8
Milho	33,3	71,8	53,6	36,3	66,6	46,6
F. porco ²	36,4	57,6	52,4	28,6	53,4	40,8
F. comum ³	36,4	44,6	52,4	27,7	62,8	38,00

Em que: ¹Mucuna: mucuna-anã; ²F. porco: feijão de porco; ³F. comum: feijão comum; DAE: dias após a emergência.

Observando os dados da Tabela 9 é possível verificar que, para a maior parte dos manejos houve redução dos teores de K superior a 30% logo aos 30 DAE. Também se observa que o cultivo de milho foi o mais eficiente em reduzir o K na camada superior do solo, com valores superiores a 80%; e na profundidade de 20-40 cm com valores superiores a 70%.

Apesar de não apresentar diferenças estatísticas significativas para os teores de K no solo, semelhantemente aos resultados obtidos por Silva et al. (2013), a cultura do milho foi a que demonstrou os menores teores residuais de K no solo, em uma mesma época de amostragem. Alvarenga et al. (2001) afirmaram que o milho fornece palhada mais duradoura na superfície do solo, e, com seu sistema radicular mais desenvolvido, podendo alcançar mais de 2 m, absorve nutrientes em maiores profundidades, extraindo e reciclando nutrientes.

Mais estudos são necessários em solos de diferentes classes pedogenéticas, além de outros resíduos agroindustriais usados como fertilizantes e um acervo maior de espécies vegetais com potencial fitorremediador, pois apenas desta maneira a fitorremediação se efetivará uma consolidada e recomendada no Brasil.

CONCLUSÕES

Considerando o tempo de fitorremediação em que essa prática foi aplicada, as espécies vegetais deverão, além da retirada do agente contaminante, trazer benefícios como: proteção do solo, fixação e ciclagem de nutrientes, produção de grãos e/ou de massa verde para alimentação animal e fácil erradicação, entre outros. Para tal, as conclusões deste trabalho fundamentam-se em:

- O manejo de remediação do solo em que foi obtido o menor teor de potássio foi encontrado quando o solo foi cultivado com milho.

- As práticas de remediação do solo utilizadas no experimento que proporcionaram os menores teores de K no solo na camada superficial e em profundidade, respectivamente, em ordem decrescente foram as culturas:

0-20 cm: milho > milho > mucuna-anã > crotalária > feijão de porco > feijão comum.

20-40 cm: milho > milho > feijão comum > mucuna-anã > crotalária > feijão de porco.

- Os diferentes manejos de remediação do solo quanto ao decréscimo dos teores de K, foram obtidos quando realizados pelo período de 45 dias.

AGRADECIMENTO

À CAPES pela concessão de bolsa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, R.C.; CABEZAS, W.A.L.; CRUZ, J.C.; SANTANA, D.P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Epamig: Belo Horizonte, v.22, n.208, p.25-36, 2001.
- CANTERI, M.G.; ALTHAUS, R.A.; VIRGENS FILHO, J.S.; GIGLIOTTI, E.A.; GODOY, C.V. SASM - Agri: Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos Scoft - Knott, Tukey e Duncan. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, v.1, n.2, p.18-24, 2001.
- DA SILVA, J.O.; CANTARUTTI, R.B.; DE BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; ROCHA, F.A. **Capacidade de troca catiônica radicular de gramíneas e leguminosas forrageiras na absorção de cátions**. Ministério da Educação Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, 2009. p.60.
- DA SILVA, M.A.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.1, p.108-114, 2007.

Fitorremediação de solos salinizados...

SILVA, R. Z.; CONTE, A. M. (2017)

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília/DF: Embrapa Produção de Informação, 2013. 353p.
- GIACHINI, C.F.; FERRAZ, M.V. Benefícios da utilização de vinhaça em terras de plantio de cana-de-açúcar-revisão de literatura. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v.3, p.1-15, 2009.
- HINSINGER, P.; PLASSARD, C.; TANG, C.; JAILLARD, B. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. **Plant and Soil**, v.248, n.1-2, p.43-59, 2003.
- KRONKA, S.N.; BANZATO, D.A. **ESTAT**: sistema para análise estatística versão 2. Jaboticabal: Funep, 1995.
- MARQUES, M.; AGUIAR, C.R.C.; SILVA, J.J.L.S. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.1, p.1-11, 2011.
- MELO, É.E.C.D.; NASCIMENTO, C.W.A.D.; SANTOS, A.C.Q. Solubility, phytoextraction and fractionation of heavy metals as a function of chelating agents applied to soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.6, p.1051-1060, 2006.
- NICOHELLI, L. M.; NASCENTES, R.; LIMA, E.B.N.R.; SOARES, F.S. Sorção de potássio em amostras de solo submetidas à aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.7, p.754-760, 2012.
- ROMEIRO, S.; LAGÔA, A.M.M.A.; FURLANI, P.R.; ABREU, C.A.D.; PEREIRA, B.F.F. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia ensiformes* L. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.2, p.327-334, 2007.
- SILVA, L.F.; CANÔ, C.R.; SILVA, D.C.; BERMEJO, G.R.; MOREIRA, G.M.B.; GOMES, C.J.A.; GRACIANO, I.; CASTRO, A.M.C. Fitorremediação de solos com alta saturação por potássio. In: **IV Simpósio de Engenharia Rural**, 2013.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. São Paulo: Artmed, 2004.
- TEIXEIRA, C.M.; CARVALHO, G.J.; SILVA, C.A.; ANDRADE, M.J.B.; PAES, J.M.V. Nutrição mineral do feijoeiro sob influência de nitrogênio e palhadas de milho solteiro e consorciado com crotalária. **Fazu em Revista**, Uberaba, n.7, p.73-79, 2010.