



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS



COMPORTAMENTO DO CAPIM-VETIVER (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) COMO CONTRIBUIÇÃO NA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE DA MARGEM DO RIO SÃO FRANCISCO

LORENA MACHADO

2014



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS**



LORENA MACHADO

**COMPORTAMENTO DO CAPIM-VETIVER (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty)
COMO CONTRIBUIÇÃO NA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE DA MARGEM DO
RIO SÃO FRANCISCO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agroecossistemas, área de concentração em Produção em Agroecossistemas, para obtenção do título de “Mestre em Ciências”.

Orientador

Prof. Dr. Francisco Sandro Rodrigues Holanda

**SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL
2014**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

M149c Machado, Lorena
Comportamento do capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.)
Roberty) como contribuição na estabilização de talude da margem
Rio São Francisco / Lorena Machado; orientador Francisco Sandro
Rodrigues Holanda. – São Cristóvão, 2014.
55 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Universidade
Federal de Sergipe, 2014.

1. Matas ripárias. 2. Reflorestamento. 3. São Francisco, Rio,
Bacia. 4. Gramíneas. 5. *Chrysopogon zizanioides*. I. Holanda,
Francisco Sandro Rodrigues, orient. II. Título.

CDU 627.414:633.21

LORENA MACHADO

**COMPORTAMENTO DO CAPIM-VETIVER (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty)
COMO CONTRIBUIÇÃO NA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE DA MARGEM DO
RIO SÃO FRANCISCO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agroecossistemas, área de concentração em Sustentabilidade de Agroecossistemas, para obtenção do título de “Mestre em Ciências”.

DEFESA em: 19 de fevereiro de 2014.



Prof. Dr. Alceu Pedrotti
UFS



Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim
UERPE



Prof. Dr. Francisco Sandro Rodrigues Holanda
UFS
(Orientador)

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL

*Aos meus pais, Eudas e Silvia, pelo apoio e
amor incondicional,
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade da conquista de mais um nível na minha formação educacional e profissional. Tenho certeza que ele esteve presente em todos os momentos dessa trajetória, me dando força e coragem para encarar todos os desafios.

Aos meus pais, Eudas e Silva, responsáveis pela minha educação, por sempre terem apoiado as minhas escolhas. Agradeço o carinho, o amor, a dedicação, os ensinamentos e a formação moral que recebi. Vocês são meu bem maior!

As minhas irmãs, Bianca e Priscilla, e as minhas sobrinhas, Gabi, Catarina e Giovanna, pela compreensão, pelo incentivo, pela parceria, pelo amor e pelos momentos de distração. Aos meus cunhados, Júnior e Henrique, irmãos que a vida me deu, pelo companheirismo e pelo carinho. À família Machado, exemplo de união e cumplicidade, obrigada pelo apoio, vocês moram no meu coração.

À família Souto, pelos bons momentos e boas risadas, vocês completam minha alegria. A Carol, pelo estímulo, pela ajuda, pelos debates, pelos desabafos, por me fazer acreditar que eu venceria todos os obstáculos que encontrei no curso de mestrado.

Ao professor Tácio Oliveira (*in memoriam*), meu primeiro orientador, pelas risadas, pelos ensinamentos e pelo entendimento de que somos responsáveis pelas nossas escolhas. As amigas Laís e Naiara, pelo compartilhamento do saber e pela divisão de angústias. Aos colegas Raul e Rafael, pela ajuda e dedicação à pesquisa.

Ao meu orientador, professor Sandro Holanda, pelo acolhimento, pela oportunidade de obter novos conhecimentos e por acreditar em mim. Conseguimos!

A todos da família LABES, pela receptividade e pela ajuda, em especial a Suzi, Vanessa, Iury, Igor, Marks e ao “agregado” Olavo.

Aos amigos e professores do Neren, em especial, ao professor Leandro Bacci, pelo incentivo ao gosto pela ciência e pelos conselhos durante essa trajetória. A CAPES pelo apoio financeiro.

A todos os meus amigos que torceram e acreditaram nessa conquista.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	4
2.2 O Baixo São Francisco	6
2.3 Erosão marginal do Baixo São Francisco Sergipano	7
2.4 Bioengenharia de solo na estabilização de taludes	9
2.5 Uso do capim-vetiver na estabilização de taludes marginais	10
2.6 Resistência à tração das raízes do vetiver e resistência ao cisalhamento do solo	13
2.7 Resistência do solo à penetração e uso do capim-vetiver	15
3. ARTIGO 1: Contribuição do sistema radicular do capim-vetiver para melhoria da resistência ao cisalhamento do solo da margem direita do Rio São Francisco	17
Resumo	18
Introdução	19
Materiais e métodos	20
Resultados e discussão	24
Conclusões	30
Referências bibliográficas	30
4. ARTIGO 2: Resistência à penetração de um Neossolo Flúvico: efeito do sistema radicular do capim-vetiver em taludes do Rio São Francisco	34
Resumo	35
Introdução	36
Materiais e métodos	37
Resultados e discussão	40
Conclusões	45
Referências bibliográficas	47
5. CONCLUSÕES GERAIS	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE FIGURAS

REFERENCIAL TEÓRICO:

FIGURA 1. Mapa do Brasil com detalhe das quatro regiões fisiográficas que compõem a Bacia do Rio São Francisco.	05
FIGURA 2. Planta do capim-vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>).	11

ARTIGO 1: Contribuição do sistema radicular do capim-vetiver para melhoria da resistência ao cisalhamento do solo da margem direita do Rio São Francisco

FIGURA 1. Monólito utilizado para coleta de raízes do capim-vetiver, com detalhe do corte realizado por camada.	21
FIGURA 2. Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) e do Sistema Radicular (MSR) dos cinco indivíduos de capim-vetiver.	25
FIGURA 3. Densidade radicular (DR) e Densidade de Comprimento Radicular (DCR) com a profundidade do solo dos cinco indivíduos de capim-vetiver.	25
FIGURA 4. Razão de Raiz por Área (RAR) e Resistência de Raízes à Tração (TR) com a profundidade do solo de capim-vetiver.	27
FIGURA 5. Coesão da Raiz (CR) por classe de profundidade do solo dos cinco indivíduos de capim-vetiver.	29

ARTIGO 2: Resistência à penetração de um Neossolo Flúvico: efeito do sistema radicular do capim-vetiver em taludes do Rio São Francisco

FIGURA 1. Umidade do solo para o Neossolo Flúvico do talude marginal do Baixo São Francisco nas diferentes profundidades estudadas próximo a planta e nas entrelinhas de cultivo.	41
FIGURA 2. Resistência mecânica do Neossolo Flúvico à penetração, na profundidade 0 – 0,20 m, em pontos próximos às plantas de Vetiver e em pontos nas entrelinhas.	42
FIGURA 3. Densidade de raízes (DR) do capim-vetiver da área experimental nas diferentes profundidades estudadas.	43
FIGURA 4. Resistência mecânica do Neossolo Flúvico à penetração, na profundidade 0,20 – 0,40 m, em pontos próximos às plantas de Vetiver e em pontos nas entrelinhas.	44
FIGURA 5. Resistência mecânica do Neossolo Flúvico à penetração, na profundidade 0,40 – 0,60 m, em pontos próximos às plantas de Vetiver e em pontos nas entrelinhas.	45

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 2: Resistência à penetração de um Neossolo Flúvico: efeitos da bioengenharia de solos em taludes do Rio São Francisco

TABELA 1. Resistência à penetração (RP) e umidade do solo próximo ao vetiver e na entrelinha do cultivo. 40

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CIERs	Centros Integrados de Educação Rural
CR	Coesão da Raiz
DCR	Densidade do Comprimento Radicular
DR	Densidade Radicular
GEF	Global Environment Facility ou Fundo Global para o Meio Ambiente
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
MSPA	Matéria Seca da Parte Aérea
MSR	Matéria Seca das Raízes
PAE	Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado da Bacia e sua Zona Costeira
PRSF	Programa de Revitalização da Bacia do Rio São Francisco pelo Ministério do Meio Ambiente
RAR	Razão de Raiz por Área
RP	Resistência do Solo à Penetração
TR	Resistência de Raízes à Ruptura
UFS	Universidade Federal de Sergipe

RESUMO

MACHADO, Lorena. **Comportamento do capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) como contribuição na estabilização de talude da margem do Rio São Francisco.** São Cristóvão: UFS, 2014. 55p. (Dissertação – Mestrado em Agroecossistemas).*

As alterações do regime hidrológico na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, devido à implantação da cascata de hidrelétricas, estão causando baixos níveis de água e consequentemente erosão nos taludes do rio pelo solapamento da sua base. Essas alterações, juntamente com o desmatamento da mata ciliar requerem medidas economicamente viáveis e eficientes, visto que vêm afetando a população do Baixo São Francisco. Esse estudo teve como objetivo avaliar o comportamento do sistema radicular do capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) quanto à capacidade de reestruturação físico-mecânica do solo e à adequação ao processo de estabilização da erosão dos taludes, assim como avaliar o seu efeito na resistência do solo à penetração (RP). Para avaliar a influência da gramínea na resistência ao cisalhamento do solo, foram mensuradas a Densidade Radicular (DR), a Densidade do Comprimento Radicular (DCR), a Razão de Raiz por Área (RAR), a Resistência de Raízes à Ruptura (TR) e a Coesão da Raiz (CR). Os resultados foram submetidos à análise de variância ($p < 0,05$) utilizando o SISVAR e em seguida realizou-se a análise de regressão polinomial. Para avaliar a RP, foram realizadas amostragens em pontos localizados próximos ao capim-vetiver e nas entrelinhas de cultivo, ao longo do perfil até a profundidade de 0,60 m. O teor de umidade foi determinado por pesagem, a RP por um penetrômetro automatizado, a análise granulométrica por densimetria e a densidade de raízes pelo método do monólito. Os resultados da RP, da umidade e da densidade de raízes foram submetidos à análise de variância ($p < 0,05$) e posteriormente as médias foram comparadas pelo teste de Tukey usando o software SISVAR. Para DR, DCR e RAR, a camada de 0-0,10 m apresentou maiores valores com $4,84 \text{ kg m}^{-3}$, $12,45 \text{ km m}^{-3}$, 1,66%, respectivamente. Enquanto que o resultado médio de TR foi de 83 MPa e o de CR de 528 kPa. Os pontos próximos ao capim-vetiver apresentaram RP média de 1793,94 kPa e umidade média de 11,78%, diferindo estatisticamente dos pontos amostrados nas entrelinhas de cultivo. A RP e a umidade do solo não diferiram estatisticamente nas profundidades. O capim vetiver promoveu a cobertura do solo, favorecendo a maior retenção de água e, consequentemente, diminuindo a RP, além de favorecer o aumento da resistência ao cisalhamento do solo, auxiliando na estabilização de taludes.

Palavras-chave: *Chrysopogon zizanioides*, erosão marginal, densidade de raízes, reforço do solo, resistência do solo à penetração.

* Comitê Orientador: Francisco Sandro Rodrigues Holanda – UFS (Orientador).

ABSTRACT

MACHADO, Lorena. **Behavior of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) as a contribution in stabilization in the slope margins São Francisco River.** São Cristóvão: UFS, 2014. 55p. (Dissertation – Master Program in Agroecosystem).*

The changes in the hydrological regime in the São Francisco River basin, due to the implementation of hydroelectric power dams, are causing low water levels and therefore the bank erosion promoted by the riverbank undercutting. These changes, along with deforestation of riparian vegetation require economically viable and efficient measures since been affecting the population of the Lower São Francisco. The objective of this study was to evaluate the behavior of the root system of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) in order to evaluate its ability to restructuring physical soil mechanics and suitability to the process of stabilization of erosion of banks, as well as evaluate its effect on the soil penetration resistance (PR). To evaluate the influence of the grass on soil shear strength Root Density (RL), the Root Length Density (RLD), the Root Area Ratio (RAR), the Root Tensile Strength (TR) and the Root Cohesion (CR) were measured. The results were subjected to analysis of variance ($p < 0.05$) using the SISVAR and then was held the polynomial regression analysis. To evaluate the RP, sampling was carried out near vetiver grass cultivation and the rows between crops along the profile until a depth of 0.60 m. The soil water was determined by weighing method, the RP by an automated penetrometer, the particle-size analysis by densitometry and root density by the monolith method. The results of RP, moisture and root density were subjected to analysis of variance ($p < 0.05$) and afterwards the means were compared by Tukey test using the software SISVAR. For DR, DCR and RAR layer 0-0.10 m showed higher results which yielded 4.84 kg m^{-3} , 12.45 km m^{-3} , 1.66%, respectively. While the average result of TR was 83 MPa and CR 528 kPa. The vetiver grass near points had a mean RP of 1793.94 kPa and average soil water of 11.78%, differing from the sampled points in the rows between crops. The PR and soil moisture were not statistically different throughout the depths. The vetiver grass promoted ground cover, favoring a higher water retention and consequently decreasing the RP, as well as helping to increase the soil shear strength, giving a very important contribution to slope stabilization.

Key-words: *Chrysopogon zizanioides*, bank erosion, root density, soil reinforcement, soil penetration resistance.

* Guidance Committee: Francisco Sandro Rodrigues Holanda – UFS (Orientador).

1. INTRODUÇÃO GERAL

O número de áreas degradadas tem aumentado gradativamente em todo o país, promovendo inúmeros prejuízos ao meio ambiente. Dados da FAO (2005) confirmam que aproximadamente 16% da área total do Brasil possui algum estado de degradação do solo desencadeada por atividades antrópicas. Dentre estas áreas encontra-se a região do Baixo São Francisco e sua zona costeira.

Um dos principais problemas do Baixo São Francisco é a erosão das margens e do leito do rio (PAE, 2004). Esta erosão marginal foi acelerada, principalmente, pela alteração do regime hídrico do Rio São Francisco após a construção de projetos hidrelétricos. Segundo Holanda et al. (2008), o processo erosivo das margens do Baixo São Francisco ocorre devido ao solapamento da base do talude desencadeado pelo baixo nível d'água associado ao desmatamento da vegetação ciliar.

Essa degradação das margens dos taludes tem promovido, além dos impactos ambientais, impactos socioeconômicos para os ribeirinhos da região do Baixo São Francisco Sergipano. Segundo Oliveira et al. (2009), é necessário a revegetação dos taludes com espécies que suportem a ação das ondas, reduzindo os constantes desmoronamentos de blocos de terra que caem no canal do rio.

O uso de técnicas de bioengenharia de solos tem sido estudado como ação de amenização da degradação dos taludes devido ao seu elevado potencial de estabilização dos taludes, como também por ser economicamente viável quando comparadas às técnicas de engenharia tradicional. A vegetação auxilia na contenção de taludes atuando como cobertura contra o vento e água da chuva, capaz de diminuir o escoamento superficial e a perda de solo, como também oferece um reforço à resistência ao cisalhamento do solo pelas raízes.

Pesquisas mostram que o capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) é um forte candidato para o controle da erosão, reforço do solo e, conseqüentemente, estabilização dos taludes. As características morfológicas desta gramínea como raízes densas e talos eretos e duros, associadas ao seu rápido crescimento e poder de penetração no solo, justificam o sucesso do capim-vetiver na atenuação dos processos erosivos (TRUONG & HENGCHAOVANICH, 1997).

Avaliações do capim-vetiver por alguns autores já relataram a sua capacidade de reforço à resistência ao cisalhamento do solo. Hengchaovanich & Nilaweera (1996) demonstraram um aumento de até 90% na resistência ao cisalhamento em solo cultivado com

capim-vetiver comparado ao solo sem cultivo. Este incremento na resistência ao cisalhamento está diretamente associado à elevada densidade e resistência à tração do sistema radicular desta gramínea.

Concomitantemente, o uso de *Chrysopogon zizanioides* na revegetação de taludes degradados promove melhoria nas propriedades físicas do solo, como a redução na resistência do solo à penetração. Estudo realizado por Cobra et al. (2012) demonstrou que o capim-vetiver diminuiu a resistência do solo à penetração de taludes.

A resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas que influencia o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas, sendo importante na revegetação dos taludes. Além disto, é utilizada para determinar o grau de compactação do solo, identificando camadas de impedimento ao crescimento radicular e influenciando a taxa de infiltração do solo. Vale salientar que a compactação do solo diminui a capacidade de infiltração do mesmo, aumentando o escoamento superficial e, conseqüentemente, acelerando o processo erosivo dos taludes marginais.

Apesar de já terem sido reconhecidas muitas características favoráveis para o controle da erosão marginal e estabilização de taludes pelo capim-vetiver em estudos anteriores, ainda são precários sobre as propriedades das raízes, principalmente nos solos dos taludes marginais do Baixo São Francisco Sergipano. Diante disto, este trabalho teve como objetivo avaliar as características do sistema radicular do capim-vetiver assim como a resistência à penetração de solo revegetado com esta gramínea em talude marginal no Baixo São Francisco.

A presente dissertação, além da exposição geral do tema (Introdução Geral) está estruturada em mais três partes.

No Referencial Teórico é realizada uma revisão de literatura sobre a problemática abordada, sendo apontados os aspectos gerais da Bacia do Rio São Francisco, da erosão marginal do Baixo São Francisco, da bioengenharia de solos, do capim-vetiver, da resistência à tração das raízes do vetiver e resistência ao cisalhamento do solo e da resistência à penetração do solo com uso do capim-vetiver.

O Artigo 1 aborda as propriedades das raízes do capim-vetiver, tais como distribuição de raízes e resistência à tração das raízes, como também o reforço promovido pelo sistema radicular como incremento da resistência ao cisalhamento do solo, a fim de avaliar o potencial estabilizador dessa gramínea em talude marginal do Baixo São Francisco.

O Artigo 2 consiste na mensuração da resistência à penetração do solo de talude marginal do Baixo São Francisco revegetado com capim-vetiver, importante para

compreensão da influência dessa gramínea na compactação, na taxa de infiltração do solo, no escoamento superficial e, por conseguinte, no processo erosivo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

A Bacia do Rio São Francisco está distribuída em sete unidades da federação (Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal), contemplando 504 municípios. Com vazão média de $2.850 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e abrangendo uma área de drenagem de 639.219 km^2 , a qual corresponde a 7,5% da área territorial do país, esta bacia apresenta grande importância para o Brasil devido ao alto potencial hídrico passível de aproveitamento e às contribuições histórica e econômica para a região semiárida (SEMARH, 2014). De acordo com MMA (2006), a água do São Francisco representa cerca de 2/3 da disponibilidade de água doce do Nordeste brasileiro.

O Rio São Francisco nasce na Serra da Canastra, em Minas Gerais, e deságua no Oceano Atlântico, na divisa com os Estados de Sergipe e Alagoas. Essa bacia hidrográfica está dividida em quatro regiões fisiográficas, as quais são: Alto São Francisco; Médio São Francisco; Sub-Médio São Francisco; Baixo São Francisco (Figura 1). O Alto São Francisco refere-se à área compreendida desde as nascentes até Pirapora e Montes Claros (MG). O Médio São Francisco abrange a maior parte da bacia, compreende o trecho de Pirapora até Remanso, na Bahia. Já o Sub-médio São Francisco corresponde à região entre o reservatório de Sobradinho (Remanso) e Paulo Afonso. E, por fim, a região do Baixo São Francisco que vai de Paulo Afonso até a foz (MMA, 2006; CBHSF, 2014).

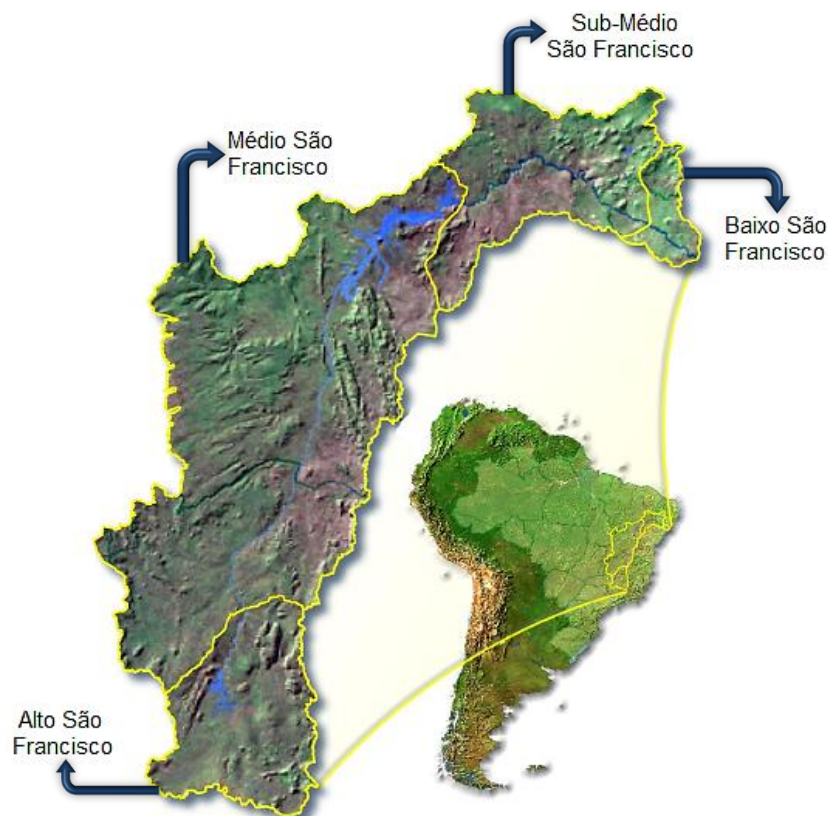


FIGURA 1. Mapa do Brasil com detalhe das quatro regiões fisiográficas que compõem a Bacia do Rio São Francisco.

Fonte: Adaptado de PAE (2003).

De acordo com PAE (2004) e ANA (2014), a Bacia do São Francisco é marcada por paradoxos socioeconômicos e vulnerabilidade ambiental, abrangendo áreas de acentuada riqueza e alta densidade demográfica, como também áreas de pobreza crítica e baixa densidade demográfica. Em 2010, mais de 14,2 milhões de pessoas (7,5% da população brasileira) habitavam a região da bacia, porém a maioria concentrada na região metropolitana de Belo Horizonte. Segundo CBHSF (2014), o Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia, concebido para o período 2003-2013, identificou variações significativas em indicadores, como o índice de mortalidade infantil (variável de 25,66% em Minas até 64,38% em Alagoas), o Índice de Desenvolvimento Humano – IDH (entre 0,823 no Alto São Francisco, onde se localiza a Região Metropolitana de Belo Horizonte a 0,538 nas demais sub-bacias) e o PIB per capita (desde R\$ 5.239 em Minas até R\$ 2.275 em Alagoas).

No âmbito econômico, as regiões do Alto, Médio e Sub-médio São Francisco são mais contempladas com a presença de indústrias e agroindústrias, enquanto que, no Baixo São Francisco, a população ribeirinha se restringe basicamente à agropecuária e à pesca tradicionais (CBHSF, 2014). Dentre as atividades econômicas da bacia, além da hidroenergia, principal setor produtivo da região hidrográfica, outros diversos tipos de usos da água são

registrados, tais como: agricultura irrigada; indústria; navegação; saneamento; pesca e aquicultura; e atividades turísticas e de lazer. Como reflexos destas atividades, surge a necessidade de criação de medidas mitigadoras para recuperação ambiental das áreas degradadas (ANA, 2014).

Diante da necessidade de ações estratégicas de gestão e conservação dos recursos hídricos da Bacia do São Francisco, foi instalado em 2002 o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – CBHSF e lançado o projeto GEF São Francisco (Global Environment Facility ou Fundo Global para o Meio Ambiente). Em 2004, demonstrando a preocupação do Governo Federal com a manutenção e revitalização do São Francisco, criou-se o Programa de Revitalização da Bacia do rio São Francisco pelo Ministério do Meio Ambiente (PRSF) como também fora desenvolvido o Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado da Bacia e sua Zona Costeira (PAE).

2.2 O Baixo São Francisco

O Baixo São Francisco estende-se de Belo Monte (AL) à foz, no Oceano Atlântico, abrangendo as sub-bacias dos rios Ipanema e Capivara, contemplando os Estados da Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. Apresenta uma área de 32.013 km², o que equivale a 5,1% da área total desta bacia. Neste trecho, a altitude varia de 200 m até o nível do mar, apesar de algumas serras na periferia atingirem 500 m (MMA, 2006; CBHSF, 2014). De acordo com PAE (2003), o Baixo São Francisco apresenta evaporação de 2.300 mm anuais, temperatura média anual de 25°C e precipitação média anual em torno de 800 a 1.300 mm. Esta região hidrográfica é marcada por chuvas concentradas no inverno, de março a setembro, diferentemente do restante da bacia em que as chuvas ocorrem predominantemente no verão.

Tratando-se da cobertura vegetal, o Baixo São Francisco possui formação predominante de Savana Estépica, de Paulo Afonso (BA) até a foz do rio Ipanema (AL). No entanto, à medida que o Rio São Francisco aproxima-se de sua foz, são mais frequentes as Formações Pioneiras de Influência Flúvio-Marinha que formam os manguezais. Nestas áreas, as atividades antrópicas são intensas, até como consequência histórica da ocupação territorial da faixa litorânea (MMA, 2006).

Essas intervenções antrópicas na bacia, tais como os barramentos, a poluição oriunda dos esgotos domésticos e de atividades agrícolas, a incompatibilidade entre a operação das barragens e as necessidades ecológicas no Baixo São Francisco, colaboraram para a redução

da exploração pesqueira, praticamente acabando com a pesca artesanal. Por sua vez, a pesca tradicional é considerada como importante fonte de alimento e sustento das populações ribeirinhas do Baixo São Francisco, estando estas necessitadas de alternativas para melhoria das suas condições de vida (PAE, 2004; MMA, 2006; CBHSF, 2014).

Para Lopes e Freitas (2003), os setores mais significativos na demanda hídrica, em ordem decrescente, do Baixo São Francisco são: irrigação; consumo humano; consumo animal; e indústria (incluindo a geração de energia). Essa região hidrográfica é a que possui a maior demanda hídrica para a irrigação. Já no Alto e Médio São Francisco, grande parte das águas é destinada a geração de energia e consumo humano.

Quanto à Região do Baixo São Francisco Sergipano, esta representa apenas 1,2% do total da Bacia do São Francisco e abrange os municípios de Amparo do São Francisco, Brejo Grande, Cedro de São João, Ilha das Flores, Neópolis, Propriá, Santana do São Francisco, Telha e Japoatã. Limita-se ao norte com o Estado de Alagoas, ao sul com a bacia complementar, a leste com o Oceano Atlântico e a oeste com o Rio Xingó (SANTOS, 2002). De acordo com Guimarães (2004), predomina o clima subúmido, com precipitação anual de 350 a 1.500 mm, sendo as chuvas concentradas nos meses de maio a julho. As vegetações predominantes são floresta estacional semidecidual, mangue e vegetação litorânea (PAE, 2004).

Dentre os problemas relacionados aos recursos hídricos e às interações ambientais do Baixo São Francisco e sua zona costeira, o Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado da Bacia do Rio São Francisco e da sua Zona Costeira listou três principais: impactos dos reservatórios de montante na ictiofauna e perda de biodiversidade em razão da redução de nutrientes e do controle de cheias que permitam a ocorrência da piracema; quebra do equilíbrio sedimentológico e de cheias na foz; e erosão das margens e do leito do rio São Francisco (PAE, 2004).

2.3 Erosão marginal do Baixo São Francisco Sergipano

A erosão das margens é decorrente da remoção de materiais do barranco pela ação fluvial (correntes e, ou ondas) ou de forças de origem externa (precipitação pluviométrica). Entende-se como barranco as margens de um rio que apresentam certa altura (ROSS, 1992). Além disto, a erosão marginal também pode ser desencadeada por ações antrópicas, tais como

obras de construção civil, substituição da mata ciliar pelo cultivo, processo de urbanização e a exploração de alúvios (GUERRA & CUNHA, 1996).

Para Thorne & Tovey (1981), Bandeira (2005) e Guimarães et al. (2010), além do aumento da carga de fundo dos rios e da destruição progressiva da área marginal desvalorizando os terrenos ribeirinhos e limitando o seu uso, a erosão marginal provoca diversos impactos ambientais, como: aumento da turbidez dos corpos hídricos, o que aumenta o custo de tratamento de água para consumo; perda da área produtiva; assoreamento do rio; mudança do regime fluvial; e prejuízo à vida dos organismos aquáticos.

Em tempo, a erosão marginal do Baixo São Francisco tem sido um dos problemas com maiores consequências socioeconômicas para as populações ribeirinhas locais, ocasionando destruturação da economia tradicional, representada pela produção agrícola e pesca. Estas consequências para os ribeirinhos se apresentam na diminuição das suas áreas agricultáveis, na restrição do lazer e na ocorrência de problemas para o acesso ao seu leito, por criar dificuldades à navegação, em razão do consequente assoreamento da calha do rio (HOLANDA et al., 2001; HOLANDA et al., 2005).

O impacto da erosão fluvial no Baixo São Francisco é resultado do desnudamento excessivo da terra (principalmente na região de clima semiárido em que os solos expostos apresentam um alto grau de desagregação) associado à regularização da vazão do rio pelas barragens, as quais controlam as enchentes. Estas eram responsáveis pelo transporte do material acumulado em seu leito. Como consequência dessa erosão, sedimentos grossos que o rio não tem capacidade de transportar são depositados na calha do rio formando bancos de areia no baixo curso do São Francisco (MMA, 2006).

De acordo com Casado et al. (2002) e Holanda et al. (2008), a regularização da vazão do Rio São Francisco, à jusante da cascata de hidrelétricas, e a ocupação das áreas ribeirinhas de forma desordenada, têm levado a uma exposição do talude marginal, dominado por solos arenosos de baixa coesão, contribuindo para alterações na dinâmica do rio. O fluxo de água em contato com o talude marginal e o embate de ondas na sua base leva ao solapamento, desencadeando movimentos de massa de solo na forma de grandes blocos, ocasionando a verticalização das margens.

Para Holanda et al. (2001), as causas do assoreamento e erosão marginal do Baixo São Francisco Sergipano não foram diferentes do restante da região hidrográfica. Para os autores, os impactos causados pela ação antrópica, principalmente o desmatamento e a mudança do regime fluvial, mediante a exploração do potencial energético pela Companhia Hidrelétrica do

São Francisco (CHESF), foram responsáveis pela degradação do solo, visto que, sem a proteção das matas ciliares, as margens dos rios tornaram-se mais vulneráveis ao assoreamento e à erosão da margem direita do Rio São Francisco. Segundo Codevasf (2000), a margem direita do Baixo São Francisco vem sofrendo desgaste superficial devido à ocorrência de processos erosivos, o que vem ameaçando as estruturas da engenharia de proteção contra as cheias nos perímetros irrigados.

Uma das medidas que poderiam ser utilizadas para a remoção do material assoreado na calha do rio seria a produção de grandes vazões semelhantes ao das cheias naturais. Entretanto, após algum tempo destas cheias artificiais, os bancos de areais voltarão a se formar devido ao início de uma nova erosão marginal (MMA, 2006). Diante disto, é preciso controlar a erosão dos taludes, sendo necessário, portanto, o teste de soluções técnicas que sejam eficientes e economicamente viáveis.

2.4 Bioengenharia de solo na estabilização de taludes

A técnica de bioengenharia de solo consiste no uso de materiais vegetais vivos ou inertes, em combinação com materiais de suporte natural ou sintético, como rochas, madeiras, concretos, polímeros e mantas confeccionadas com fibras vegetais, que são chamadas de geotêxteis ou biomantas (GRAY & SOTIR, 1996; LEWIS, 2000).

De acordo com Lewis (2000), há muito tempo o homem percebeu o potencial da vegetação no controle da erosão superficial, sendo excelente ferramenta na estabilização de áreas instáveis. Arbustos e gramíneas, por exemplo, ajudam na contenção de taludes, atuando como cobertura contra o vento e água da chuva. Segundo o autor, para elaboração de um projeto de bioengenharia de solos alguns fatores básicos devem ser considerados, são eles: condições climáticas; topografia; tipo de solo; água; vegetação; e processos de erosão.

Atuando como principal agente da bioengenharia de solos, a vegetação apresenta alguns efeitos positivos sobre os taludes, tais como a redução no transporte de sedimentos, o aumento da taxa de infiltração do solo e o controle da erosão marginal (PEREIRA, 2008). Para o efeito da estabilização do solo ser positivo, devem-se conhecer as características técnicas da vegetação para o melhor aproveitamento e desenvolvimento no local da estabilização do solo e no controle do processo erosivo (SUTILI, 2007).

Em taludes, as técnicas de bioengenharia de solo podem ser aplicadas para reduzir e controlar a erosão marginal, como também restringir o movimento de massa do solo, podendo ainda ser executadas separadamente ou associadas às técnicas de engenharia tradicional (ARAÚJO-FILHO et al., 2013). Estes autores afirmaram que a combinação das técnicas de bioengenharia com a engenharia tradicional, utilizadas na margem sergipana do São Francisco, possibilitou maior proteção à base do talude e desenvolvimento da vegetação.

Para Jones & Hanna (2004), o solo estabilizado e os materiais vivos utilizados permitem o desenvolvimento da cobertura vegetal iniciando o processo de sucessão ecológica natural, facilitado pela degradação dos materiais bio e fotodegradáveis utilizados na bioengenharia. Esta recomposição da vegetação ciliar é uma forma bastante indicada para a conservação de taludes e de grande importância para evitar o surgimento de voçorocas e seus desmoronamentos, soterramento de estradas, entupimento de suas calhas com solo e assoreamento de rios.

Tratando-se de taludes, as espécies dessa recomposição vegetal devem apresentar algumas características importantes para o desenvolvimento na área, como: tolerância à seca; sistema radicular profundo; crescimento vigoroso; disponibilidade de sementes; facilidade na propagação; sobrevivência em condições de baixa fertilidade; e eficácia na cobertura do solo. Em muitos casos, uma só espécie não apresenta todas as características desejáveis, então é necessário optar por aquelas que tenham o maior número de características favoráveis (PEREIRA, 2008).

2.5 Uso do capim-vetiver na estabilização de taludes marginais

O capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L. Roberty) é uma das poaceas originária da Ásia Tropical (Índia, Ceilão e Malásia) que foi promovida pelo Banco Mundial em 1980 para a conservação de solos em práticas de controle de erosão, estabilização de taludes e remediação de áreas salinizadas (ADAMS et al., 2003; MICKOVSKI & VAN BEEK, 2009). É uma planta perene, herbácea, ereta, que atinge uma altura entre 1,5 e 2,0 m, com caule rizomatoso e cilíndrico (Figura 2). Apresenta folhas alternas, dísticas, relativamente rígidas, compridas (até 75 cm), finas (menos de 8 mm) e lisas (VELDKAMP, 1999; SOUZA & LORENZI, 2005). O sistema radicular é composto por raízes aromáticas, é altamente ramificado e pode apresentar comprimento de até 3 metros, o que acarreta em uma forte ancoragem da planta ao solo (HELLIN & HAIGH, 2002; KE et al., 2003).



FIGURA 2. Planta do capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides*).
Fonte: Autoria própria.

A espécie *Chrysopogon zizanioides* destaca-se pela sua alta adaptabilidade às diversas condições ambientais. Possui tolerância aos vários tipos de solos, aos diferentes níveis de pH, à grande concentração de alumínio, à presença de metais pesados e à alta salinidade, além de resistirem a uma ampla faixa de temperatura (-10 a + 48° C), às condições de alagamento e ao estresse hídrico (DALTON et al. 1996; TRUONG & CLARIDGE, 1996; TRUONG & LOCH, 2004; PEREIRA, 2006). Por meio de testes de DNA, tem-se comprovado que as cultivares do vetiver, distribuídas em mais de 120 países tropicais e subtropicais, em sua maioria, são estéreis (PEREIRA, 2006).

Gramíneas como o capim-vetiver têm sido utilizadas no controle de processos erosivos e na estabilização de taludes, promovendo uma redução de 50% e 70% do escoamento superficial e da erosão do solo, respectivamente (MICKOVSKI et al, 2005; PHIEN & TAM, 2007; MICKOVSKI & VAN BEEK, 2009). A cobertura do solo com gramíneas fornece uma proteção eficaz contra a erosão da superfície ao reduzir o impacto das chuvas sobre o solo descoberto, como também ao aumentar a percolação de água, a coesão do solo e a resistência dos taludes, promovidos pelas raízes (DAVIDE et al., 2000; BURYLO et al., 2009).

A tecnologia vetiver chegou ao Brasil em 1996, por intermédio dos Centros Integrados de Educação Rural (CIERs), com a implantação de pequenos viveiros para a multiplicação das plantas, no estado do Espírito Santo. Em 1999, na região de Camamu (Bahia) foram obtidas as primeiras mudas do vetiver, assim como em outros estados do Brasil. Foi publicada em 1998 uma cartilha com apoio da Rede Mundial e Rede Latino-Americano do Capim

Vetiver denominada: "Capim Vetiver - A Barreira Vegetal Contra a Erosão: perguntas & respostas e próximos passos". Esta cartilha teve o intuito de informar sobre as vantagens e utilizações desta técnica alternativa. Porém, o uso do capim-vetiver no Brasil para estabilidade de encostas, controle de erosão e recuperação de áreas degradadas ainda é restrito em virtude da deficiência de conhecimento das técnicas de utilização (LOPES, 2005).

Para Hengchaovanich (1998), a atenuação dos processos erosivos advinda da *Chrysopogon zizanioides* pode ser justificada pelo seu rápido crescimento, por sua força e poder de penetração e pela sua capacidade de se estabelecer rapidamente em solo de difíceis condições. Aliado a estes fatores, Truong & Hengchaovanich (1997) afirmam que as características morfológicas desta gramínea, tais como talos eretos e duros (capazes de resistirem a intensos fluxos de água), além de densas raízes que atingem grande profundidade e grandes touceiras formadas pela mesma, fazem do capim-vetiver um forte candidato para a estabilização de taludes.

Segundo Pereira (2008), a morfologia do sistema radicular da *Chrysopogon zizanioides* pode auxiliar na estabilização de encostas e taludes, funcionando como um grampeador natural. Cazzuffi et al. (2006) relatam que as raízes desta gramínea são capazes de crescer até dois metros nos primeiros dois anos de plantio. Ao analisarem a resistência à tração das raízes do capim-vetiver, Truong & Hengchaovanich (1997) encontraram uma resistência média de 75 MPa, variando entre 40 a 180 MPa, para diâmetros entre 0,2 e 2,2 mm. Esta alta resistência média (equivalente a aproximadamente à 1/6 do aço doce) é referente aos diâmetros de raízes de 0,7 a 0,8 mm, sendo estes os mais comuns para as raízes do capim-vetiver.

Devido à facilidade de se estender profundamente no solo, promovendo uma ancoragem necessária para prevenir deslizamentos superficiais, a gramínea vetiver tem sido estudada por alguns pesquisadores quanto a sua resistência ao cisalhamento gerada pela interação solo-raiz. Estudos realizados por Mickovski et al. (2005), Cazzuffi et al. (2006) e Truong & Loch (2004) comprovaram a eficiência do capim-vetiver no aumento da resistência ao cisalhamento do solo.

Truong (1999) comprovou a redução do escoamento superficial do excedente de água de 23,3 para 15,5%, como também a diminuição da perda de solo de 14,4 para 3,9 t ha⁻¹, ao utilizar a *Chrysopogon zizanioides* plantada em curva de nível em uma encosta. Já Babalola et al. (2003) encontraram uma redução em 70% do escoamento superficial em experimento na Nigéria, assim como uma redução em 56% do escoamento superficial e em 92% na perda de solo em estudo no Quênia. Em experimento na Índia, usando o capim-vetiver como barreira

vegetativa, Sudhishri et al. (2008) conseguiram controlar o processo erosivo e observaram um decréscimo de aproximadamente 68% no escoamento superficial, devido ao aumento da infiltração, além de uma redução de 71% na perda de solo.

Por possuir muitas características favoráveis ao controle da erosão de taludes e de encostas, a *Chrysopogon zizanioides* vem sendo selecionada e estudada por diversos pesquisadores. No entanto, mais estudos são necessários a fim de compreender a dinâmica do seu sistema radicular e avaliar o seu potencial como estabilizador de taludes marginais no Nordeste do Brasil.

2.6 Resistência à tração das raízes do vetiver e resistência ao cisalhamento do solo

A resistência à tração é uma das características mecânicas mais importantes das raízes. Gray & Sotir (1996) afirmam que as fibras das raízes aumentam a resistência ao cisalhamento do solo pela transferência das tensões cisalhantes, que se desenvolvem na matriz do solo, para as fibras, por meio do atrito na interface ao longo da extensão das fibras que estão fixas. Quando o cisalhamento ocorre, a fibra é deformada causando um alongamento e mobilizando a resistência da mesma. Este efeito combinado de solo e raízes foi denominado de reforço do solo por De Baets et al. (2008).

A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que um solo pode resistir antes da ruptura, ou como a tensão de cisalhamento do solo no plano em que estiver ocorrendo à ruptura (LAMBE & WHITMAN, 1951). De acordo com Fiori & Carmignani (2009), para avaliar a contribuição das raízes na resistência ao cisalhamento do solo é necessário considerar a interação solo-raiz. Nesse tipo de sistema, as raízes podem ser tratadas como elementos flexíveis e elásticos, que, ancorados no solo, levam a um aumento da resistência contra eventuais escorregamentos em taludes.

O reforço pelas raízes pode ser significativo no aumento da resistência do solo, mesmo se a densidade das raízes for baixa e em condições de baixa resistência do solo (TENGBETH, 1989; WALDRON, 1997). Contudo, para Fiori & Carmignani (2009), o incremento da coesão é proporcional ao aumento da densidade das raízes, ou seja, o maior reforço das raízes encontra-se próximo à superfície do solo, onde a densidade das raízes geralmente é mais elevada e o solo, por outro lado, é relativamente mais fraco.

Coelho & Pereira (2006) consideram que o aumento da resistência ao cisalhamento do solo está vinculado diretamente à transferência das tensões de cisalhamento para a resistência das raízes à tração, com consequente redução da erodibilidade e aumento da estabilidade do solo. Segundo os autores, esse reforçamento radicular pode variar de acordo com alguns fatores, tais como: valores de resistência à tração das raízes; propriedades da interface entre as raízes e o solo; concentração, características de ramificação e distribuição das raízes no solo; espaçamento, diâmetro e massa de solo explorada pelas raízes; espessura e declividade do perfil do solo do talude; e parâmetros geotécnicos relativos à resistência ao cisalhamento do solo. Já estes fatores podem ser influenciados pela espécie da planta, pelas variações ambientais nas condições de crescimento e pela época do ano.

O efeito de reforço promovido pelas raízes, relacionado com a estabilidade de taludes, pode ser avaliado em termos de resistência ao cisalhamento. Para estimar o incremento na força de cisalhamento do solo, proporcionado pelas raízes, foi desenvolvido um modelo que utiliza dados de resistência da raiz à tração e de distribuição de raízes (WU et al., 1979; DE BAETS et al., 2008).

Barker (1994) afirma que as raízes fasciculadas apresentam alta resistência à tração e ao arrancamento, pois ocupam uma grande superfície, como também oferecem um aumento da resistência ao cisalhamento do solo. Além disto, a elevada concentração de fibras radiculares de diâmetro pequeno é mais efetiva do que poucas raízes de diâmetro maior para o aumento da resistência ao cisalhamento do solo (PEREIRA, 2008).

Por sua vez, o capim-vetiver apresenta raízes fasciculadas, que podem chegar a três metros de profundidade exercendo um papel de atirantamento do solo, com consequente aumento da resistência ao cisalhamento do solo (TRUONG et al., 2008). Hengchaovanich & Nilaweera (1996) constataram que a resistência ao cisalhamento do solo cultivado com capim-vetiver, com dois anos de plantio, aumentou em até 90%, em relação ao solo sem cultivo, em ensaio de cisalhamento direto de uma amostra indeformada de solo, sendo que este incremento de resistência diminui com a profundidade do solo.

Ao avaliar a resistência à tração de raízes de vetiver na faixa de diâmetro de 0,2 a 2,2 mm, Hengchaovanich & Nilaweera (1996) observaram que a resistência à tração das raízes do *Chrysopogon zizanioides* aumenta com a redução do diâmetro da raiz, o que implica que raízes mais finas oferecem maior resistência do que as mais grossas. Estes autores encontraram valores de resistência à tração de raízes do vetiver entre 40 – 180 MPa na faixa de diâmetro de raiz entre 0,2 – 2,2 mm. Para isto, o ensaio foi realizado prendendo a ponta de uma extremidade da raiz a um aparelho que continha uma mola calibrada, enquanto a outra

extremidade era presa a um suporte que era puxado manualmente até a ruptura da raiz. A força de tração aplicada era determinada a partir da mola.

Resultado semelhante ao de Hengchaovanich & Nilaweera (1996) sobre a força das raízes do capim-vetiver foi encontrado por Cheng et al. (2003). Os autores apresentaram um valor médio de resistência à tração de cerca de 85 MPa para o vetiver. Cheng et al. (2003) também avaliaram a resistência à tração de outras gramíneas, contudo a *Chrysopogon zizanioides* foi a que obteve maior resistência à tração.

Entretanto, é importante ressaltar que variações de resistência à tração das raízes do capim-vetiver podem ocorrer. Para De Baets et al. (2008), alguns fatores podem ser responsáveis por essa variabilidade na resistência à tração das raízes, como variações na idade da raiz, taxa de crescimento, direção pela variação do conteúdo de umidade do solo, textura e estado do solo.

O efeito das raízes na melhoria da estabilidade de taludes já vem sendo reconhecido em estudos há alguns anos (GRAY & LEISER, 1982; GRAY & SOTIR, 1996; DE BAETS et al., 2008). Entretanto, ainda são precárias referências na literatura acerca das propriedades do sistema radicular das plantas, em especial as do capim-vetiver, sendo necessários estudos para melhorar a compreensão do efeito reforço das raízes ao solo, a fim de viabilizar a sua adequação para a estabilização de taludes fluviais.

2.7 Resistência do solo à penetração e uso do capim-vetiver

A resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas que influenciam diretamente no crescimento das raízes e da parte aérea das plantas. Diversos autores utilizaram a resistência do solo à penetração para a avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular (BENGHOUGH & MULLINS, 1990; TORMENA & ROLOFF, 1996).

Dentre as qualidades físicas do solo, a resistência do solo à penetração é considerada a propriedade mais adequada para determinar o grau de compactação. Trata-se da resistência encontrada pelas raízes para penetrar ao solo. A resistência do solo à penetração está diretamente correlacionada com a textura, a densidade, a matéria orgânica e, principalmente, a umidade no momento da determinação (STOLF et al., 1983; BUSSCHER et al., 1997; PEDROTTI et al., 2001).

Assim, a resistência do solo à penetração consiste em uma das avaliações que podem ser feitas para identificar camadas de impedimento ao crescimento radicular (MANTOVANI, 1987), além de inferir sobre o potencial de infiltração de água no solo. De acordo com USDA (1993), a resistência do solo à penetração pode ser classificada, quanto à restrição ao crescimento radicular, em três classes: pequena (menor que 100 kPa), intermediária (entre 100 e 2000 kPa) e grande (maior que 2000 kPa).

Uma elevada resistência do solo à penetração pode ser uma barreira ao desenvolvimento radicular, causando diminuição na umidade do solo (TORRES et al. 2012) e prejudicando o desenvolvimento radicular para diferentes diâmetros das raízes (BÈCEL et al. 2012).

Em geral, os solos compactados possuem baixa capacidade de infiltração, o que acarreta o maior escoamento superficial e, conseqüentemente, maior erosão (BERTOL et al., 2001). Para Souza & Alves (2003), o grau de compactação e a descontinuidade dos poros são responsáveis pela redução da permeabilidade do solo à água, sendo que as diferentes formas de uso e manejo do solo promovem alterações no movimento da água no solo e na resistência do solo à penetração. Ainda segundo estes autores, as áreas com adequadas práticas de manejo apresentam menor resistência do solo à penetração e maior capacidade de infiltração e condutividade hidráulica.

Reinert et al. (2006) afirmam que a compactação do solo compromete o desenvolvimento da vegetação, pois promove alterações físicas no solo, de modo a afetar a adsorção, trocas gasosas e absorção de nutrientes pelas raízes, dificultando a infiltração da água no solo, e tornando-o suscetível a erosão.

O uso da *Chrysopogon zizanioides* na revegetação de solos degradados promove melhoria nas propriedades físicas do solo e oferece suporte mecânico ao solo. Ao analisarem a resistência à penetração do solo em taludes revegetado com vetiver, Cobra et al. (2012) constataram que o tempo de permanência da gramínea vetiver na área influenciou positivamente na diminuição da resistência do solo à penetração.

Apesar da importância da mensuração da resistência à penetração na avaliação do grau de impedimento ao crescimento radicular, como também no conhecimento do potencial de infiltração de água de um solo de talude revegetado com capim-vetiver, poucos estudos foram realizados. Com isto, surge a necessidade de novos estudos que possam esclarecer a dinâmica da resistência à penetração do solo com o uso da *Chrysopogon zizanioides* em taludes.

3. ARTIGO 1

Contribuição do sistema radicular do capim-vetiver para melhoria da resistência ao cisalhamento do solo da margem direita do Rio São Francisco

Resumo

O controle da erosão marginal do Rio São Francisco requer estratégias eficientes e economicamente viáveis. A técnica de bioengenharia de solos pode ser uma alternativa, visto que proporciona maior estabilização do solo pelo efeito do reforço mecânico promovido pelas raízes das plantas. Esse estudo teve como objetivo avaliar a contribuição do sistema radicular do capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty), quanto à resistência ao cisalhamento do solo para controle da erosão em taludes da margem direita do Rio São Francisco. Mudanças do capim-vetiver foram plantadas no talude na margem direita do Baixo São Francisco no estado de Sergipe, com amostragem das plantas realizada após dois anos do plantio, a fim de avaliar o efeito da gramínea no aumento da resistência ao cisalhamento do solo. Foram utilizadas a metodologia do monólito e o método do cilindro para coleta de raiz, visando à avaliação da Densidade Radicular (DR), Densidade do Comprimento Radicular (DCR), Razão de Raiz por Área (RAR), Resistência de Raízes à Ruptura (TR) e Coesão da Raiz (CR). Os dados foram submetidos à análise de variância ($p < 0,05$), com análise de regressão polinomial. Os resultados mostram que para DR, DCR e RAR, na camada de 0-0,10 m apresentaram valores mais altos de $4,84 \text{ kg m}^{-3}$, $12,45 \text{ km m}^{-3}$, 1,66%, respectivamente. O TR médio foi de 83 MPa e o CR de 528 kPa. O vetiver favorece o aumento da resistência ao cisalhamento do solo, auxiliando na estabilização de taludes.

Palavras-chave: *Chrysopogon zizanioides*; densidade de raízes; reforço do solo; erosão marginal

Abstract

The control of bank erosion of the São Francisco River requires efficient and economically viable strategies. A soil bioengineering technique may be an alternative, as it provides greater soil stabilization by the strengthening effect caused by the roots of the plant component. Therefore, this study aimed to evaluate the characteristics of the root system of vetiver grass in relation to the ability to restructuring physical soil mechanics and its contribution to the process of stabilization of the erosion of banks. For this, the vetiver grass seedlings were planted in the slope of the right bank of the Lower São Francisco, having your sample taken after two years of planting in order to evaluate the effect of soil shear strength on the grassy. Monolith methodology proposed by Böhm (1979) and the cylinder method was used, and evaluated the Root Density (RL), Root Length Density (RLD), Root Area Ratio (RAR), Root Tensile Strength (TR) and Root Cohesion (CR). The results were subjected to analysis of variance ($p < 0,05$) using the SISVAR and then was held the polynomial regression analysis. The results show that for RL, RLD and RAR the layer of 0-0.10 m showed higher the results which yielded 4.84 kg m^{-3} , 12.45 km m^{-3} , 1.66%, respectively. While the average result of TR was 83 MPa and CR 528 kPa. The veviter can encourage increased shear strength of the soil, aiding in the stabilization of slopes.

Key words: *Chrysopogon zizanioides*; rood density; soil reinforcement; bank erosion

Introdução

O Rio São Francisco vem sofrendo alterações no seu regime hídrico ocasionadas pela construção de barragens hidrelétricas. Essas alterações têm causado uma avançada erosão marginal do Baixo São Francisco, se iniciando com o solapamento da base do talude, desencadeado pelo baixo nível d'água e associado ao desmatamento da vegetação ciliar (HOLANDA et al., 2008).

O assoreamento da calha do rio, resultante do processo erosivo, potencializado ou não pela retirada da mata ciliar, tem causado danos econômicos, sociais e ambientais à região e à população ribeirinha, sendo necessária a revegetação dos taludes com espécies que suportem a ação do fluxo e refluxo das ondas, reduzindo os movimentos de massa de solo em direção à calha do rio (HOLANDA et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2009).

São diversas as ações de controle do processo erosivo seja em solos agrícolas (SPERANDIO et al., 2012) ou para a estabilização dos taludes marginais, contudo, de acordo com Holanda et al. (2007), algumas técnicas possuem custos elevados sendo inviável sua aplicação em toda a área. Suleiman et al. (2013) afirmam que o uso da vegetação na estabilização de taludes tem se tornado cada vez mais importante, principalmente pela relação custo-benefício, consistindo em uma técnica de baixo custo, eficaz do ponto de vista técnico e ambientalmente sustentável, em comparação com os métodos convencionais. Nesse contexto, a bioengenharia de solos pode ser uma alternativa viável de controle da erosão marginal, por meio do uso de materiais vivos ou inertes de natureza vegetal, como geotêxteis, associado ou não a rochas, concreto ou metais, se apresentando ambientalmente sustentável para contenção de taludes em diversas condições de declividade.

Jones & Hanna (2004) afirmam que a bioengenharia de solos é capaz de estabilizar o solo e permitir que os materiais vivos desenvolvam uma cobertura vegetal iniciando o processo de sucessão ecológica. A planta é considerada um dos componentes mais importantes na implantação dessas biotécnicas. De acordo com Gray & Sortir (1996), as raízes e os caules atuam como estrutura principal e são elementos mecânicos no sistema de proteção de taludes. Na margem direita do Rio São Francisco, tem sido utilizado o capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) como componente estrutural das técnicas de bioengenharia de solos, como reforço radicular na estabilização dos taludes (HOLANDA et al., 2012).

O capim-vetiver é uma gramínea perene, de crescimento cespitoso, apresentando 1,5 a 2 m de altura, com sistema radicular extremamente fasciculado e profundo, originária do Sul da Índia. Possui raízes densas, resistentes e profundas, capazes de formar um grampeamento

natural estabilizante de taludes (CHONG & CHU, 2007). Devido ao potencial agregante de seu sistema radicular, o capim-vetiver tem sido largamente utilizado na contenção de erosão, proporcionando um reforço físico-mecânico ao solo e aumentando a resistência ao cisalhamento devido à interação solo-raiz, prevenindo assim, deslizamentos superficiais (GOLDSMITH, 2006).

O efeito das raízes na melhoria da estabilidade de taludes já vem sendo reconhecido em estudos há alguns anos (CAZZUFFI et al., 2006). Entretanto, ainda são precárias referências na literatura acerca das propriedades do sistema radicular das plantas, em especial as do capim-vetiver, sendo necessários estudos para melhorar a compreensão do efeito da ancoragem das raízes ao solo, a fim de viabilizar a sua adequação para a estabilização de taludes fluviais. Gyssels et al. (2005) afirmam que algumas propriedades do solo, como a taxa de infiltração, o teor de umidade, o teor de matéria orgânica, a estabilidade de agregados e a tensão de cisalhamento podem ser influenciadas pelas raízes, possibilitando o controle da erosão do solo. O efeito de reforço promovido pelas raízes, relacionado com a estabilidade de taludes, pode ser avaliado em termos de resistência ao cisalhamento. Para estimar o incremento na tensão de cisalhamento do solo, proporcionado pelas raízes, são utilizados modelos que utilizam dados de resistência à tração e distribuição de raízes (WU et al., 1979; DE BAETS et al., 2008).

Esse estudo teve como objetivo avaliar a contribuição do sistema radicular do capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty), quanto à resistência ao cisalhamento do solo para controle da erosão em taludes da margem direita do Rio São Francisco.

Materiais e métodos

Área de estudo

A área experimental está localizada no talude da margem direita do Rio São Francisco (coordenadas UTM N= 8.868.789,506 e E= 736.583,864), no município de Amparo de São Francisco, no estado de Sergipe, em solo classificado como Neossolo Flúvico (HOLANDA, 2008). Mudas de capim-vetiver, provenientes do viveiro do Campus da Universidade Federal de Sergipe (UFS), foram plantadas em covas adubadas com 8g de superfosfato simples planta⁻¹, utilizando o sistema de cordões em contorno perpendiculares ao declive do talude, com espaçamento de 0,9 m entre linhas e 0,3 m entre plantas na linha.

A amostragem do capim-vetiver foi realizada em agosto de 2013, dois anos após o plantio, para avaliar o efeito dessa gramínea quanto à contribuição para resistência ao

cisalhamento do solo. Considerou-se importante testar plantas adultas a fim de analisar o potencial desses indivíduos na estabilização do talude, em médio e longo prazo, após sua implantação.

Método do Monólito

Foi utilizada a metodologia do monólito para a coleta de raízes de acordo com BÖHM (1979). O sistema radicular de cinco indivíduos do capim-vetiver foi amostrado, em profundidade, por meio de monólitos com dimensões de 0,50 m de largura, 0,50 m de comprimento e 0,50 m de altura, totalizando 0,125 m³ em cada monólito, em diferentes profundidades (Figura 1). Antes de iniciar a remoção dos monólitos do solo foi necessário nivelar a superfície e as paredes do bloco. Utilizou-se uma pá reta e um facão afiado para auxiliar o corte, e assim obter as porções de solo juntamente com as raízes (Figura 1), na parte inferior de cada monólito. As amostragens foram realizadas nas camadas de 0 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,30; 0,30 – 0,40 e 0,40 – 0,50 m, de cada indivíduo do capim-vetiver. Em seguida, cada monólito foi acondicionado em saco plástico devidamente identificado, assim como os materiais da parte aérea das cinco plantas amostradas.



FIGURA 1. Monólito utilizado para coleta de raízes do capim-vetiver, com detalhe do corte realizado por camada.

Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, as raízes foram separadas do solo por uma lavagem com jato d'água, utilizando peneiras com malha de 1,0 mm, a fim de minimizar as perdas de raízes no momento da lavagem (BÖHM, 1976). Após a lavagem, as raízes foram acondicionadas em sacos de papel e levadas para secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 65°C, por 72h. A biomassa aérea também foi levada para secagem em estufa à 65° C por 72h.

Em seguida, realizou-se a pesagem das raízes e da biomassa aérea em uma balança analítica, determinando-se a Matéria Seca das Raízes (MSR) e a Matéria Seca da Parte Aérea (MSPA). A partir da MSR, possibilitou-se o cálculo da Densidade Radicular (DR) por meio da Eq. (1), onde MR é a massa de raízes por classe de profundidade (kg) e V é volume de solo de cada classe (m^3). A DR visa quantificar a biomassa de raízes em cada profundidade do solo analisada.

$$DR = \frac{MR}{V} \quad (1)$$

Para determinar a presença das raízes no solo foi utilizado a DCR (Densidade do Comprimento Radicular), e para tal, necessitou-se obter a medição do comprimento total das raízes secas por camada de cada indivíduo. Esta medição das raízes foi realizada com o auxílio de uma régua graduada. O cálculo da DCR foi realizado pela Eq. (2), na qual o Cr é o comprimento total das raízes por classe de profundidade (km) e o V é o volume de solo da classe (m^3).

$$DCR = \frac{Cr}{V} \quad (2)$$

Com base na DCR de cada classe de profundidade, calculou-se a RAR (Razão de Raiz por Área), utilizando-se a Eq. (3), com o propósito de estimar a contribuição das raízes para o aumento da resistência do solo.

$$RAR = \frac{\frac{RL}{P} a_i}{A} \quad (3)$$

Cujo RL representa o comprimento total de raízes por classe de profundidade do solo (m); a_i é a área transversal média da raiz em corte de uma raiz representativa de um indivíduo (m^2); P é a classe de profundidade do solo utilizada (0,10 m); e A é a área de referência (m^2), determinada pela projeção vertical da biomassa aérea da planta (DE BAETS et al., 2008).

Método do cilindro

Um passo fundamental para avaliação do reforço da raiz é o teste de Resistência de Raízes à Ruptura (TR). Para isto, foram coletadas amostras de raízes inteiras do capim-vetiver

pelo método do cilindro. Os cilindros foram confeccionados em tubo de PVC, com dimensões de 0,50 m de altura e 0,30 m de diâmetro. Foram coletadas amostras indeformadas, contendo raízes e parte aérea, cravando-se os cilindros no perfil do solo, quando foram retirados 25 indivíduos do capim-vetiver. Em seguida, as porções de solo e raiz das amostras foram lavadas com jato d'água, utilizando peneiras com malha de 1,0 mm, a fim de minimizar as perdas de raízes no momento da lavagem (BÖHM, 1976).

Dentre as 25 plantas amostradas, 50 raízes foram selecionadas para realização dos testes de resistência de raízes à ruptura. Para seleção das raízes foram utilizados os seguintes critérios: raízes não danificadas, diâmetro constante, diâmetro inferior a 8 (oito) mm (diâmetro máximo na raiz que pode ser testado em laboratório) e comprimento mínimo de 0,10 m. As raízes foram armazenadas em álcool (etanol 15%) a uma temperatura de 4°C com o objetivo de conservá-las viáveis para análises por mais tempo (DE BAETS et al., 2008).

Os testes de TR foram conduzidos no Laboratório de Ecofisiologia da Universidade Federal de Sergipe (UFS), utilizando uma Prensa Universal. Este equipamento combina as funções de geração de força de tração; medição de carga e de deslocamento; e aquisição de dados. Para a realização dos testes, as raízes foram fixadas às engrenagens do equipamento com garras rosqueáveis. No sentido de contornar problemas na condução dos ensaios foram realizados ajustes nas garras do equipamento para melhor clipagem evitando a ruptura das raízes na posição de aperto. Testes em que as raízes romperam na posição de clipagem foram considerados inválidos.

A amostra foi então submetida à tração a uma velocidade constante de 10 mm.min⁻¹. A célula de carga do equipamento apresentou capacidade de medir forças de até 500 KN, sendo a força inicial de 1 KN. A força de resistência à tração foi medida e registrada em um computador ligado à máquina de teste. Foi utilizada a Equação (3) para o cálculo da tensão de ruptura de raízes (N mm⁻¹) (BISCETTI et al., 2003).

$$TR = \frac{Fmax}{\pi(\frac{D^2}{4})} \quad (3)$$

Em que *Fmax* é a força máxima necessária para romper a raiz (N) e *D* é o diâmetro médio da raiz próximo ao ponto de ruptura antes da aplicação da tração (mm). Para isso, antes do ensaio, o diâmetro da raiz foi medido em três pontos equidistantes, utilizando um paquímetro digital.

Efeito do reforço da raiz do vetiver

A determinação do reforço proporcionado pelas raízes de vetiver foi baseada nas previsões de um modelo de enraizamento perpendicular utilizando as médias dos parâmetros do sistema radicular a partir da superfície de cisalhamento e da resistência à tração da raiz (WALDRON, 1977; MICKOVSKI et al., 2008). Neste modelo, assumiu-se que todas as raízes que atravessam o plano de cisalhamento sofrem ruptura durante o processo de corte. A magnitude do reforço devido à presença de raízes no solo foi determinada segundo a orientação de (GRAY; SOTIR, 1996) por:

$$CR = 1,2 \times TR \times RAR \quad (5)$$

Onde CR ($N\ m^{-2}$) é a Coesão da Raiz ou o aumento da resistência ao cisalhamento devido à presença de raízes no solo; TR ($N\ m^{-2}$) é a Resistência de Raízes a Tração média do número médio de raízes com um diâmetro médio por unidade de área de solo; e RAR ($m^{-2}\ m^{-2}$) é a Razão de Raiz por Área (a razão entre a área da seção transversal total da raiz e da área de corte total). Foram calculados a CR dos indivíduos coletados por meio do método do monólito de Böhm (1979), levando-se em consideração a TR média para os respectivos diâmetros médios de RAR, por classe de profundidade.

Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância para determinar a significância em nível de 5 % (Teste F). Em seguida, realizou-se a análise de regressão polinomial, ajustando modelos matemáticos e coeficientes de determinação (R^2) para cada variável estudada. Todas as análises foram elaboradas utilizando o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

Resultados e Discussão

Avaliando a matéria seca total dos cinco indivíduos de capim-vetiver, amostrados pelo método do monólito, verificou-se valores máximos de 2,08 kg e de 0,31 kg para a parte aérea e para as raízes, respectivamente. Em contrapartida, os valores mínimos encontrados foram de 0,41 kg para a parte aérea e de 0,21 kg para o sistema radicular (Figura 2). Para estes indivíduos, a relação média entre a parte aérea e o sistema radicular foi de 4:1. Este resultado indica que o capim-vetiver é capaz de produzir elevados valores de biomassa aérea e radicular como sugerido anteriormente por Manoel et al. (2013). A biomassa aérea contribui com a minimização da perda de solo por proporcionar uma maior proteção ao solo, resultante do

entouceiramento característico da espécie diminuindo o impacto direto da gota de chuva sobre o solo, enquanto que a biomassa radicular promove uma forte ancoragem ao solo auxiliando na prevenção de deslizamentos.

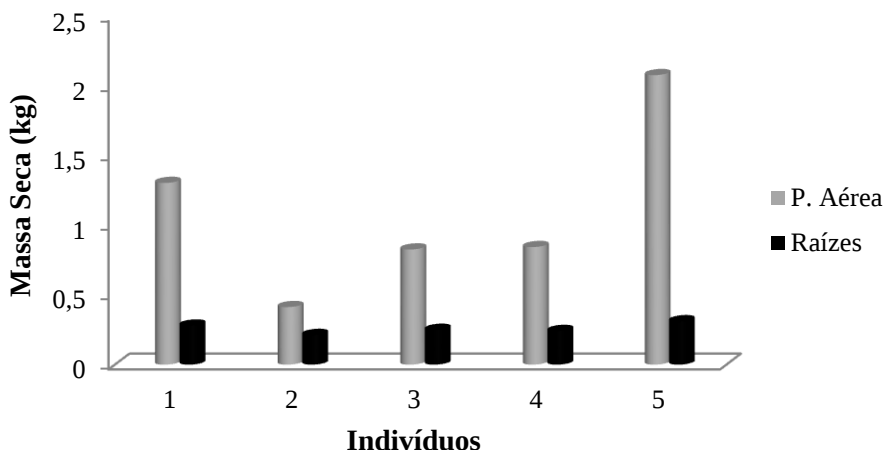


FIGURA 2. Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) e do Sistema Radicular (MSR) dos cinco indivíduos de capim-vetiver.

A distribuição das raízes em profundidade foi avaliada pelas variáveis Densidade Radicular (DR) e Densidade do Comprimento Radicular (DCR). A biomassa das raízes dos indivíduos analisados apresentou distribuição proporcional ao comprimento das raízes (Figura 3). O comportamento das densidades das raízes se mostrou inversamente proporcional à profundidade, apresentando uma forte correlação negativa. A DR apresentou melhor ajuste ao modelo cúbico ($p < 0,05$) com $R^2 = 0,9994$, enquanto que para a DCR, o modelo foi quadrático ($p < 0,01$) com $R^2 = 0,9892$ (Figura 3).

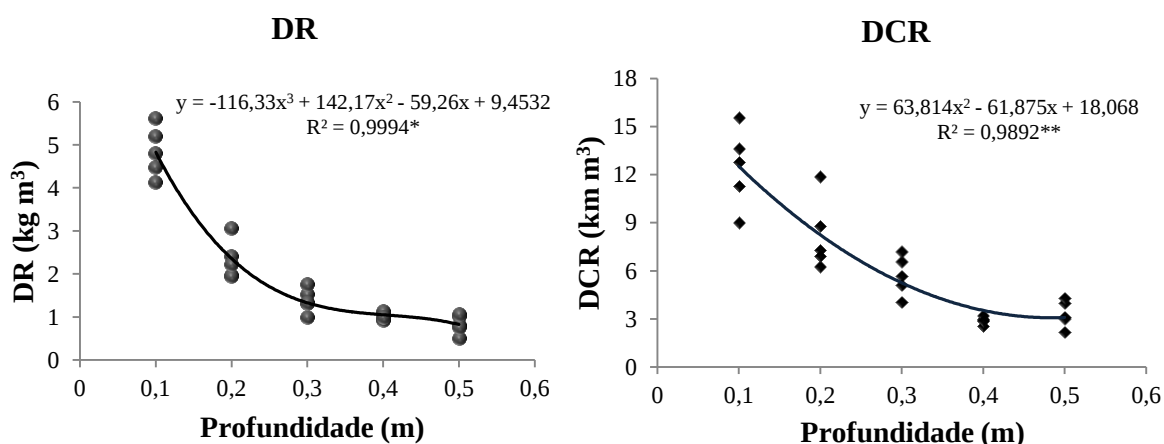


FIGURA 3. Densidade radicular (DR) e Densidade de Comprimento Radicular (DCR) com a profundidade do solo dos cinco indivíduos de capim-vetiver.

A maior parte da DR e da DCR se apresentou concentrada nos primeiros 0,20 m do solo, sendo a camada de 0 – 0,10 m a mais densa. Estes dados corroboram com os achados por De Baets et al. (2007) para todas as espécies analisadas. Para a camada de 0 – 0,10 m, os valores médios de DR e de DCR foram, respectivamente, $4,84 \text{ kg m}^{-3}$ e $12,45 \text{ km m}^{-3}$, no entanto a camada de 0,40 – 0,50 m, apresentou DR médio de $0,83 \text{ kg m}^{-3}$ e DCR médio de $3,32 \text{ km m}^{-3}$. Percebe-se que com o aumento da profundidade do solo houve diminuição da biomassa e do comprimento das raízes, o que pode ter sido motivado pela menor aeração e disponibilidade de nutrientes nas camadas mais profundas do solo, como também pelo surgimento, em profundidade, de camadas mais adensadas, o que teria dificultado a penetração e o desenvolvimento das raízes. Esse comportamento do solo pode ser creditado à variabilidade vertical e horizontal de camadas de solo de diferentes texturas e coesão, característica do Neossolo Flúvico.

Sabe-se que o sistema radicular do capim-vetiver atinge a profundidade até 4 m (CHONG & CHU, 2007), contudo percebeu-se nesse estudo que a densidade das raízes reduz, em média, 82,76% da camada 0 – 0,1 m para a camada 0,4 – 0,5 m. Isso sinaliza que o maior reforço promovido pelo sistema radicular ao solo ocorre nas camadas superficiais, onde a densidade de raízes é maior. Devido a isto, a resistência ao cisalhamento do solo em taludes, promovido pelas raízes, diminui nas profundidades maiores.

Entretanto, mesmo com esse declínio na densidade de raízes, os elevados valores encontrados de DR e de DCR, sobretudo para as camadas mais profundas, constatarem o maior enraizamento do capim-vetiver em profundidade quando comparada com outras gramíneas. No estudo conduzido por De Baets et al. (2007), as gramíneas amostradas apresentaram densidade de raízes somente até os primeiros 0,25 m abaixo do solo. Em virtude desse sistema radicular denso e profundo observado no capim-vetiver, esta gramínea tem se destacado pela sua capacidade de conservação do solo e de estabilização de taludes em vários estudos (DONJADEE & TINGSANCHALI, 2013).

Para melhor avaliação da contribuição da raiz na resistência do solo, em profundidade, utilizou-se a RAR. Este índice representa a área do solo que é ocupada pelas raízes, ou seja, a concentração das raízes no solo. A Figura 4 representa o comportamento da RAR para os cinco indivíduos amostrados de capim-vetiver a cada 0,10 m de profundidade do solo. O modelo de regressão melhor ajustado foi o quadrático ($p < 0,01$) apresentando correlação negativa forte ($R^2 = 0,9717$) da RAR com a profundidade do solo (Figura 4).

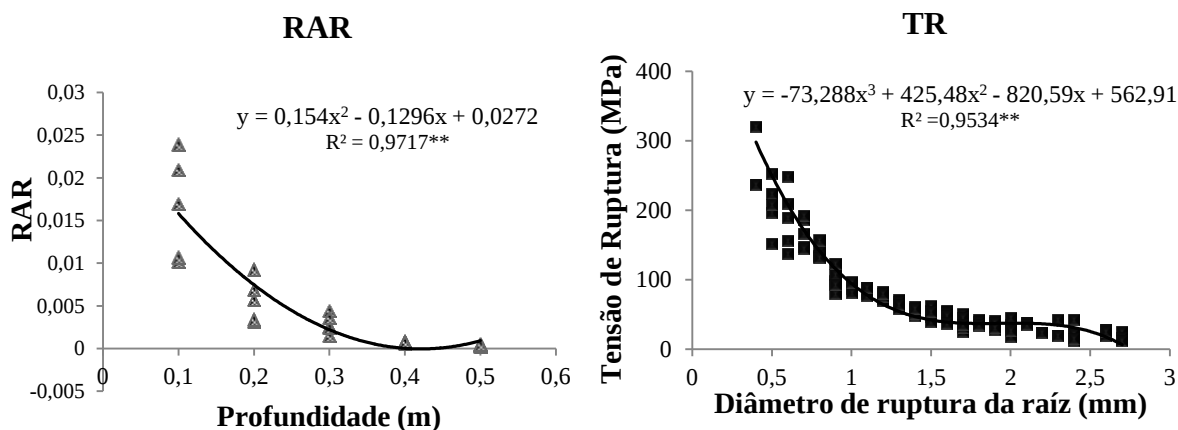


FIGURA 4. Razão de Raiz por Área (RAR) e Resistência de Raízes à Tração (TR) com a profundidade do solo de capim-vetiver.

O elevado percentual médio da RAR (1,66%) encontrado para a profundidade de 0 – 0,10 m, quando comparado a outras gramíneas, pode ser justificado pelo sistema radicular extremamente denso e fibroso do *Chrysopogon zizanioides*. Abernethy & Rutherford (2001) e Bischetti et al. (2005) afirmaram que a RAR pode atingir valores próximos de 1%. Esse percentual elevado de RAR encontrado para o capim-vetiver é mais uma característica que corrobora para o aumento da resistência do solo ao cisalhamento, visto que segundo Wu et al. (1979), a resistência ao cisalhamento cresce com o aumento da concentração de raízes presentes no solo.

Os valores médios de RAR para as camadas mais profundas do solo foram significativamente ($p < 0,01$) menores do que os mais próximos à superfície. Este fato pode ser justificado pela menor densidade de comprimento de raízes, como também pela menor área transversal média da raiz representativa, encontrada nas camadas mais profundas dos indivíduos de capim-vetiver avaliados. Apesar da RAR média de 0,04% para a profundidade 0,40 – 0,50 m ser bastante inferior ao da camada 0 – 0,10 m do solo, essa média encontra-se na mesma faixa de RAR obtida para todas as gramíneas avaliadas por De Baets et al. (2008), na profundidade de 0,40 – 0,50 m, sendo ainda superior a muitas delas. Essa diminuição da RAR nas camadas mais profundas confirma que o reforço promovido pelas raízes para resistência ao cisalhamento do solo diminui com a profundidade.

A Figura 4 apresenta também os resultados de TR, essencial para avaliar o aumento da resistência ao cisalhamento por meio do reforço oferecido pelas raízes ao solo. A análise de regressão mostrou que 95,34% da variação da resistência à tração das raízes podem ser atribuídos às alterações do diâmetro de ruptura da raiz ($p < 0,01$).

Assim como nos testes mecânicos de TR com capim-vetiver, realizados por Mickovski & Van Beek (2009), as raízes com diâmetros menores avaliadas no presente estudo tiveram maior resistência à ruptura do que as raízes mais grossas. Para romper raízes com diâmetro inferior a um milímetro (mm) foram utilizadas, em média, tensões maiores que 100 MPa. Por outro lado, raízes maiores que um mm romperam-se com menores tensões de tração (< 100 MPa), chegando a uma tensão média mínima de 16,4 MPa para raízes de 2,7 mm (Figura 4).

Outras pesquisas realizadas com diferentes espécies também verificaram que a resistência radicular é muito elevada para raízes finas, diminuindo significativamente com o aumento do diâmetro (BISCHETTI et al., 2005; TOSI, 2007). Para Genet et al (2005), a variação da resistência à tração com o aumento do diâmetro está diretamente ligada à estrutura da raiz, sendo as raízes mais finas detentoras de um alto conteúdo de celulose. Visto isto, as raízes de menores diâmetros são mais fortes e essenciais na contribuição para o aumento da resistência ao cisalhamento do solo.

A TR média de 83 MPa obtida durante os testes dos indivíduos de capim-vetiver mostrou-se muito próxima aos valores da resistência média descritas por Hengchaovanich & Nilaweera (1996) e Cheng et al. (2003), os quais encontraram 85 MPa para a mesma gramínea. No entanto, a variabilidade de TR pode ocorrer devido à idade da raiz, taxa de crescimento, orientação do crescimento pela variação do conteúdo de umidade do solo e textura do solo (DE BAETS et al., 2008).

Valores inferiores de TR foram encontrados por Mickovski & Van Beek (2009). Os autores apresentaram valores de TR de vetiver de 17 MPa a aproximadamente 2 MPa, com diâmetros de 0,3 mm a 1,4 mm, respectivamente. Estes baixos valores de tensão se mostram diferentes dos achados desse estudo, uma vez que a variável tensão oscilou, em média, de 353 MPa a 16 MPa, para raízes de 0,4 mm a 2,7 mm, respectivamente (Figura 4). Esta divergência pode ter sido influenciada pelo período de avaliação dos indivíduos de capim-vetiver que nos experimentos dos autores citados acima foi aos seis meses após o plantio, diferentemente da avaliação dos indivíduos desta pesquisa que foi aos dois anos após o plantio. Barbosa & Lima (2013) reportam que o aumento de tempo de plantio do capim-vetiver eleva os parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos.

A presença de raízes no solo tende a incrementar a coesão pelo aumento da resistência do solo, aumentando assim a estabilidade superficial dos taludes (Van BEEK et al., 2005). O aumento da resistência ao cisalhamento devido à presença de raízes no solo, também chamado de coesão da raiz (CR), foi calculado em função das classes de profundidade (Figura 5). A

relação entre a CR e a profundidade do solo é representada por um modelo polinomial de segundo grau ($p < 0,01$), com forte correlação negativa ($R^2 = 0,9738$).

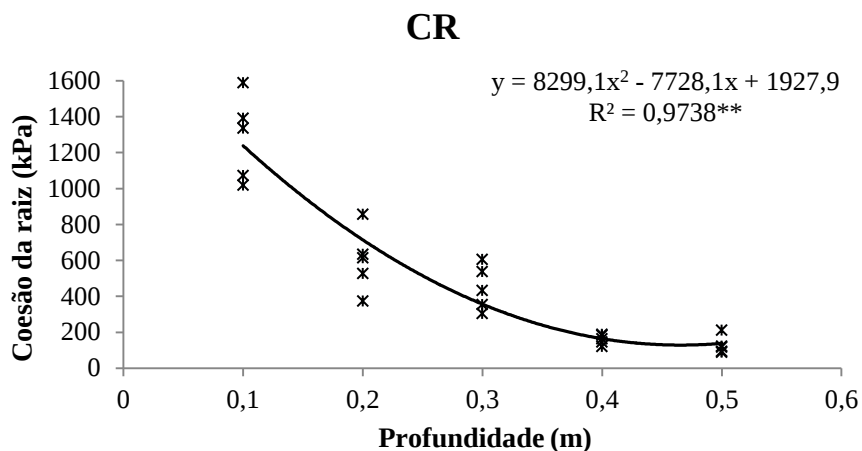


FIGURA 5. Coesão da Raiz (CR) por classe de profundidade do solo dos cinco indivíduos de capim-vetiver.

De acordo com a Figura 5, a relação entre a CR e a profundidade do solo é representada por um modelo polinomial de segundo grau ($p < 0,01$), com forte correlação negativa ($R^2 = 0,9738$). Assim como os demais índices analisados, a CR também diminui à medida que a profundidade aumenta. Esse comportamento é explicado pela diminuição da TR e da RAR nas camadas mais profundas, visto que a CR é diretamente proporcional a estas variáveis. Vale salientar que o resultado encontrado para a CR confirmou o fato de que quanto maior a densidade de raízes no solo, maior será o incremento do reforço do solo contra o cisalhamento.

A CR média encontrada para os primeiros 0,50 m de profundidade do solo no capim-vetiver foi de 528 kPa (Figura 5). Utilizando o mesmo método para cálculo da CR, De Baets et al. (2008) também encontraram a mesma tendência da CR com o aumento da profundidade do solo, porém o reforço máximo da raiz apresentado entre as espécies analisadas pelos autores foi de 304 kPa. Essa variabilidade pode ser justificada pelas diferentes características das espécies avaliadas nos dois estudos, tendo o capim-vetiver apresentado maiores valores de TR e de RAR.

O resultado apresentado na Figura 5 mostra que o capim-vetiver contribuiu com um aumento de CR ou resistência ao cisalhamento do solo do talude marginal estudado de 126 kPa (profundidade 0,40 – 0,50 m) até 1280 kPa (0 – 0,1 m). O reforço do solo promovido pela raiz é a maior evidência de que a vegetação melhora a estabilidade de taludes, por sua vez, a magnitude desse reforço como apresentado neste trabalho depende das características

morfológicas do sistema radicular, tais como: distribuição das raízes em profundidade, distribuição das raízes ao longo de diferentes classes de diâmetro de raízes e resistência da raiz a tração.

Conclusões

As raízes fasciculadas como as do capim-vetiver e com comprovada concentração de fibras radiculares de diâmetro pequeno ocupam uma grande superfície de contato, que promove uma alta resistência à tração e, conseqüentemente, oferecem um aumento da resistência ao cisalhamento do solo.

A Distribuição das Raízes (DR e DCR) apresenta maiores valores na superfície devido a maior densidade de raízes nestas camadas, características de espécies que apresentam raízes fasciculadas.

O elevado valor de Razão de Raiz por Área (RAR) encontrado para o capim-vetiver ratifica a importância da gramínea no aumento da resistência ao cisalhamento.

A maior Tensão de Ruptura (TR) das raízes contribui para o aumento da resistência do solo à erosão, com ênfase nas raízes mais finas, que apresentam valores mais expressivos.

A Coesão da Raiz (CR) aumenta a resistência ao cisalhamento nas camadas superficiais do solo em função da maior densidade radicular.

A utilização de gramíneas com raízes densas e fibrosas é uma alternativa para composição das técnicas de bioengenharia de solos para contenção e estabilização de taludes de margens de cursos d'água.

Referências bibliográficas

ABERNETHY, B.; RUTHERFURD, I. D. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 1, p. 63-79, 2001.

BARBOSA, M. C. R.; LIMA, H. M. Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 113-120, 2013.

BISCHETTI, G. B.; BONFANTI, F.; GREPPI, M. Misura della resitenza alla trazione delle radice: apparato sperimentale e metodologica d'analisi. **Quaderni di Idronomia Montana**, v. 21, p. 349-360, 2003.

BISCHETTI, G.; CHIARADIA, E.; SIMONATO, T.; SPEZIALI, B.; VITALI, B.; VULLO, P.; ZOCCO, A. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). **Plant and Soil**, Italy, n. 278, p. 11-22, 2005.

BÖHM, W. In situ estimation of root length at natural soil profiles. **Journal of Agricultural Science**, v. 87, p. 365-368, 1976.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Springer, Heidelberg, 1979. 188 p.

CAZZUFFI, D.; CORNEO, A.; CRIPPA, E. Slope stabilisation by perennial “gramineae” in Southern Italy: plant growth and temporal performance. **Geotechnical and Geological Engineering**, Italy, n. 24, p. 429-447, 2006.

CHENG, H.; XIAOJIE, Y.; AIPING, L.; HENG SHENG, F.; MING, W. A Study on the Performance and Mechanism of Soil-reinforcement by Herb Root System. In: THIRD INTERNATIONAL VETIVER CONFERENCE, 3. 2003, China. **Anais...**, China: The Vetiver Network, 2003, p. 397-402.

CHONG, C. W.; CHU, L. M. Growth of vetivergrass for cutslope landscaping: Effects of container size and watering rate. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 6, p. 135-141, 2007.

DE BAETS, S.; POESEN, J.; KANPEN, A.; BARBERA, G. G.; NAVARRO, J. A. Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff. **Plant Soil**, Belgium, n. 294, p. 169-183, 2007.

DE BAETS, S.; POESEN, J.; REUBENS, B.; WEMANS, K.; De BAERDEMAEKER, J.; MUYS, B. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. **Plant Soil**, Belgium, n. 305, p. 207-226, 2008.

DONJADEE, S.; TINGSANCHALI, T. Reduction of runoff and soil loss over steep slopes by using vetiver hedgerow systems. **Paddy and Water Environment**, v. 11, p. 572-581, 2013.

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

GENET, M.; STOKES, A.; SALIN, F.; MICKOVSKI, S. B.; FOURCAUD, T.; DUMAIL, J.; VAN BEEK, R. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. **Plant and Soil**, UK, n. 278, p. 1-9, 2005.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control**. New York, John Wiley & Sons, 1996. 378 p.

GOLDSMITH, W. Soil strength reinforcement by plants. In: **Proceedings of Annual Conference, International Erosion Control Association**, February, 2006, Long Beach, California, 2006.

GYSSSELS, G.; POESEN, J.; BOCHET, E.; Li, Y. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. **Progress in Physical Geography**, v. 29, n. 2, p. 189-217, 2005.

HENGCHAOVANICH, D.; NILAWEERA, N. An assessment of strength properties of vetiver grass roots in relation to slope stabilization. In: THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON VETIVER, 1., 1996. Bangkok. **Anais...**, Bangkok: The Vetiver Network, 1996. p. 87-94.

HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, I. G. da C.; SANTOS, C. M. dos S.; CASADO, A. P. B.; PEDROTTI, A. Riparian fragments affected by bank erosion in the Lower São Francisco River, Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 2, p. 148-152, 2005.

HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, C. M.; CASADO, A. P. B.; BANDEIRA, A. A.; OLIVEIRA, V. S.; FONTES, L. C. S.; ROCHA, I. R.; ARAÚJO-FILHO, R. N.; GÓIS, S. S.; VIEIRA, T. R. S. Análise multitemporal e caracterização dos processos erosivos no Baixo São Francisco sergipano. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 2, p. 87-96, 2007.

HOLANDA, F. S. R.; ROCHA, I. P.; OLIVEIRA, V. S. Estabilização de taludes marginais com técnicas de bioengenharia de solos no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 570-575, 2008.

HOLANDA, F. S. R.; ARAÚJO FILHO, R. N.; LIMA, J. C. B.; ROCHA, I. P. da. Comparison of different containers in the production of seedlings of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*). **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 3, p. 439-444, 2012.

JONES, K.; HANNA, E. Design and implementation of an ecological engineering approach to coastal restoration at Loyola Beach, Kleberg Country, Texas. **Ecological Engineering**, v. 22, p. 249-261, 2004.

MANOEL, D. S.; PINTO, L. V. A.; SOUZA, R. X.; OLIVEIRA NETO, O. F.; PEREIRA, M. W. M. Produção de biomassa da gramínea vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) em diferentes espaçamentos após 420 dias do plantio. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, Edição Especial n. 1, p. 31-34, 2013.

MICKOVSKI, S. B.; HALLETT, P. D.; BENGOUGH, A.; BRANSBY, M. F.; DAVIES, M. C. R.; SONNENBERG, R. The effect of willow roots on the shear strength of soil. **Advances in Geocology**, v. 39, p. 247-262, 2008.

MICKOVSKI, S. B.; VAN BEEK, L. P. H. Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate. **Plant Soil**, v. 324, p. 43-56, 2009.

OLIVEIRA, V. S. de; BARRETO JÚNIOR, E. R.; HOLANDA, F. S. R. Os efeitos naturais, econômicos e sociais da erosão na margem direita do rio São Francisco na sustentabilidade dos agroecossistemas. **Revista Agrogeoambiental**, v. 1, n. 3, p. 63-72, 2009.

SPERANDIO, H. V.; CECÍLIO, R. A.; CAMPANHARO, W. A.; CARO, C. F. D.; HOLLANDA, M. P. Avaliação da erosão hídrica pela alteração na superfície do solo em diferentes coberturas vegetais de uma sub-bacia hidrográfica no Município de Alegre, ES. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 4, p. 1411-1418, 2012.

SULEIMAN, M. K.; BHAT, N. R.; JACOB, S. *Vetiveria zizanioides* plantation for slope stabilization in Kuwait: A case study. **Journal of Agriculture and Biodiversity Research**, v. 2, n. 2, p. 44-54, 2013.

TOSI, M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in Northern Apennines (Italy). **Geomorphology**, v. 87, p. 268-283, 2007.

VAN BEEK, L. P. H.; WINT, J.; CAMMERAAT, L. H.; EDWARDS, J. P. Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes. **Plant and Soil**, UK, n. 278, p. 55-74, 2005.

WALDRON, L. J. Soil reinforcement by roots: calculation of increased shear resistance from root properties. **Soil Science**, v. 132, p. 427–435, 1977.

WU, T. H.; McKINNELL, W. P. III; SWANSTON, D. N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 16, p. 19–33, 1979.

4. ARTIGO 2

Resistência à penetração em um Neossolo Flúvico: efeito do sistema radicular do capim-vetiver em talude da margem do Rio São Francisco

Resumo

A desflorestação da margem do rio São Francisco por razões diversas, tem levado à condução de estudos de recuperação da vegetação ciliar que priorizam espécies que possuam características favoráveis à estabilização dos taludes, em razão do avanço dos processos erosivos. Esse estudo teve como objetivo avaliar o efeito do sistema radicular do capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) na resistência à penetração (RP) do solo de talude marginal do Baixo São Francisco. Mudanças de capim-vetiver foram plantadas no talude do rio a fim de avaliar a RP ao longo do perfil foram avaliados comportamento de RP nas profundidades 0 – 0,20; 0,20 – 0,40 e 0,40 – 0,60 m. Dados de RP foram obtidos a partir do uso de um penetrômetro automatizado. Também foram coletados dados de teor de umidade determinado pelo método da pesagem, assim como análise granulométrica realizada por densimetria e densidade de raízes pelo método do monólito. Os resultados da RP, da umidade e da densidade de raízes foram submetidos à análise de variância ($p < 0,05$) e posteriormente as médias foram comparadas pelo teste de Tukey usando o software SISVAR. Os pontos próximos ao capim-vetiver apresentaram RP média de 1793,94 kPa e umidade média de 11,78%, diferindo estatisticamente dos pontos amostrados nas entrelinhas de cultivo. A RP e a umidade do solo não diferiram estatisticamente nas profundidades avaliadas. Uso de capim vetiver promoveu a cobertura do solo, favorecendo a maior retenção de água e, conseqüentemente, a diminuição da RP.

Palavras-chave: capim-vetiver; erosão; cobertura do solo; infiltração; raízes.

Abstract

The deforestation of the slopes of the river San Francisco for various reasons, has led to conducting studies that prioritize species that have characteristics suitable to stabilize the slope, due to the advancement of erosion. The objective of this study was to evaluate the effect of root system of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) in soil penetration resistance (RP) of marginal slope of the Lower São Francisco. Vetiver grass seedlings were planted in the slope of the river in order to assess the RP along the profile were evaluated PR behavior at depths from 0 - 0.20; 0.20 - 0.40 and 0.40 - 0.60 m. Data were obtained from RP use of an automated penetrometer. Data content humidity determined by weighing method, and particle size analysis by densitometry and root density by the monolith method were also collected. The results of RP, humidity and root density were subjected to analysis of variance ($p < 0.05$) and subsequently the means were compared by Tukey test using the software SISVAR. The vetiver grass near points had a mean 1793.94 kPa and average humidity of 11.78% RP, differing from the sampled points between the lines of cultivation. The PR and soil water content did not differ statistically in the depths evaluated. Use of vetiver grass ground cover promoted, resulting in a greater water retention and hence the reduction of PR.

Key words: vetiver grass; erosion; soil covering; infiltration; roots.

Introdução

Devido à implantação de hidrelétricas, o Rio São Francisco teve o seu regime hidrológico alterado, e no seu baixo curso localizado entre os estados de Sergipe e Alagoas, nordeste do Brasil, tem sido identificado uma progressiva erosão das suas margens por meio do solapamento da base do talude associado ao desmatamento da vegetação ciliar (HOLANDA et al., 2005).

Em busca de minimizar os danos econômicos, sociais e ambientais à região, provenientes do assoreamento da calha do rio, faz-se necessário a revegetação dos taludes com espécies que suportem a ação das ondas, reduzindo os constantes desmoronamentos de blocos de terra que caem no canal do rio (HOLANDA et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2009).

Técnicas de bioengenharia de solos vêm sendo testadas no Baixo São Francisco como alternativa de baixo custo a fim de estabilizar os taludes marginais (HOLANDA et al. 2009). Li & Eddleman (2002) afirmam que a bioengenharia de solos visa controlar a erosão com a utilização de elementos inertes, como a madeira, em sinergismo com elementos biológicos, como a vegetação. As espécies vegetais contribuem com o caule e com o sistema radicular na contenção e proteção do solo, melhorando as condições de drenagem e controle dos movimentos de massa.

Na margem direita do Rio São Francisco, foi utilizado o capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) como componente estrutural da técnica de bioengenharia de solos implantada para estabilização do talude (HOLANDA et al. 2012). De acordo com Chong & Chu (2007), o uso de vetiver é recomendado para o controle de erosão de taludes, dentre muitos fatores destaca-se a formação de uma barreira vegetal viva e densa, a qual retém sedimentos e reduz a energia potencial do escoamento superficial; alta adaptabilidade às diferentes condições edafoclimáticas; e por apresentar um sistema radicular penetrante capaz de suportar rachaduras nas estruturas do solo.

O uso do capim-vetiver na revegetação de solos degradados promove melhoria nas propriedades físicas do solo e oferece suporte mecânico ao solo (MICKOVSKI et al., 2005). Ao analisarem a resistência do solo à penetração em taludes revegetado com vetiver, Cobra et al. (2012) constataram que o tempo de permanência da gramínea vetiver na área influenciou positivamente na diminuição da resistência do solo à penetração.

Dentre as qualidades físicas do solo, a resistência do solo à penetração é aquela encontrada pelas raízes para penetrar ao solo sendo, portanto, considerada a propriedade mais

adequada para determinar o grau de compactação deste. A resistência do solo à penetração está diretamente correlacionada com a textura, a densidade, a matéria orgânica e, principalmente, a umidade no momento da determinação (BUSSCHER et al., 1997; PEDROTTI et al., 2001).

Em geral, os solos compactados possuem baixa capacidade de infiltração, o que acarreta o maior escoamento superficial e, conseqüentemente, maior erosão (BERTOL et al., 2001). Para Souza & Alves (2003), o grau de compactação e a descontinuidade dos poros são responsáveis pela redução da permeabilidade do solo à água, sendo que as diferentes formas de uso e manejo do solo promovem alterações no movimento da água no solo e na resistência à penetração. As áreas com adequadas práticas de manejo apresentam menor resistência do solo à penetração e maior capacidade de infiltração e condutividade hidráulica (OLIVEIRA & SOUZA, 2013).

A mensuração da resistência do solo à penetração é indicada para avaliar o grau de impedimento ao crescimento radicular e inferir sobre o potencial de infiltração de água no solo. Segundo a USDA (1993), a resistência do solo à penetração pode ser classificada, quanto à restrição ao crescimento radicular, em três classes: pequena (menor que 100 kPa), intermediária (entre 100 e 2000 kPa) e grande (maior que 2000 kPa).

Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do sistema radicular do capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) na resistência à penetração (RP) do solo de talude marginal do Baixo São Francisco.

Materiais e métodos

Descrição da área experimental

O experimento foi realizado na margem direita do Rio São Francisco, no município de Amparo do São Francisco, Sergipe, cujas coordenadas UTM são N = 8.868.789,506 e E = 736.583,864. O clima do local, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Am, com pluviosidade e temperatura média anual de 744 mm ano⁻¹ e 25°C, respectivamente (CODEVASF, 2003) e o solo classificado como Neossolo Flúvico de acordo com EMBRAPA (2013).

Em julho de 2011, foram implantadas técnicas de bioengenharia de solos para controle do processo erosivo do talude marginal no sítio experimental. Muda de capim-vetiver que

compõem as citadas biotécnicas foram plantadas a fim de aumentar a resistência e coesão do solo, diminuir a erosão superficial e, conseqüentemente, proporcionar maior estabilidade ao talude. O plantio da gramínea foi realizado em covas adubadas com 8g de superfosfato simples por planta, utilizando o sistema de cordões em contorno perpendiculares ao declive do talude e com espaçamento de 0,9 m entre linhas e 0,3 m entre plantas na linha.

As amostragens do solo e das raízes foram realizadas na estação seca, em 2012, para avaliar o efeito dessa gramínea sob a resistência do solo à penetração, a retenção de umidade e a produção de raízes. Considerou-se importante testar plantas adultas a fim de avaliar a influência do estabelecimento da gramínea nas características físicas do solo do talude.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, dispostos em um esquema fatorial (2 x 3), correspondendo a dois pontos de amostragem do solo (próximo ao capim-vetiver e na entrelinha do plantio) e a três diferentes profundidades de coleta (0 – 0,20; 0,20 – 0,40; 0,40 – 0,60 m). Foram demarcados oito blocos, com 16 m² cada.

Resistência do solo à penetração

Avaliou-se a resistência mecânica à penetração (RP) ao longo do perfil do solo até a profundidade de 0,60 m, utilizando-se o medidor automatizado de compactação do solo SoloTrack PLG5300. O penetrômetro automatizado foi configurado para registrar os dados de resistência a cada centímetro de profundidade.

Para cada bloco, foram realizadas duas amostragens, uma próxima ao capim-vetiver e outra na entrelinha do plantio, para avaliar a dinâmica da RP relativa à presença da gramínea.

Os dados obtidos de RP foram agrupados e analisados, para cada ponto de amostragem, em três profundidades: 0 – 0,20; 0,20 – 0,40; 0,40 – 0,60 m.

Umidade gravimétrica e textura do solo

Foi realizada também coleta de solo para determinação da umidade gravimétrica e da textura no momento das determinações da RP, nos mesmos pontos de amostragem e nas mesmas profundidades. Para cada profundidade foram coletadas três amostras por tratamento, totalizando 144 amostras.

O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 1997), no qual as amostras foram pesadas para obter o peso do solo úmido e em seguida foram secas em estufa a 105°C até a obtenção do peso constante.

A análise granulométrica foi realizada por densimetria conforme os princípios propostos por Bouyoucos (1962) e descritos pela NBR 7181/84 (ABNT, 1984), com a utilização de um densímetro de bulbo simétrico (densímetro de Bouyoucos) graduado de 0,995 a 1,050. Posteriormente, os dados foram tabulados e, em seguida, determinado a classificação textural conforme o triângulo textural (LEMOS & SANTOS, 1996).

Densidade das raízes

A metodologia utilizada para a coleta de raízes foi a do monólito descrita por Böhm (1979), e as dimensões de cada monólito foram de 0,50 m de largura, 0,50 m de comprimento e 0,10 m de altura. As amostragens foram realizadas em camadas nas profundidades de 0 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,30; 0,30 – 0,40; 0,40 – 0,50 m, de cinco indivíduos do capim-vetiver escolhidos aleatoriamente na área experimental. As raízes foram lavadas com jato d'água, acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa com circulação forçada de ar, a 65°C, por 72 h.

Em seguida, realizou-se a pesagem das raízes em uma balança analítica, determinando-se a matéria seca das raízes (MSR), que possibilitou o cálculo da *DR* (Densidade das Raízes) por meio da Eq. (1), onde *MD* é a massa de raízes por classe de profundidade (kg) e *V* é volume de solo de cada classe (m³).

$$DR = \frac{MD}{V} \quad (1)$$

Análise estatística

Os resultados da resistência do solo à penetração e da umidade foram processados e submetidos à análise de variância, comparando-se os pontos de amostragem e a profundidade de coleta. Os dados obtidos da densidade de raízes para as diferentes classes de profundidade do solo também foram submetidos à análise de variância para determinar a significância em nível de 5% (Teste F). Para comparação das médias, aplicou-se o teste de Tukey usando o software SISVAR (FERREIRA, 2011).

Resultados e Discussão

Observa-se que a RP e a umidade apresentaram diferenças ao nível de 1% de probabilidade para a localização dos pontos de amostragem (Tabela 1). A análise de variância aplicada aos resultados da RP e da umidade do solo não apresentaram interação significativa pelo Teste F entre os pontos de amostragem e a profundidade da coleta, como também não diferiram significativamente nas profundidades amostradas.

TABELA 1. Resistência à penetração (RP) e umidade do solo próximo ao vetiver e na entrelinha do cultivo.

	RP (kPa)	Umidade (%)
Vetiver	1793,94 b **	11,78 a **
Entrelinha	2152,25 a **	7,78 b **

Médias seguidas por uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 1% de probabilidade.

Maiores valores de RP foram encontrados nos pontos coletados nas entrelinhas do capim-vetiver, apresentando uma média de 2152,25 kPa ($p < 0,01$) (Tabela 1). Percebe-se que a presença da gramínea contribuiu na redução da RP, devido à maior agregação do solo por meio de suas raízes. Para Suzuki et al. (2007), a cobertura vegetal com gramíneas promove maior taxa de recuperação da agregação dos solos, sobretudo em solos degradados.

De acordo com a Tabela 1, o maior teor médio de umidade foi obtido nos pontos de amostragem próximos a planta do capim-vetiver, 11,78% ($p < 0,01$). Apesar dos níveis de profundidade não terem influenciado o teor de água no solo, observa-se na Figura 1 que em todas as profundidades estudadas (0 – 0,20; 0,20 – 0,40; 0,40 – 0,60 m), as médias de umidade foram superiores nos pontos de coleta próximos à gramínea do que nas entrelinhas de cultivo, ao nível de 1% de probabilidade. Este fato pode ser explicado pela maior retenção de água próxima a planta do capim-vetiver, devido à cobertura do solo, além da maior taxa de infiltração proporcionada pela presença das raízes da gramínea. Para Holanda et al (2010), os elementos dessa biotécnica diminuem a exposição do solo ao sol, permitindo a manutenção de maior umidade por mais tempo.

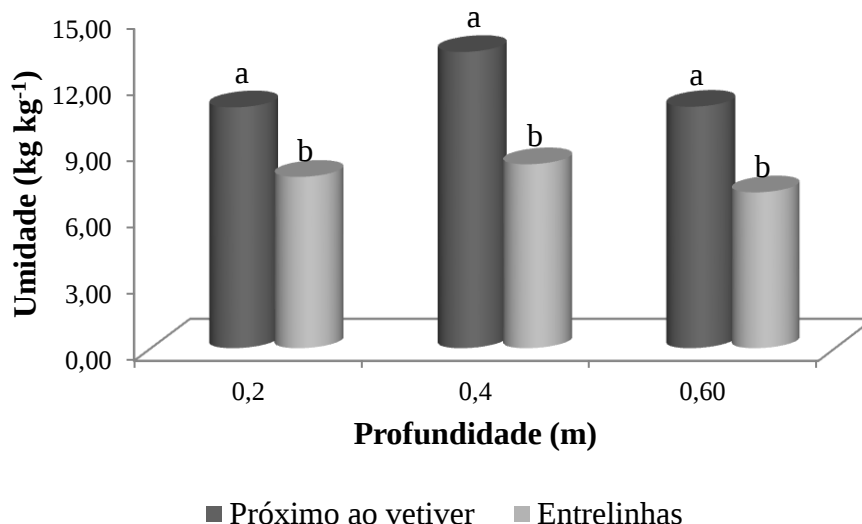


FIGURA 1. Umidade do solo para o Neossolo Flúvico do talude marginal do Baixo São Francisco nas diferentes profundidades estudadas próximo a planta e nas entrelinhas de cultivo.

Médias seguidas por uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 1% de probabilidade.

Resultado semelhante ao apresentado nesse estudo foi discutido por Lanzasova et al. (2010), que encontraram maior conteúdo de água no sistema de manejo de campo nativo decorrente da densa e permanente cobertura do solo proporcionada pela gramínea, a qual causaria uma espécie de obstáculo ao processo evaporativo da atmosfera em períodos de estresse hídrico. Observou nas entrelinhas de cultivo, com menor cobertura de solo, menor umidade devido ao possível selamento superficial identificado, o que dificultou a infiltração de água no solo.

Além da determinação da umidade, também foi realizada a análise granulométrica dos pontos estudados. De acordo com as frações granulométricas obtidas para as três profundidades analisadas, em todos os pontos, a classificação textural do solo foi de Franco arenosa (65,71% de areia; 18,19% de silte; 16,10% de argila). Por não haver diferença de classificação textural tanto entre os pontos analisados como entre os níveis de profundidade, a textura não contribuiu para justificar as diferenças encontradas nos diferentes pontos de coleta. Para Rosolem et al. (1999), quanto menos argila no solo, menor a resistência à penetração no mesmo nível de densidade global.

A Figura 2 mostra que os valores de RP na camada de 0 – 0,20 m variam de 653,12 a 2189,88 kPa para as amostragens realizadas próximas ao capim-vetiver e de 1175,20 a 2.632 kPa para as coletas nas entrelinhas do cultivo.

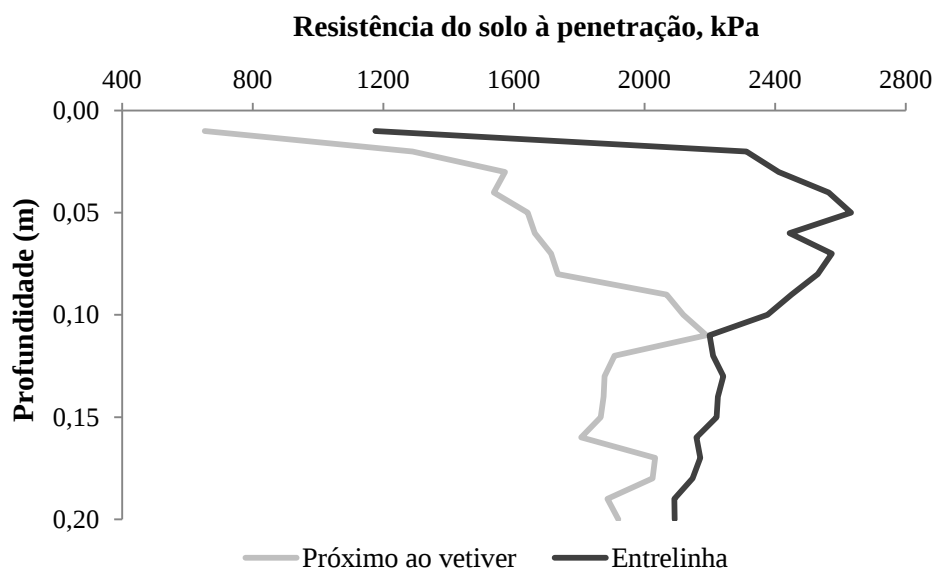


FIGURA 2. Resistência mecânica do Neossolo Flúvico à penetração, na profundidade 0 – 0,20 m, em pontos próximos às plantas de Vetiver e em pontos nas entrelinhas.

Na profundidade de 0 – 20 m, a umidade média e a RP média dos pontos localizados próximo a planta foram de 10,90% e 1768,96 kPa, respectivamente, sendo superior às médias encontradas na entrelinha, 7,76% e 2261,16 kPa (Figura 2). A redução do teor de água na entrelinha colaborou com o aumento da RP nesses pontos. Concordando com os dados apresentados Silveira et al. (2010) encontraram uma elevada correlação negativa da RP com a umidade do solo em um pomar de laranja consorciado com feijão-de-porco. O comportamento da RP e da umidade na área experimental para a profundidade 0 – 0,20 m é semelhante ao obtido por Campos e Alves (2006), que avaliaram uma área degradada em processo de regeneração natural e uma área em recuperação com *Pinus*, apresentando valores médios de RP e umidade de 1953,3 e 2656,6 kPa; 12,4 e 11,5%, respectivamente, em solo de textura Franco-argilo-arenosa.

Trabalhando com solo de mesma textura Franco arenosa em áreas de capim nativo e solo sem cobertura, Lanzanova et al. (2010) encontraram para a profundidade de 0 – 0,20 m, RP de aproximadamente 660 kPa para solo sem cobertura e 800 kPa para um sistema com capim nativo.

Vale salientar que, no presente estudo, os dez centímetros iniciais da profundidade apresentaram maior amplitude dos valores de RP entre os pontos estudados, podendo ser explicado pela maior densidade radicular nessa profundidade nos pontos próximos à gramínea (Figura 3). Cobra et al. (2012) afirmam que quanto maior a idade do capim-vetiver no talude revegetado, maior é a densidade radicular e, conseqüentemente, menor é a RP.

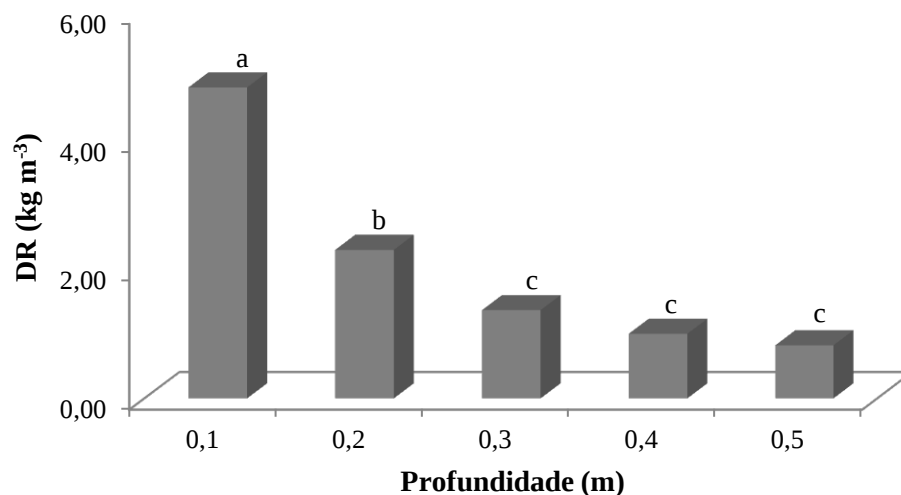


FIGURA 3. Densidade de Raízes (DR) do capim-vetiver da área experimental nas diferentes profundidades estudadas. Médias seguidas por uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 1% de probabilidade.

Esta elevada concentração de raízes na profundidade 0 – 0,10 m proporciona maior agregação do solo, maior infiltração de água e, conseqüentemente, menor erosão. O aumento da infiltração de água no solo proveniente da presença das gramíneas possivelmente também está relacionado com o aumento da matéria orgânica na superfície do solo, sendo capaz de reduzir o escoamento superficial e a erosão.

Para a profundidade de 0,20 – 0,40 m (Figura 4), os resultados de RP foram maiores nas entrelinhas de cultivo (2139,92 kPa) do que nos pontos próximos à gramínea vetiver (1896,51 kPa). Este comportamento na área de estudo é explicado, assim como na profundidade 0 – 0,20 m, pela ausência de cobertura nas entrelinhas e pelo maior conteúdo de água no solo nas proximidades da planta, 13,4 versus 8,32%, respectivamente. Magalhães et al. (2009) estudando solo sob pastagem (*Brachiaria brizantha*) observaram valor médio aproximado de 2485 kPa para a profundidade 0,20 – 0,40 m.

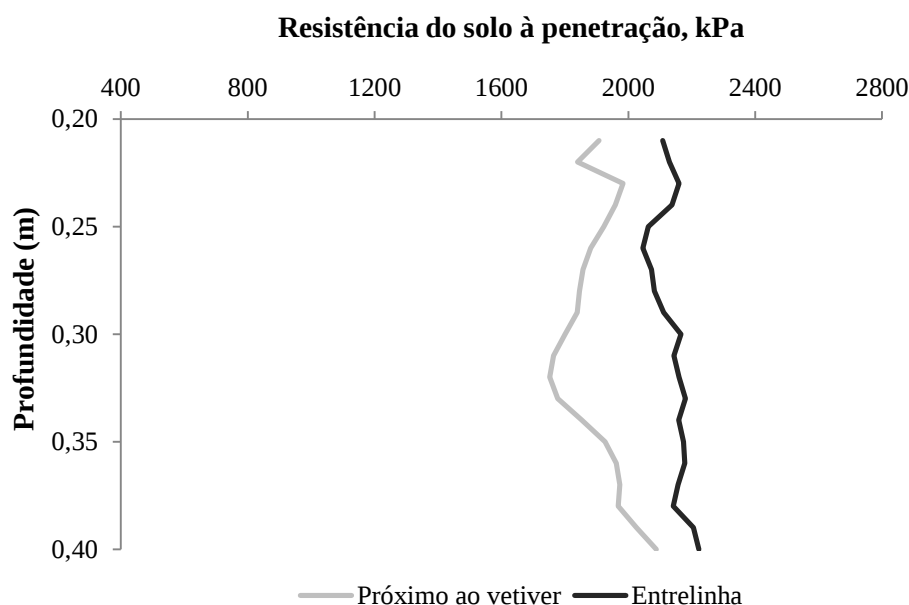


FIGURA 4. Resistência mecânica do Neossolo Flúvico à penetração, na profundidade 0,20 – 0,40 m, em pontos próximos às plantas de Vetiver e em pontos nas entrelinhas.

Os menores teores de água identificados neste estudo justificam a maior RP observada na área experimental. Diferentemente dos achados desse estudo, Campos e Alves (2006) identificaram maior compactação na profundidade de 0,20 – 0,40 m, com valores de RP e umidade foram 4780 e 7600 kPa; 12,99 e 12,57%, respectivamente, para uma área degradada com regeneração natural e uma área em recuperação com *Pinus*.

A Figura 5 detalha o comportamento da RP no perfil de 0,40 – 0,60 m. Para todos os centímetros analisados, a RP dos pontos próximos ao capim-vetiver foi inferior à RP das entrelinhas de cultivo. A RP nas proximidades da planta variou entre 1529,62 a 1841,37 kPa com valor médio de 1716,35 kPa, enquanto que o mínimo e o máximo encontrado nas entrelinhas foram, respectivamente, 1764,25 a 2233,62 kPa, apresentando valor médio de 2055,96 kPa.

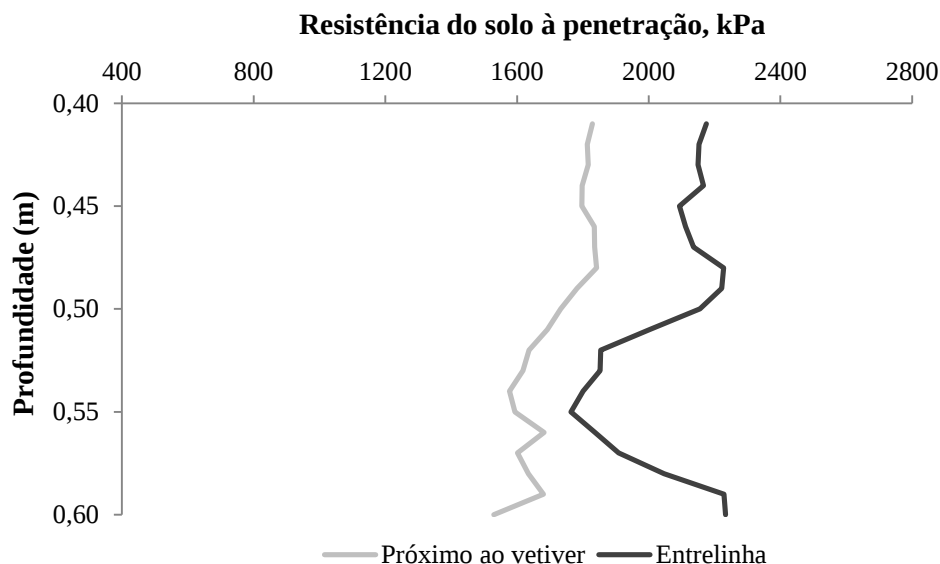


FIGURA 5. Resistência mecânica do Neossolo Flúvico à penetração, na profundidade 0,40 – 0,60 m, em pontos próximos às plantas de Vetiver e em pontos nas entrelinhas.

Assim como nas demais profundidades analisadas, o comportamento da RP entre os pontos de amostragem é inversamente proporcional ao conteúdo de água no solo. Os pontos próximos ao vetiver apresentaram teor de umidade de 10,92%, enquanto que a umidade média nas entrelinhas foi de 7,06%. Magalhães et al. (2009) apresentaram valor médio de RP de 2025 kPa para solo sob pastagem na profundidade 0,40 – 0,60 m, sendo próximo aos encontrados no presente estudo. Cobra et al. (2012) estudando capim-vetiver com 17 meses de idade identificaram RP de 552,5 kPa, na profundidade de 0,40 – 0,60 m, porém sem correlação com umidade e textura do solo.

De acordo com a classificação da RP quanto a restrição física de crescimento radicular da USDA (1993), em todas as profundidades analisadas, os pontos próximos ao capim-vetiver apresentaram RP na classe intermediária (entre 100 e 2000 kPa), enquanto que nas entrelinhas do cultivo foram obtidas RP acima de 2000 kPa, classificadas como grande restrição. Esta redução da RP proporcionada pela presença da gramínea auxilia no controle da erosão do talude marginal devido a maior infiltração da água e ao menor escoamento superficial no solo.

Conclusões

Os menores valores de resistência do solo à penetração em todas as profundidades próximos ao capim-vetiver devem-se ao ambiente favorável ao aumento da umidade promovido por essa gramínea na sua rizosfera.

A elevada densidade de raízes encontrada na camada 0 – 0,10 m colaborou para a redução da resistência do solo à penetração nos pontos próximos ao capim vetiver.

A ausência de cobertura do solo nas entrelinhas aumentou a resistência do solo à penetração em todas as profundidades analisadas, apresentando grande nível de compactação (acima de 2000 kPa) com forte restrição ao crescimento radicular.

O uso de capim-vetiver como elemento das técnicas de bioengenharia de solos utilizadas para a contenção de taludes promoveu uma melhor cobertura do solo, favorecendo a maior retenção de água e, conseqüentemente, diminuindo a resistência do solo à penetração, aumentando assim a sua resistência ao cisalhamento.

Referências bibliográficas

ABNT – NBR7181/84. **Solo: análise granulométrica**. Rio de Janeiro, ABNT, 1984, 13 p.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 55-560, 2001.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Springer, Heidelberg, 1979. 188 p.

BOUYOUCOSM, G. J. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. **Agron. J.**, v. 54, p. 464-465, 1962.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil Tillage Research**, v. 43, p. 205-217, 1997.

CAMPOS, F. S.; ALVES, M. C. Resistência à penetração de um solo em recuperação sob sistemas agrosilvopastoris. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 759-764, 2006.

CHONG, C. W.; CHU, L. M. Growth of vetivergrass for cutslope landscaping: Effects of container size and watering rate. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 6, p. 135-141, 2007.

COBRA, R. L.; PINTO, L. V. A.; SOUZA, R. X.; PEREIRA, M. W. M.; PEREIRA, A. J. Resistência à Penetração do Solo de uma Encosta: Efeitos do Espaçamento de Plantio e Idade da Gramínea Vetiver. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 4, n. 2, p. 1-9, 2012.

CODEVASF – COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DO VALE DO SÃO FRANCISCO E PARNAÍBA. **Projeto básico de proteção da margem direita do rio São Francisco no perímetro de irrigação Cotinguiba/Pindoba, 4ª SR Sergipe**. Brasília: CODEVASF, 2003.

- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPQ, 1997. 212 p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. rev. ampl. Brasília, DF, Embrapa, 2013. 353 p.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, I. G. C.; SANTOS, C. M. S.; CASADO, A. P. B.; PEDROTTI, A. Riparian fragments affected by bank erosion in the Lower São Francisco River, Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 2, p. 148-152, 2005.
- HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, C. M.; CASADO, A. P. B.; BANDEIRA, A. A.; OLIVEIRA, V. S.; FONTES, L. C. S.; ROCHA, I. R.; ARAÚJO-FILHO, R. N.; GÓIS, S. S.; VIEIRA, T. R. S. Análise multitemporal e caracterização dos processos erosivos no Baixo São Francisco sergipano. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 2, p. 87-96, 2007.
- HOLANDA, F. S. R.; BANDEIRA, A. A.; ROCHA, I. P.; ARAÚJO FILHO, R. N.; RIBEIRO, L. F.; ENNES, M. A. Controle da erosão em margens de cursos d'água: das soluções empíricas à técnica da bioengenharia de solos. **Revista RA'EGA**, Curitiba, n. 17, p. 93-101, 2009.
- HOLANDA, F. S. R.; GOMES, L. G. N.; ROCHA, I. P.; SANTOS, T. T.; ARAÚJO FILHO, R. N.; VIEIRA, T. R. S.; MESQUITA, J. B. Crescimento inicial de espécies florestais na recomposição da mata ciliar em taludes submetidos à técnica da bioengenharia de solos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 157-166, 2010.
- HOLANDA, F. S. R.; ARAÚJO FILHO, R. N.; LIMA, J. C. B.; ROCHA, I. P. da. Comparison of different containers in the production of seedlings of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*). **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 3, p. 439-444, 2012.
- LANZANOVA, M. E.; ELTZ, F. L. F.; NICOLOSO, R. da S.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J.; ROCHA, M. R. da. Atributos físicos de um argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1333-1342, 2010.
- LEMOES, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3ª Ed., Campinas-SP, 1996. 83 p.
- LI, M.; EDDLEMAN, K. E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: A biotechnical streambank stabilization design approach. **Landscape and Urban Planning**, v. 60, p. 225-242, 2002.
- MAGALHÃES, W. A.; CREMON, C.; MAPELI, N. C.; SILVA, W. M.; CARVALHO, J. M.; MOTA, M. S. Determinação da resistência do solo a penetração sob diferentes sistemas de cultivo em um Latossolo sob Bioma Pantanal. **Agrarian**, v. 2, n. 6, p. 21-32, 2009.
- MICKOVSKI, S. B., VAN BEEK, L. P. H.; SALIN, F. Uprooting of vetiver uprooting resistance of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*). **Plant and Soil**, v. 278, n. 1-2, p. 33-41, 2005.

OLIVEIRA, V. S.; BARRETO JÚNIOR, E. R.; HOLANDA, F. S. R. Os efeitos naturais, econômicos e sociais da erosão na margem direita do rio São Francisco na sustentabilidade dos agroecossistemas. **Revista Agrogeoambiental**, v. 1, n. 3, p. 63-72, 2009.

OLIVEIRA, M. X.; SOUZA, B. S. P. Fragilidade de vertentes: resistência à penetração versus taxa de infiltração em diferentes subordens de argissolo na área urbana de São Pedro do Sul/RS. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. 25, p. 37-55, 2013.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 521-529, 2001.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 5, p. 821-828, 1999.

SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Bras. de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 18-23, 2003.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, 2007.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, **Soil survey manual**. Washington, DC, USA, Soil Survey Division Staff, (Handbook, 18), 1993. 437p.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Os maiores índices de Densidade Radicular, Densidade de Comprimento Radicular, Razão de Raiz por Área, Tensão de Ruptura e Coesão da Raiz do capim-vetiver foram encontrados na camada de 0 – 0,10 m, reduzindo com o aumento da profundidade.

Os elevados valores da densidade de raízes, de resistência à tensão de ruptura e do reforço proporcionado pela raiz, encontrados para a gramínea *Chrysopogon zizanioides*, são resultados que favorecem o aumento da resistência ao cisalhamento do solo.

Quanto à resistência do solo à penetração, para todas as profundidades do solo analisadas, foram encontrados menores valores nas proximidades do capim-vetiver devido ao maior teor de umidade nestes pontos, em relação às entrelinhas de cultivo desta gramínea.

A elevada densidade de raízes encontrada na camada 0 – 0,10 m colaborou para a redução da resistência do solo à penetração nos pontos próximos ao capim-vetiver. Enquanto que a ausência de cobertura do solo nas entrelinhas aumentou a resistência do solo à penetração em todas as profundidades analisadas, apresentando grande nível de compactação (acima de 2000 kPa) com forte restrição ao crescimento radicular.

Diante dos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que o uso do capim-vetiver como elemento das técnicas de bioengenharia de solos é uma alternativa para controle da erosão marginal e estabilização dos taludes do Baixo São Francisco, por proporcionar um aumento significativo do reforço do solo, além de promover a cobertura do solo, favorecendo a maior retenção de água e, conseqüentemente, a redução da resistência do solo à penetração.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, R. P.; PANDEY, R. N.; DAFFORN, M. R.; JAMES, S. A. Vetiver DNA-Fingerprinted cultivars: effects of environment on growth, oil yields and composition. **Journal of Essential Oil Research**, London, v. 15, p. 363-371, 2003.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Região hidrográfica do São Francisco**. 2014. Disponível em: <<http://cbhsaofrancisco.org.br/bacia-hidrografica-do-rio-sao-francisco/a-socioeconomia>>. Acesso em: 6 de janeiro de 2014.

ARAÚJO-FILHO, R. N.; HOLANDA, F. S. R.; ANDRADE, K. R. Implantação de técnicas de bioengenharia de solos no controle da erosão no baixo São Francisco, estado de Sergipe. **Scientia Plena**, v. 9, n. 7, p. 1-9, 2013.

BABALOLA, O.; JIMBA, S. C.; MADUAKOLAM, O.; DADA, A. Use de Vetiver Grass for soil and water conservation in Nigeria. In: **Proceedings of Third World International Conference on Vetiver and Exhibition Vetiver and Water**, Guangzhou, China, p. 282-288, 2003.

BANDEIRA, A. A. **Evolução do processo erosivo na margem do Rio São Francisco e eficiência dos Enrocamentos no Controle da Erosão**. Sergipe-Brasil. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe/NESA, 2005. 183p. Dissertação Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

BARKER, D. H. **Vegetation and Slopes: Stabilisation, Protection and Ecology**, London: Thomas Telford, 1994. 221p.

BÉCEL, C.; VERCAMBRE, G.; PAGES, L. Soil penetration resistance, a suitable soil property to account for variations in root elongation and branching. **Plant Soil**, v. 353, p. 169–180, 2012.

BENGHOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal Soil Science**, Baltimore, v. 41, n. 3, p. 341-58, 1990.

BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 55-560, 2001.

BURYLO, M.; REY, F.; ROUMET, C.; BUISSON, E.; DUTOIT, T. Linking plant morphological traits to uprooting resistance in eroded Marly lands (Southern Alps, France). **Plant and Soil**, v. 324, n. 1-2, p. 31-42, 2009.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil Tillage Research**, v. 43, p. 205-217, 1997.

CASADO, A. P. B.; HOLANDA, F. S. R.; ARAÚJO FILHO, F. A. G.; YAGUIU, P. Bank erosion evolution in São Francisco River. Viçosa, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 231-239, jan./mar. 2002.

CAZZUFFI, D.; CORNEO, A.; CRIPPA, E. Slope stabilisation by perennial “gramineae” in Southern Italy: plant growth and temporal performance. **Geotechnical and Geological Engineering**, Italy, n. 24, p. 429-447, 2006.

CBHSF - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. **A Bacia**. Principais características. 2014. Disponível em: <<http://cbhsaofrancisco.org.br/bacia-hidrografica-do-rio-saofrancisco/caracteristicas-gerais>>. Acesso em: 6 de janeiro de 2014.

CHENG, H.; XIAOJIE, Y.; AIPING, L.; HENGSHENG, F.; MING, W. A Study on the Performance and Mechanism of Soil-reinforcement by Herb Root System. In: THIRD INTERNATIONAL VETIVER CONFERENCE, 3. 2003, China. **Anais...**, China: The Vetiver Network, 2003. p. 397-402.

COBRA, R. L. ; PINTO, L. V. A. ; SOUZA, R. X. ; PEREIRA, M. W. M. ; PEREIRA, A. J. . Resistência à Penetração do Solo de uma Encosta: Efeitos do Espaçamento de Plantio e Idade da Gramínea Vetiver. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 4, n. 2, p. 1-9, 2012.

CODEVASF. **Incidência de desmoronamento das barrancas do rio São Francisco na faixa de domínio do perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba**. Brasília: CODEVASF, 2000, 13p.

COELHO, A. T.; PEREIRA, A. R. Efeitos da vegetação na estabilidade de taludes e encostas. **Boletim Técnico**, Belo Horizonte – MG, Ano 01 – N.º 002, 2006. 20p.

DALTON, P. A.; SMITH, R. J.; TRUONG, P. N. V. Vetiver grass hedges for erosion control on a cropped flood plain: hedge hydraulics. **Agricultural Water Management**, n. 31, p. 91-104, 1996.

DAVIDE, A. C.; FERREIRA, R. A.; FARIA, J. M. R.; BOTELHO, S. A. Restauração de matas ciliares. **Informe Agropecuário**, v. 21, n. 207, p. 65-74, 2000.

DE BAETS, S.; POESEN, J.; REUBENS, B.; WEMANS, K.; De BAERDEMAEKER, J.; MUYS, B. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. **Plant Soil**, Belgium, n. 305, p. 207-226, 2008.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **National soil degradation maps**. Land and Water Development Division, 2005. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/land/degradation/en/>>. Acesso em: 30 de novembro de 2013.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas, aplicações na estabilidade de taludes**. 2.ed. Curitiba, Editora UFPR, 2009. 602p.

GRAY, D. H.; LEISER, A. T. Biotechnical slope protection and erosion control. **Van Nostrand Reinhold Company**, New York, 1982. 271p.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control**. New York, John Wiley & Sons, 1996. 378p.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Degradação ambiental. In: _____. (Orgs.). **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 337-379.

GUIMARÃES, M. F. R. **Construção de Indicadores Ambientais para o estudo da erosão marginal do Baixo São Francisco**. Sergipe-Brasil. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe/NESA, 2004. 163p. Dissertação Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

GUIMARÃES, M. F. R.; HOLANDA, F. S. R.; ROCHA, I. P. da; ARAUJO FILHO, R. N.; VIEIRA, T. R. S. Indicadores ambientais para o estudo da erosão marginal no rio São Francisco. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 11, n. 34, p. 84-92, 2010.

HELLIN, J.; HAIGH, M. J. Better land husbandry in Honduras: towards the new paradigm in conserving soil, water and productivity. **Land Development Degree**, v. 13, p. 233-250, 2002.

HENGCHAOVANICH, D.; NILAWEERA, N. An assessment of strength properties of vetiver grass roots in relation to slope stabilization. In: THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON VETIVER, 1., 1996. Bangkok. **Anais...**, Bangkok: The Vetiver Network, 1996. p. 87-94.

HENGCHAOVANICH, D. **Vetiver grass for slope stabilization and erosion control**. Tech. Bull., Pacific Rim Vetiver Network, Thailand, n. 2, 1998. 28 p.

HOLANDA, F. S. R. ; REZENDE, A. M. ; CASADO, A. P. B. ; FONTES, L. C. S. ; SANTOS, R. C. Impacto ambiental promovido pela erosão na margem direita do baixo São Francisco, no Estado de Sergipe. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 2001, Goiânia - GO. **Anais...**, VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Rio de Janeiro - RJ: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental. CDROM.

HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, I. G. da C.; SANTOS, C. M. dos S.; CASADO, A. P. B.; PEDROTTI, A. Riparian fragments affected by bank erosion in the Lower São Francisco River, Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 2, p. 148-152, 2005.

HOLANDA, F. S. R.; ROCHA, I. P.; OLIVEIRA, V. S. Estabilização de taludes marginais com técnicas de bioengenharia de solos no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 570-575, nov./dez. 2008.

JONES, K.; HANNA, E. Design and implementation of an ecological engineering approach to coastal restoration at Loyola Beach, Kleberg Country, Texas. **Ecological Engineering**, v. 22, p. 249-261, 2004.

KE, C., FENG, Z., WU, X., TU, F. Design principles and engineering samples of applying vetiver ecoengineering technology for steep slope and riverbank stabilization. In: Proc 3rd Int'l Conf. on Vetiver. Guangzhou, China. **China Agricultural Press**, Beijing, 2003. p. 365-374.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil testings for engineers**. 2.ed. New York, John Wiley, 1951. 165p.

LEWIS, L. **Soil bioengineering an alternative to roadside management: a practical guide**. Technical Report 0077-1801-SDTDC. San Dimas, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas Technology and Development Center, 2000. 44p.

LOPES, A. V.; FREITAS, M. A. S. Avaliação das demandas e ofertas hídricas na bacia do rio São Francisco usando modelo de rede de fluxo. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15., 2003, Curitiba. Curitiba: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

- LOPES, M. H. **Capim Vetiver**. Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas – SBRT. REDETEC – Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005. 4p.
- MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 147, p. 52-55, 1987.
- MICKOVSKI, S. B.; VAN BEEK, L. P. H.; SALIN, F. Uprooting of vetiver uprooting resistance of vetiver grass (*Vetiveria zizaoindes*). **Plant and Soil**, v. 278, n. 1-2, p. 33-41, 2005.
- MICKOVSKI, S. B; VAN BEEK, L. P. H. Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate. **Plant Soil**, v. 324, p. 43-56, 2009.
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco**. Brasília, 2006. 148p.
- OLIVEIRA, V. S.; BARRETO JÚNIOR, E. R.; HOLANDA, F. S. R. Os efeitos naturais, econômicos e sociais da erosão na margem direita do rio São Francisco na sustentabilidade dos agroecossistemas. **Revista Agrogeoambiental**, v. 1, n. 3, p. 63-72, 2009.
- PAE - PROGRAMA DE AÇÕES ESTRATÉGICAS PARA O GERENCIAMENTO INTEGRADO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO E SUA ZONA COSTEIRA. **Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco GEF São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Subprojeto 4.5B – Formulação de um Programa de Gerenciamento Integrado da Bacia do rio São Francisco e da sua Zona Costeira**. Brasília, DF, 2003. 140p.
- PAE – PROGRAMA DE AÇÕES ESTRATÉGICAS PARA O GERENCIAMENTO INTEGRADO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO E SUA ZONA COSTEIRA. **Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco GEF São Francisco: Relatório Final**. ANA/GEF/PNUMA/OEA. Brasília-DF, TDA Desenho & Arte, 2004. 336p.
- PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 521-529, 2001.
- PEREIRA, A. R.. Uso do vetiver na estabilização de taludes e encostas. **Boletim Técnico**. Belo Horizonte – MG, Ano 01 – N.º 003, 2006. 20 p.
- PEREIRA, A. R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. 2. ed. Belo Horizonte: Ed. FAPI, 2008. 239 p.
- PHIEN, T.; TAM, T. T. Vetiver grass in hedgerow farming systems on sloping lands in Viet Nam, In: **The Vetiver network international website**, 2007. Acesso em: 12 de novembro de 2013. Disponível em: <http://www.vetiver.org/VNN_Thai%20Phien.pdf>.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; SUZUKI, L. E. A. S. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., 2006, Aracaju. **Anais...** Aracaju: SBCS, 2006. CD-ROM

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas/USP, n. 6, p. 17-30, 1992.

SANTOS, C. M. dos. **A erosão no Baixo São Francisco Sergipano e os mecanismos de destabilização dos taludes na margem do rio Sergipe-Brasil**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe/NESA, 2002. 143p. Dissertação Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

SEMARH – SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Comitê das Bacias Hidrográficas**. 2014. Disponível em: <<http://www.semarh.se.gov.br/comitesbacias/modules/tinyd0/index.php?id=48>>. Acesso em: 6 de janeiro de 2014.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 18-23, 2003.

SOUZA, V. C.; LORENZI, H. **Botânica sistemática: guia ilustrado para identificação das famílias de angiospermas da flora brasileira, baseado em APG II**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2005. 640 p.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; URLANI NETO, V. L. **Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto - modelo IAA/Planalsucar - Stolf**. São Paulo, MIC/IAA/PNMCA-Planalsucar, 1983. 8 p. (Boletim, 1)

SUDHISHRI, S., DASS, A., LENKA, N. K. Efficacy of vegetative barriers for rehabilitation of degraded hill slopes in eastern India. **Soil Tillage Research**, v. 99, p. 98-107, 2008.

SUTILI, F. J. **Bioengenharia de solos no âmbito fluvial do sul do Brasil: espécies aptas e suas propriedades vegetativo- mecânica e emprego na prática**. Tese (Doutorado Engenharia Florestal). Viena/Áustria: Universidade Rural de Viena, Departamento de Engenharia Civil e Perigos Naturais, Instituto de Bioengenharia de Solos e Planejamento da Paisagem, 2007. 94p.

TENGBETH, G. T. **The Effect of Grass Cover on Bank Erosion**. Silso e College, Cranfield Institute of Tecnology, 1989. 234 p. PhD Thesis

THORNE, C. R.; TOVEY, N. K. Stability of composite river banks. **Earh Surface Processes and Landforms**, v. 6, p. 469-484, 1981.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 333-339, 1996.

TORRES, J. L. R.; RODRIGUES JUNIOR, D. J.; SENE, G. A.; JAIME, D. G.; VIEIRA, D. M. S. Resistência à penetração em área de pastagem de capim tifton, influenciada pelo pisoteio e irrigação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, Supplement 1, p. 232-239, 2012.

TRUONG, P; CLARIDGE, J. Effect of heavy metals toxicities on vetiver growth. Bangkok, Thailand: **Vetiver Newsletter**, Number 15, 1996.

TRUONG, P.; HENGCHAOVANICH, D. Application of the Vetiver grass system in land stabilization, erosion and sediment control in civil construction. In: **Queensland Main Roads Southern Region Symposium**, Toowoomba, 1997.

TRUONG, P. Vetiver grass technology for land stabilisation, erosion and sediment control in the Asia Pacific region. In: **Proc. First Asia Pacific Conference on Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilisation**, Manila, Philippines, April 1999. Int Eros Control Assoc, Steamboat Springs, USA. 1999. p. 72-84.

TRUONG, P.; LOCH, R. Vetiver System for erosion and sediment control. In: **Proc. 13th International soil conservation Organisation Conference**, Brisbane, Australia, 2004.

TRUONG, P.; VAN, T. T.; PINNERS, E. **Vetiver system applications: technical reference manual**, 2.ed. Vietnam: The Vetiver Network International, 2008. 127p.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, **Soil survey manual**. Washington, DC, USA, Soil Survey Division Staff, (Handbook, 18), 1993. 437p.

VELDKAMP, J. F. A revision of *Chrysopogon* Trin. including *Vetiveria* Bory (Poaceae) in Thailand and Malasia with notes on some other species from Africa and Australia. **Austrobaileya**, Brisbane, v. 5, p. 503-533, 1999.

WALDRON, L. J. The Shear Resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. **Soil Science Society of America Journal**, n. 41, p. 843-849, 1997.

WU, T. H.; MCKINNELL, W. P. III; SWANSTON, D. N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 16, p. 19–33, 1979.