



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



**COMPORTAMENTO DE TALUDE DA MARGEM DO RIO
SÃO FRANCISCO SUBMETIDO À TÉCNICA DE
BIOENGENHARIA DE SOLOS**

RENISSON NEPONUCENO DE ARAÚJO FILHO

2012



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



RENISSON NEPONUCENO DE ARAÚJO FILHO

**COMPORTAMENTO DE TALUDE DA MARGEM DO RIO
SÃO FRANCISCO SUBMETIDO À TÉCNICA DE
BIOENGENHARIA DE SOLOS**

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

Orientador

Prof. Dr. Francisco Sandro Rodrigues Holanda

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL
2012

F

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

A663c Araújo Filho, Renisson Neponuceno de
Comportamento de talude da margem do Rio São Francisco submetido à técnica de bioengenharia de solos / Renisson Neponuceno de Araújo Filho. - São Cristóvão, 2012.
122 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Núcleo de Pós-Graduação e Estudos em Recursos Naturais, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe, 2012.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Sandro Rodrigues Holanda

1. Solos - Erosão. 2. Bacias hidrográficas. 3. Taludes(Mecânica do solo). 4. Vegetação. I. Título.

CDU 631.48

RENISSON NEPONUCENO DE ARAÚJO FILHO

**COMPORTAMENTO DE TALUDE DA MARGEM DO RIO
SÃO FRANCISCO SUBMETIDO À TÉCNICA DE
BIOENGENHARIA DE SOLOS**

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

APROVADA em ____ de _____ de _____ .

Prof. Dr. Gilson Moura Filho
Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Tácio Oliveira da Silva
Universidade Federal de Sergipe

Prof. Dr. Francisco Sandro Rodrigues Holanda
Universidade Federal de Sergipe
(Orientador)

**SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL**

Aos meus queridos pais
Renison e Maria Neide, por
todo apoio e incentivo
responsáveis por todo esse
feito.

Dedico

A meu irmão Rodrigo e
minha namorada Simony pela
confiança e companheirismo.

Ofereço

“The soil exists in a state
of constant change, taking
part in cycles that have no
beginning and no end
Silent Spring, by Rachel
Carson”

Agradecimentos

A Deus pela presença constante;

Ao meu amigo e professor Dr. Francisco Sandro Rodrigues Holanda, pela amizade, excelente orientação, convivência e confiança depositada. Meu muito obrigado por acreditar em meu potencial e pelas lições de vida que tanto me incentivaram para seguir nesse caminho;

Aos professores Dr. Alceu Pedrotti, Dr. Erinaldo Hilário, Dr. Gilson Moura Filho, Dr. Maria Aparecida, Dr. Regina Marino e Dr. Tácio Oliveira pela ajuda, amizade, incentivo, apoio, confiança, sugestões, colaboração e apoio para conclusão deste estudo. A todos os professores do DCF, DEA e do programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas pelos ensinamentos, cordialidade, paciência e amizade transmitidos ao longo do tempo;

À Universidade Federal de Sergipe e a Pró-Reitoria de Pós-Graduação pela oportunidade concedida para realização deste curso, suporte e apoio;

Ao programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas pela oportunidade e infraestrutura;

Ao Conselho Nacional de Pesquisa – CNPq, pela bolsa de estudos concedida e financiamento do projeto.

A Fundação de Apoio à Pesquisa e a Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe – FAPITEC pelo financiamento do projeto;

À Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco pelo fornecimento do aporte de informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho;

A Defesa Florestal Bioengenharia Ltda e Vertical Green, por fornecer os materiais necessários de bioengenharia de solos;

A família LABES constituinte do Grupo de Pesquisa em Gestão Hidroambiental do Baixo São Francisco dentre estes Thiago Roberto, Igor Pinheiro, Rogério Chagas, Mykael Bezerra, Karen Viviane, Marcela Battesini, Helber Gualberto, Fagner Góes, Gilberto Silveira, Suzilane Góis, Joel Conceição, Tiago Santos, Luisa Ferreira, Cyntia, Simone Santana, Alysson Santos, Ronildo César, Wellma Santos, Lucas, Fabrício Macedo, Luciano Sobral, Thiago Tavares, Julio César, Kairon Rocha, Raquele, Pedrito, Heide, Alan, Ighor Diaquino, Jean Fabe, Antonio Belarmino, Thizah, Jéssica, Débora, David Gonzalez, Andressa Ayala, Vanessa, Beatriz, Tássia Fernanda, Paulo, Alexandre, Alyne Fontes, Andreia Alves, Daniel equipe esta imprescindível na realização deste trabalho;

Aos amigos Olavo José, Audenis Fagner, Raul, Flávia, Allan Cunha, Marcos, Ancrisio a turma de mestrado 2010 pelos momentos de alegria e construção profissional;

Aos técnicos de laboratório Marcus Vinicius (LAS - DEA), José Willami Santos, Washington Santos, Anderson e Eugênio (GEOPAV - DEC) pela dedicação e tempo gastos nas análises de solo. Agradeço imensamente;

Aos Quilombolas e ao Senhor José João por ceder a fazenda para experimentação.

A todos meus amigos que estiveram sempre ao meu lado que contribuíram e acreditaram em mim;

A sociedade por ter contribuído para minha formação.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1 Introdução Geral	1
2 Referencial Teórico	4
2.1 Sustentabilidade e Agroecossistema	4
2.2 Estudo da Bacia Hidrográfica como um Agroecossistema	6
2.3 Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	7
2.4 Geomorfologia fluvial	9
2.5 Erosão do solo em margens de cursos d' água	10
2.6 Estabilidade de taludes	13
2.7 Caracterização física dos solos	16
2.8 Morfologia e resistência das raízes	20
2.8 Formas de controle da erosão em margens de cursos d'água	22
2.8.1 Bioengenharia de solos	23
2.8.1.1 Enrocamento de Pedras (Rip Rap)	25
2.8.1.2 Enrocamento vegetado	27
2.8.1.3 Retentores de sedimentos	28
2.8.1.4 Vegetação	29
2.8.1.4.1 Capim Vetiver	29
2.8.1.4.2 Estacas vivas	31
2.8.1.4.2 .1 Sabiá	33
3.Referências Bibliográficas	
CAPÍTULO 1: Influência das propriedades físicas e mecânicas na estabilidade do talude fluvial do baixo curso do rio São Francisco, estado de Sergipe	34
1 Resumo	46
2 Abstract	46
3 Introdução	47
4 Material e Métodos	47
4.1 Características da área experimental	51
4.2 Coleta e análise do solo	51
4.3 Ensaio de laboratório e análise do solo	53
4.4 Ensaio de cisalhamento direto	55
5 Resultados e Discussão	56
5.8.5.1 Caracterização e Classificação	

5.2 Análise do comportamento do solo em relação aos índices mecânicos	58
5.3 Resistência ao cisalhamento e estabilidade mecânica do talude fluvial	63
5.3.1 Estado do solo solto	69
5.3.2 Estado do solo com peso específico natural, saturado e submerso	71
5.4 Tempo de adensamento e cisalhamento	73
5.5 Deformações do solo	76
5.6 Tensões cisalhantes	78
6 Conclusões	79
7 Referências Bibliográficas	80
CAPÍTULO 2: Eficiência da adubação fosfatada no desenvolvimento de mudas de capim submetido à técnica de bioengenharia de solos no baixo São Francisco Sergipano	82
1 Resumo	90
2 Abstract	90
3 Introdução	91
4 Material e Métodos	92
4.1 Área experimental	95
4.2 Dados climatológicos do período monitorado	95
4.3 Análise física e química do solo	96
4.4 Produção de Mudas de Vetiver	97
4.5 Implantação da técnica de bioengenharia de solos	99
4.6 Delineamento Experimental	101
4.7 Avaliação do ensaio experimental	101
4.8 Análise estatística	102
5 Resultados e Discussão	103
5.1 Desenvolvimento morfológico do capim vetiver em função das doses de superfosfato simples	103
5.2 Produção Massa Fresca da Parte Aérea e Raízes (MFPA e MSRZ)	105
5.3 Produção Matéria Seca das Raízes e Aérea (MSR e MSPA)	108
5.4 Densidade de Raízes e Densidade do Comprimento de Raízes (DR e DCR)	109
5.5 Número de Raízes e Superfície Externa de Raízes	112
5.6 Comprimento parte aérea e raiz	115
5.7 Relação Parte Aérea: Raíz	116
6 Conclusões	117
7 Referências Bibliográficas	

LISTA DE FIGURAS

Página

REFERENCIAL TEÓRICO

FIGURA 1. Divisão fisiográfica da bacia do Rio São Francisco.	8
FIGURA 2. Efeito da vegetação na estabilidade de taludes.	21
FIGURA 3. Efeito da vegetação na estabilidade de taludes.	22
FIGURA 4. Ilustração esquemática do enrocamento vegetado.	27
FIGURA 5. Retentores de sedimentos Bermalonga® D- 20 fixados na base do talude no Baixo São Francisco.	28
CAPÍTULO 1	
FIGURA 1. Localização da área experimental no município de Amparo de São Francisco no Estado de Sergipe.	52
FIGURA 2. Trecho correspondente ao talude marginal onde foi implantada a técnica de bioengenharia de solos.	54
FIGURA 3. Tempo médio de adensamento do solo das amostras para cada nível de tensão do ensaio (50 KPa – 100 KPa - 150 KPa – 200 KPa).	74
FIGURA 4. Tempo médio de cisalhamento do solo das amostras para cada nível de tensão do ensaio (50 KPa – 100 KPa – 150 KPa – 200 KPa).	77
FIGURA 5. Desenvolvimento médio das deformações do solo das amostras para cada nível de tensão do ensaio (50 KPa – 100 KPa – 150 KPa – 200KPa).	78
FIGURA 6. Desenvolvimento médio das tensões cisalhantes do solo das amostras para cada nível de tensão normal do ensaio (50 KPa – 100 KPa – 150 KPa – 200 KPa).	80
CAPÍTULO 2	
FIGURA 1. Localização da área experimental no município de Amparo de São Francisco no Estado de Sergipe.	95
FIGURA 2. Processo erosivo em margem de curso d' água, talude verticalizado, recuo da margem e vegetação ciliar incipiente.	96
FIGURA 3. Sequência da técnica de propagação vegetativa: a) Touceira matriz, b) Perfilho padronizado: corte transversal da raiz e em bisel parte aérea, c) Implantação dos perfilhos no substrato, d) mudas de vetiver.	99
FIGURA 4. Ilustração das etapas de implantação da técnica de bioengenharia de solos: (A) Limpeza e retaludamento da área; (B) Enrocamento vegetado com estacas de sabiá; (C) Implantação de bermalongas; (D) Plantio Vetiver.	100
FIGURA 5. Croqui da área experimental.	101
FIGURA 6. Produção de matéria fresca da parte aérea (A) e das raízes (B) do capim vetiver período em função das doses de superfosfato simples.	107
FIGURA 7. Produção de matéria fresca da parte aérea do capim doses de superfosfato simples em função do período.	109
FIGURA 8. Produção de matéria seca da parte aérea (A) e das raízes (B) do capim período em função das doses.	111
FIGURA 9. Produção de matéria seca da parte aérea do capim vetiver no período em função das doses.	112
FIGURA 10. Produção de densidade de raiz do capim vetiver no período em função das doses.	114
FIGURA 11. Produção de densidade de comprimento de raiz capim vetiver no doses em função dos períodos de avaliação.	115
FIGURA 12. Produção de densidade de comprimento de raiz capim vetiver no períodos em função das doses.	116

FIGURA 13. Produção de número de raiz do capim vetiver no períodos em função das doses.	117
FIGURA 14. Produção de superfície externa capim vetiver no doses em função dos períodos de avaliação.	118
FIGURA 15. Produção de superfície externa do capim vetiver do período em função das doses.	119
FIGURA 16. Produção de número de raízes do capim vetiver período em função das doses.	120
FIGURA 17. Produção de comprimento de raíz do capim vetiver no doses em função dos períodos de avaliação.	121
FIGURA 18. Produção comprimento total de raiz do capim vetiver no doses em função dos períodos de avaliação.	122

LISTA DE TABELAS

Página

CAPÍTULO 1

TABELA 1. Coleta de amostras de solos no talude fluvial.	54
TABELA 2. Coordenadas e profundidades das Sondagens a Trado.	55
TABELA 3. Caracterização física da amostra coletadas no talude marginal.	57
TABELA 4. Valores de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP) das amostras analisadas.	60
TABELA 5. Parâmetros físicos das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto nas tensões de 50, 100, 150 e 200 KPa.	65
TABELA 6. Valores da coesão e do ângulo de atrito obtidos no ensaio de cisalhamento direto para as amostras de solo coleta 1 para os quatro níveis de tensões (50 KPa – 100 KPa – 150 KPa – 200 KPa).	67
TABELA 7. Comparativo do ângulo de repouso na base e na meia altura do talude com o ângulo de atrito interno do solo e o movimento de massa desenvolvido nas seções do talude em estudo no período de monitoramento.	72
TABELA 8. Valores da tensão vertical e cisalhante (meia altura e base) desenvolvidos nas cinco seções do talude em estudo.	74

CAPÍTULO 2

TABELA 1. Dados meteorológicos mensal do município de Amparo de São Francisco	97
TABELA 2. Atributos químicos e físicos do solo amostrado a profundidade de 0 a 60 cm, na área experimental antes da implantação dos ensaios.	98
TABELA 3. Análise de variância dos parâmetros morfológicos do capim vetiver em função das doses de fósforo dentro dos períodos de avaliação.	104
TABELA 4. Produção de massa seca da parte aérea e das raízes do capim vetiver no período em função das doses de fósforo.	105
TABELA 5 – Massa fresca da parte aérea e das raízes do capim vetiver em função das doses de superfosfato simples (P_2O_5) no período de 90 dias.	108
TABELA 6. Período de densidade de raízes e densidade de comprimento de raízes do capim vetiver em função das doses de fósforo no período de 90 dias.	110
TABELA 7 – Número de raízes e densidade de raízes do capim vetiver em função das doses de fósforo no período de 90 dias.	112
TABELA 8 – Comprimento da parte aérea e das raízes do capim vetiver em função de doses de fósforo no período de 90 dias.	115
TABELA 9. Relação da massa seca parte aérea e raízes do capim vetiver em função das doses de fósforo no período de 90 dias.	117

LISTA DE QUADRO

Página

CAPÍTULO 2

QUADRO 1. Valores da altura (A) e inclinação do talude (B) nas cinco seções (S-01, S-02, S-03, S-04 e S-05) em estudo no período de monitoramento.

69

RESUMO

ARAÚJO-FILHO, R. N. Comportamento de talude da margem do rio São Francisco submetido à técnica de bioengenharia de solos. 2012. 122p. (Dissertação – Mestrado em Agroecossistemas). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.

O baixo curso do rio São Francisco teve seu comportamento hidrossedimentológico alterado pelas modificações no canal fluvial, através do represamento das águas para implantação de reservatórios de grandes projetos hidrelétricos. Estes impactaram diretamente na estabilidade das margens do rio, demandando ações de mitigação dos processos erosivos resultantes dos movimentos de massa de solo. A bioengenharia de solo, que é uma técnica correta do ponto de vista ecológico e estético, utiliza-se de conhecimentos biológicos para estabilização de encostas de terrenos e margens de cursos de água. O objetivo neste trabalho foi avaliar o comportamento de talude da margem do rio São Francisco por meio de atributos físicos e desenvolvimento do capim vetiver compondo à técnica de bioengenharia de solos. Antes da implantação da biotécnica foram realizadas coletas de amostras indeformadas e deformadas de solo com execução de furos de sondagem a trado até o nível d'água sendo retiradas camadas representativas do talude. Posteriormente, a coleta de amostras foram realizados ensaios laboratoriais possibilitando a caracterização e identificação das propriedades físicas e mecânicas do solo. O sítio experimental estudado está localizado na margem sergipana do baixo curso do Rio São Francisco, apresenta talude verticalizado, recuo de margem, desmoronamento de massa de solo e solapamento da base com ausência de vegetação ripária. Para implantação da biotécnica, na área experimental base do talude foi utilizada a técnica do enrocamento vegetado, com estacas vivas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth) e plantio da gramínea vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L (Roberty) com diferentes doses de fósforo e no topo do talude foram colocados retentores de sedimento Bermalonga®. A granulometria do material do talude se mostrou intimamente relacionada com a suscetibilidade ao processo erosivo e com o comportamento mecânico do mesmo. A atuação dos embates da corrente fluvial permanente em sua base promove diferentes valores de umidade no solo provocando níveis diferentes de densidades que modificam suas propriedades mecânicas desenvolvendo um comportamento dinâmico no solo. Doses de fósforo aplicadas ao capim vetiver e os períodos de desenvolvimento morfológico interagiram nos parâmetros massa seca parte aérea, massa seca raiz, massa fresca aérea, massa fresca raiz, densidade de raiz, densidade de comprimento da raiz, numero de raiz, superfície externa, comprimento parte aérea, comprimento raiz.

PALAVRAS-CHAVE: erosão marginal, recuperação hidroambiental, biotécnica.

Orientador: Francisco Sandro Rodrigues Holanda – UFS

ABSTRACT

ARAÚJO-FILHO, R. N. Behavior of the slope of the São Francisco river subjected to the soil bioengineering technique. 2009. 122p. (Dissertation – Master Program in Agroecosystems). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.

The lower San Francisco river had changed their hidrossedimentological behavior by changes in river channel through the impoundment of water reservoirs for the implementation of large hydropower projects. These direct impact on the stability of river banks, demands actions to mitigate the erosion resulting from soil mass movements. Soil bioengineering, which is a correct technique from the standpoint of ecological and aesthetic, makes use of biological knowledge for slope stabilization and banks of watercourses. The objective of this study was to evaluate the behavior of slope of São Francisco river through physical parameters and development of vetiver grass composing the technique of soil bioengineering. Before the deployment of this biotechnique undisturbed samples of soil were collected and deformed to run the auger boreholes down to the water being removed layers representing the slope. Subsequent to sampling laboratory tests were performed allowing the characterization and identification of physical and mechanical properties of the soil. The experimental site studied was located on the Sergipe side of the lower course of the São Francisco river, has vertical slope, a decrease of margin collapse mass of soil and undermining the base with no riparian vegetation. For deployment of the biotechnique, at the experimental base of the slope technique was used to vegetated riprap with live cuttings of thrush (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth) and planting of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L (Roberty) with different levels of phosphorus and on top of slope sediment retainers were placed Bermalonga ®. The soil texture of the slope is closely related to susceptibility to erosion and the mechanical behavior of the same. The performance of the ongoing struggles of the water flow at its base promotes different values of moisture in the soil causing different levels of densities that change their mechanical properties by developing a dynamic behavior in the soil. The levels of phosphorus and developmental stages morphological parameters interact in shoot dry weight, root dry weight, fresh air, fresh root, root density, density of root length, root number, external surface, shoot length, root length.

Keywords: bank erosion; recovery environmental; biotechnique.

Guidance Committee: Francisco Sandro Rodrigues Holanda – UFS

1 Introdução Geral

Nos últimos anos, uma série de impactos ambientais tem sido relatados no baixo São Francisco como resultantes das sucessivas intervenções humanas. O maior problema ambiental enfrentado no Baixo curso é a erosão das margens do curso d'água, por meio de um modelo de desenvolvimento implantado na região que tem seu equilíbrio dinâmico químico, físico e biológico alterados pelo funcionamento de grandes barragens.

Para os agroecossistemas que estão implantados em regiões ribeirinhas, os efeitos da erosão fluvial podem se tornar um fator de desestabilização da sustentabilidade principalmente em rios cujo ciclo hidrológico foi alterado pela construção de barragens e ocorrem variações bruscas e constantes no regime de vazão, desestabilizando os taludes marginais (HOLANDA et al., 2007).

De acordo com Holanda et al. (2009) esses barramentos são construídos no canal principal do Rio São Francisco, constitui medidas estruturais pelas quais o homem altera as condições naturais do rio. Este por sua vez tem como objetivo garantir um determinado nível regulado de água, assegurando uma profundidade mínima para a navegação, fluxo necessário para a geração de energia elétrica, abastecimento, irrigação.

Com a regularização da vazão do rio, provoca alterações na cota do rio e velocidade de fluxo, intensificando o acelerado processo erosivo, que apesar de esperado, interfere na dinâmica natural do rio buscando um novo equilíbrio dinâmico através do reajuste da morfologia do canal, potencializada ou não pela retirada da vegetação ripária, constituindo um grave processo de degradação ambiental através da exposição dos taludes fluviais instáveis compostos por solos de baixa coesão.

Essas alterações na dinâmica do sistema fluvial ocorrem através do contínuo trabalho de escavação na base da margem côncava, onde a velocidade é maior, e de deposição na parte convexa (CHRISTOFOLETTI, 1981; GUERRA e CUNHA, 2003).

Ou seja, se dá por meio do solapamento da base do talude originado pelo fluxo e refluxo das ondas desencadeando movimentos de massa de solo que levam a interiorização da margem, causando prejuízos às comunidades ribeirinhas como diminuição de renda, redução de área produtiva e aumento nos custos de produção importantes para a sustentabilidade econômica das populações ribeirinhas (HOLANDA et al., 2005).

Como forma de mitigar a erosão acelerada tem levado à adoção de práticas de controle seja a partir do empirismo da população ribeirinha como registro de alternativas adotadas pela população local como forma de proteção das margens ocupadas por agroecossistemas produtivos ou pelo uso de soluções de engenharia, ou mesmo a bioengenharia de solos. Seja naturalmente, ou seja, pela ações antrópicas os rios estão sujeitos a desequilíbrios que podem ser mitigados ou evitados por meio de obras adequadas (HOLANDA et al., 2009).

Um dos métodos utilizados para o controle do movimento de massa de solo para evitar o desmoronamento, é a colocação de material rochoso na base do talude, mas que possibilite a drenagem da água (PENTEADO, 1983). Como definição os enrocamentos são elementos de obras de engenharia utilizadas com fins para o controle da erosão, sendo um, entre vários, métodos de proteção das margens dos rios, também chamado de RSP (Rock Slope Protection) ou riprap (HOLANDA et al., 2009).

Outra técnica utilizada para controle dos processos erosivos em margens de cursos d'água, a bioengenharia de solos é uma alternativa que possibilita a recuperação da vegetação ciliar além de apresentar um custo mais baixo quando comparada às obras da engenharia civil (HOLANDA *et al.*, 2010) sendo largamente usada na estabilização de taludes instáveis.

Esta biotécnica consiste no uso de elementos biologicamente ativo representado pela vegetação, em obras de estabilização de solo e de sedimento conjugados ou não com elementos inertes como exemplo concreto, madeira, ligas metálicas, polímeros, e mantas confeccionadas com fibras vegetais, que são chamadas de geotêxteis ou geomantas e se apresentam ambientalmente sustentável para contenção de erosão dos taludes em suas diversas condições (GRAY e SOTIR, 1996; DURLO e SUTILI, 2005; PHILLIPS e MARDEN, 2006).

Para o controle da erosão em taludes fluviais a vegetação desempenha um importante papel, uma vez que a cobertura do solo com gramíneas ou vegetação herbácea oferece uma das mais eficientes proteções (HENGCHAOVANICH, 1999; DAVIDE *et al.*, 2000; CHENG, 2003). Além disso proporciona aumento da infiltração da água, coesão e da resistência do solo pelo sistema radicular (BURYLO *et al.*, 2009; STOKES *et al.*, 2009).

Com isso têm sido realizados estudos sobre o avanço do processo erosivo desde 1998, a partir dos trabalhos iniciados por Casado (2000), com o monitoramento e

caracterização da erosão na faixa de margem do rio correspondente ao Perímetro Irrigado Cotinguiba/Pindoba (BANDEIRA, 2005). Dando sequência a esses estudos foram desenvolvidas pesquisas abordando a temática do processo erosivo com Santos (2001), Santos, (2002), Fontes (2002), Bandeira (2005), Gomes (2005), Oliveira (2006), Ribeiro (2008), Santana (2008), Rocha (2009) na área do Baixo São Francisco, membros do Grupo de Pesquisa em Gestão Hidroambiental do Baixo São Francisco da Universidade Federal de Sergipe.

Na busca de soluções inovadoras como alternativa para minimizar o problema da erosão acelerada na Bacia do Rio São Francisco, foi adotada a técnica de bioengenharia de solos como ferramenta de auxílio na re-estruturação dos taludes afetados na sua margem direita. Esse trabalho teve como objetivo verificar a aplicação da técnica de bioengenharia de solos na estabilidade de taludes marginais no baixo São Francisco sergipano.

O trabalho está dividido em três capítulos, os quais são descritos a seguir:

O primeiro capítulo consiste na apresentação da problemática da erosão marginal para os agroecossistemas ribeirinhos e a bioengenharia de solos como prática de mitigação dessa forma de degradação ambiental apresenta o Estado da arte a cerca da temática abordada nos capítulos subsequentes, fundamentando as informações identificadas na literatura pertinente.

O segundo capítulo consiste de uma investigação sobre a vulnerabilidade do solo da margem direita do rio São Francisco, importante para a compreensão do comportamento do solo quando submetido às forças de arraste das partículas ocasionadas pela erosão marginal.

O terceiro capítulo aborda a eficiência da adubação fosfatada no desenvolvimento de mudas de capim vetiver como parte das técnicas de bioengenharia de solos e que contribuem para a redução do processo erosivo das margens por meio da avaliação de dados morfológicos da espécie.

2. Referencial Teórico

2.1 Sustentabilidade e Agroecossistema

A idéia de Sistema tornou-se mais evidente a partir dos anos 50, com o fenômeno conhecido como Crise da Ciência. Esta crise surgiu da insatisfação dos cientistas em relação à dificuldade de interação entre as áreas da ciência. Refletiu também o esgotamento do modelo convencional de análise da realidade, baseado nas filosofias de cientistas como Galileu, Descartes e Newton. Através da Teoria Geral dos Sistemas houve uma possibilidade de mudança da visão disciplinar e reducionista para a holística e multidisciplinar (PINHEIRO, 2000).

Para Ricklefs, 2003 um sistema ecológico pode ser um organismo, uma população, um conjunto de populações, um ecossistema ou a biosfera inteira da Terra. Cada sistema menor é subconjunto de um maior, formando assim uma hierarquia de tamanho, cuja complexidade é determinada pela variedade e qualidade das interações existentes entre as partes que o constitui.

Os ecossistemas são sistemas auto-sustentados que incluem os organismos vivos e os elementos inertes (físico-químicos) do ambiente com os quais eles interagem (RAVEN et al., 2001). São sistemas ecológicos complexos e grandes, constituídos muitas vezes por milhares de indivíduos interdependentes, cujas relações garantem a dinâmica, equilíbrio e a sustentabilidade do mesmo, através basicamente de dois aspectos: direcionamento da energia e reciclagem contínua dos materiais. Os elementos básicos que formam um sistema são: componentes, interações entre componentes, entradas, saídas e limites. Qualquer interferência que cause acumulação ou depressão de algum componente de um dado ecossistema é corrigido pelos processos dinâmicos de automação do mesmo, sendo este poder de restauração na maioria das vezes realizados através de processos biológicos (ODUM, 1988).

A compreensão de um ambiente dá-se através da análise de qualquer fenômeno do sistema estudado, tentando entender dessa forma a relação entre as estruturas e funções do mesmo (HART, 1980). Neste sentido, os sistemas são formados por subsistemas e estes, por sua vez, são formados por sub-sistemas menores, e assim sucessivamente.

Os sistemas agrícolas podem ser considerados como subsistemas de sistemas ecológicos. Agroecossistemas são ecossistemas agrícolas que têm como objetivo básico a manipulação dos recursos naturais visando a otimização da captura da energia solar e transferência desta para as pessoas na forma de alimentos ou fibras. Além disso, nos agroecossistemas, o homem é um componente ativo, que organiza e gestiona os recursos do sistema, podendo estar envolvidos também os elementos e/ou fatores externos às unidades de produção, que de uma forma ou de outra influenciam ou mesmo determinam a sua dinâmica, como os setores de apoio técnico ou creditício, o mercado, as indústrias de insumos e de transformação, entre outros (ALTIERI e YURJEVIC, 1991).

Todas as atividades humanas têm conseqüências para o ambiente, em maior ou menor grau, uma vez que interferem nos processos básicos do funcionamento ecossistêmico (fluxo de energia e ciclagem dos nutrientes). Os avanços científico-tecnológicos permitiram melhorias nas condições de vida para uma parte das populações humanas, porém trouxeram algumas conseqüências como o aumento populacional, o qual implica na necessidade de conversão de áreas naturais em grandes pastos ou colheitas. O desafio atual, porém, não gira em torno de apenas produzir grandes quantidades de alimento - e sim de produzir sem levar à estagnação dos recursos naturais (ALTIERI, 1989). Portanto é necessário compreender como funciona um agroecossistema considerando as suas particularidades, sendo necessário o entendimento de diferentes aspectos dentro de um agroecossistema que possuem estrutura dinâmica complexa, oriunda, primeiramente, da interação entre os processos socioeconômicos e ecológicos.

As relações conflituosas entre as atividades agrícolas e o meio ambiente têm levado a pesquisa a uma crescente busca por modelos alternativos e sustentáveis para a agricultura. Na última década, desenvolveu-se o interesse na busca pelo estudo das propriedades dos agroecossistemas que forneçam uma resposta às mudanças ocorridas em um dado sistema, sem perder o enfoque integrado, visando o alcance de uma produção ecologicamente equilibrada, socialmente justa e economicamente viável.

Segundo Marzall (1999), estudar as propriedades de um devido sistema permite ao pesquisador obter informações sobre uma dada realidade, tendo como principal característica a de poder sintetizar um conjunto complexo de informações, retendo apenas o significado essencial dos aspectos analisados. É visto ainda como uma resposta

sintomática às atividades exercidas pelo ser humano dentro de um determinado sistema. Dentre as propriedades do agroecossistemas, destacam-se produtividade, estabilidade, sustentabilidade e equidade que permitem avaliar sistemas que buscam aumentar o bem-estar econômico e os valores sociais dos produtores.

Conway (1987) define produtividade como a capacidade em produzir um determinado produto por unidade de recurso que entra numa área, enquanto estabilidade é definida como a constância da produtividade em face de pequenos distúrbios que podem ocorrer normalmente e de ciclos ambientais. Define ainda sustentabilidade como a capacidade de um agroecossistema manter sua produtividade quando exposta a um grande distúrbio e equidade é definida como a distribuição da produtividade. Além de todas as propriedades citadas anteriormente, Marten (1988) adiciona a autonomia como uma quinta propriedade, esta considerada como a capacidade do agroecossistema manter-se ao longo dos anos independente de oscilações externas.

2.2 Estudo da Bacia Hidrográfica como um Agroecossistema

Antes de dar início ao estudo da bacia hidrográfica do São Francisco é necessário definir o que seria uma bacia hidrográfica. Existem vários conceitos desde o mais simplório, como uma área delimitada topograficamente, drenada por um curso d'água ou um sistema interligado de cursos d'água dispendo de um ponto de saída para qual toda a vazão efluente é descarregada. Entre outras definições mais complexa temos o de Guerra e Cunha 2003 , onde define que é uma área do continente onde a água precipitada drena para uma saída comum ou ponto terminal. Formam-se redes que drenam água contendo material sólido e dissolvido das partes mais altas, que são os limites da bacia, para a mais baixa, que pode ser outro rio de hierarquia igual ou superior, lago ou oceano. Já para Christofolletti, 1999 do ponto de vista ecológico, são sistemas fechados pelo fato de que as entradas, saídas e trocas com outros sistemas, de energia e matéria, formando um ciclo fechado, equilibrado. Dentro de um sistema existem sistemas menores, neste caso, as sub-bacias e micro-bacias. Estes se relacionam ciclos biológicos, químicos e físicos, quando somados são definidos como ecossistemas.

Segundo Flickinger e Neuser (1994), o conceito de agroecossistema pode ser aplicado a bacia hidrográfica, ou seja, o agroecossistema não pode ser entendido como algo pronto definido e sim como uma estrutura que permanece em constante processo

de organização ou reorganização e de mudança. Além disso um agroecossistema não tem tamanho definido depende somente da amplitude do objeto de estudo, podendo ser como exemplos uma fazenda, uma bacia hidrográfica. Agroecossistemas são ecossistemas agrícolas que têm como objetivo básico a manipulação dos recursos naturais visando a otimização da captura da energia solar e transferência desta para as pessoas na forma de alimentos ou fibras. Além disso, nos agroecossistemas, o homem é um componente ativo, que organiza e gestiona os recursos do sistema, podendo estar envolvidos também os elementos e/ou fatores externos às unidades de produção, que de uma forma ou de outra influenciam ou mesmo determinam a sua dinâmica, como os setores de apoio técnico ou creditício, o mercado, as indústrias de insumos e de transformação, entre outros (ALTIERI e YURJEVIC, 1991).

Todas as atividades humanas têm conseqüências para o ambiente, em maior ou menor grau, uma vez que interferem nos processos básicos do funcionamento ecossistêmico (fluxo de energia e ciclagem dos nutrientes). Os avanços científico-tecnológicos permitiram melhorias nas condições de vida para uma parte das populações humanas, porém trouxeram algumas conseqüências como o aumento populacional, o qual implica na necessidade de conversão de áreas naturais em grandes pastos ou colheitas. O desafio atual, porém, não gira em torno de apenas produzir grandes quantidades de alimento - e sim de produzir sem levar à estagnação dos recursos naturais (ALTIERI, 1989). Portanto é necessário compreender como funciona um agroecossistema considerando as suas particularidades, sendo necessário o entendimento de diferentes aspectos dentro de um agroecossistema que possuem estrutura dinâmica complexa, oriunda, primeiramente, da interação entre os processos socioeconômicos e ecológicos.

2.3 Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

A bacia hidrográfica do Rio São Francisco é extensa, considerado o mais longo rio totalmente nacional no Brasil e principal fonte de água de superfície na região nordeste. A sua área, dentro do Estado de Sergipe resultou em 7.276,3 km², ou seja, 33% da área total do Estado. Esta bacia hidrográfica possui uma área de aproximadamente 638.576 Km², corresponde a 7,4% do território brasileiro, abrangendo

parte dos estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Sergipe, Alagoas e Pernambuco além do Distrito Federal. (MASCARENHA, 2008 ; BRASIL, 2004).

Este rio possui 168 afluentes, dos quais apenas 19 são perenes. O Alto e o Médio São Francisco são responsáveis por quase 80% da vazão do rio. Esta bacia, que é fisiograficamente dividida em Alto, Médio, Sub-médio e Baixo São Francisco (Figura 1), abrange uma grande diferença latitudinal, seus 2.700 Km se estendem da latitude 21° S em sua nascente, sudeste do Brasil até 7° S, sua foz na região Nordeste, entre os estados de Sergipe e Alagoas. Os diferentes climas e tipos geológicos configuram diferentes biomas, fisiografia do canal bastante distintas e características hidrológicas peculiares (ANA, 2010).

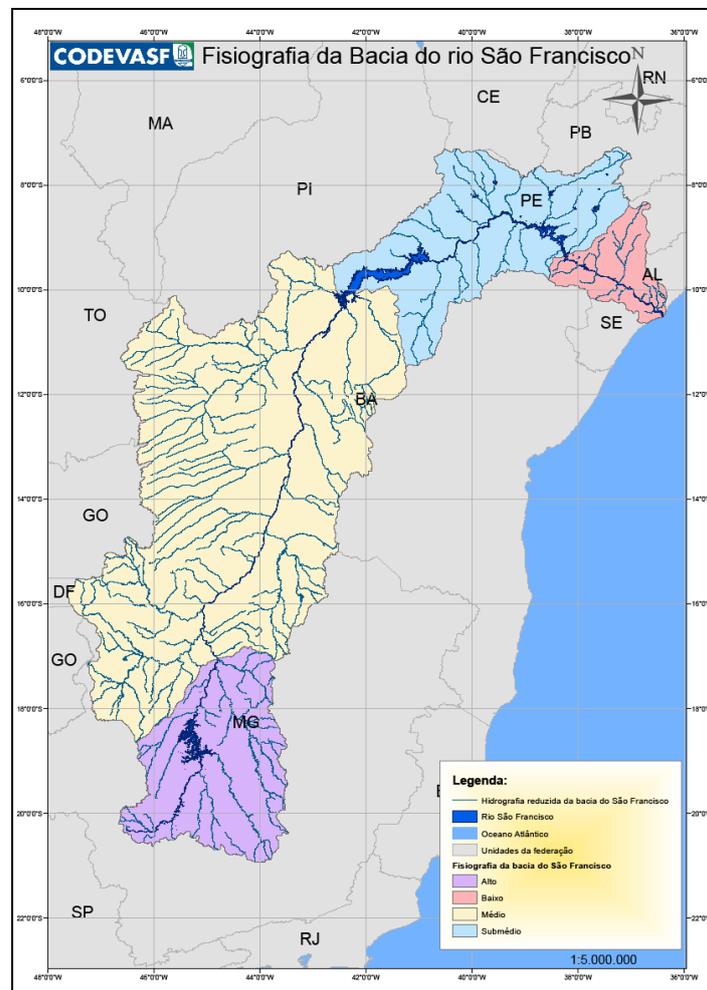


FIGURA 1. Divisão fisiográfica da bacia do Rio São Francisco, CODEVASF (2010).

O Baixo São Francisco estende-se de Belo Monte (AL) à foz, no Oceano Atlântico, compreendendo as sub-bacias dos rios Ipanema e Capivara, estando presente nos Estados da Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. A altitude varia de 200 m até o nível do mar, embora, na periferia, algumas serras atinjam 500 m (MMA, 2006).

Destacam-se a planície costeira com altitude inferior a 100 m e tabuleiros do Grupo Barreiras com altitude entre 100 e 200 m. A temperatura média anual é de 25°C; a evaporação é de 2.300 mm anuais e a precipitação média anual varia de 800 a 1.300 mm. As chuvas ocorrem de março a setembro, ou seja, no inverno, enquanto no restante da bacia as chuvas se verificam no verão (CONEJO, 2003).

Nessa região ocorre, também, uma nítida mudança na distribuição anual das chuvas, que nas proximidades do Oceano se distribuem por todo o ano, embora mais concentradas no outono e inverno, enquanto que, no seu interior, os meses chuvosos são os de verão. A vegetação é de três tipos: Caatinga no trecho mais alto, Mata Atlântica e manchas de Restinga, na região costeira. O clima é considerado tropical semi-úmido. As principais cidades são: Própria e Neópolis, em Sergipe; e Arapiraca e Penedo, em Alagoas.

2.4 Geomorfologia fluvial

O termo geomorfologia fluvial se refere ao estudo das bacias hidrográficas tão como o dos cursos de água, sendo que este último dedica-se aos estudos dos processos fluviais e das formas resultantes do escoamento das águas quando se fala no seu sentido semântico. Guerra e Cunha (2001) afirmam que na ciência geomorfológica é um caráter condicionante da vida humana, a qual depende da larga escala dos rios. Com isso o estudo das bacias hidrográficas, dedica-se aos estudos dos processos fluviais e das formas resultantes do escoamento das águas.

Existem três principais processos geológicos para transformação de um ambiente fluvial: erosão, transporte e sedimentação. Estes ao passar do tempo transformam vales cada vez mais profundos e largos como relatam (CHRISTOFOLETTI, 1981; SUGUIO, 1998; GUERRA e CUNHA, 2001).

Para compreender o funcionamento de um curso fluvial é necessário estudar o seu perfil longitudinal. Este evidencia um declive bastante acentuado no Curso superior de um rio e vai diminuindo à medida que se aproxima da sua foz. O Curso superior,

geralmente, tem maior declividade, onde as águas possuem elevada energia cinética, promovem o predomínio da erosão torrencial que tende a aprofundar o vale. O Curso médio, menos inclinado, tem águas mais calmas e vales mais largos do que no Curso superior, recebendo a contribuição de vários afluentes. Neste trecho, o predomínio é de transporte de sedimentos. E na porção mais baixa do rio, chamada de região sedimentar, possui relevo suave e vales largos, o que permite que as águas sejam calmas, favorecendo a sedimentação (CHRISTOFOLETTI, 1981; SUGUIO, 1998).

Assim os ambientes fluviais são formados e caracterizados por um número de padrões de canais conhecidos de quatro formas meandantes, entrelaçado (“braided”), anastomosado (“anastomosed”) e retilíneo estes podem ocorrer de forma associadas ou não na bacia hidrográfica (GUERRA e CUNHA, 2003).

Para os rios de canais anastomosados caracterizam-se por sucessivas ramificações e posteriores reencontros de seus cursos, separando ilhas assimétricas de barras arenosas. Esses rios caracterizam-se por apresentar canais largos, rápido transporte de sedimentos e contínuas migrações laterais, além de apresentarem grande volume de carga de fundo e gradiente relativamente altos. Os rios de canais meandantes apresentam canais sinuosos, cujas seções transversais, no ponto de máxima inflexão evidenciam um canal assimétrico, bastante profundo e abrupto na margem côncava, ascendendo suavemente na margem convexa. Nesses rios, as cargas em suspensão e de fundo encontram-se em quantidades mais ou menos equivalentes. Possuem fluxo contínuo e regular (BIGARELLA, 2003).

Esses canais fluviais se encontram sempre em busca de seu perfil de equilíbrio, erodindo seus leitos em determinados pontos, transportando sedimentos de um ponto a outro e depositando-os em trechos à jusante. Sem nenhuma intervenção do homem, a tendência natural do rio é erodir à montante e depositar à jusante (PIMENTA, 1981).

2.5 Erosão do solo em margens de cursos d’ água

No manejo de cursos d’água a movimentação de sólidos em meio aquoso é um dos fundamentos para compreender os fenômeno da erosão que constitui-se em três fases desagregação, transporte e sedimentação de massa de sólido. O meio favorável para este transporte dos sólidos são as redes hidrográficas, com base nisso são conhecidas as formas de transporte, constituintes dos materiais e o comportamento do

carreamento das partículas no qual é possível associar técnicas apropriadas mitigar os efeitos prejudiciais (GUERRA et al., 1999; DURLO e SUTILI, 2005).

Diante das condições hidráulicas do curso d'água, juntamente com as partículas de solo (grãos do material) transportados, a erosão das paredes dos canais do rio e do seu respectivo leito é dada pela erodibilidade do solo característico de uma determinada região. A erodibilidade é a propriedade do solo em resistir a erosão, sendo definido como material removido por unidade de área quando demais fatores determinantes da erosão permanecem constante (BRANDT, 2005).

Os condutos livres possuem um escoamento turbulento, com velocidade de fluxo variável ao longo de suas dimensões longitudinal e transversal. Os fenômenos na interface água e sedimentos são muito complexos devido a rugosidade do leito (CORTES, 2004). O fluxo de água e o diâmetro das partículas de solo estão relacionados com a erosão, pois forças hidrodinâmicas podem superar a resistência dos agregados a romper, diminuindo as forças de coesão e peso específico das partículas incorporando essas partículas a velocidade de fluxo, sendo disponibilizado ao transporte (POLLEN e SIMON, 2006).

O conhecimento das características fluviais é extremamente importante no que concerne aos recursos hídricos, tanto do ponto de vista da hidráulica, do controle da erosão, e da qualidade da água. A erosão, transporte e deposição são processos que não podem ser separados. São interdependentes dentro de relações constantemente mutáveis do fluxo e da carga existente. Alternam-se com o decorrer do tempo (ASSIS e MURATORI, 2007).

A degradação ambiental ocorre em toda parte, com maior ou menor intensidade, dependendo das técnicas utilizadas na exploração dos recursos naturais, e a preocupação local com a manutenção desses recursos. Isso tem gerado uma série de danos, não só ao ambiente natural, como aos seres humanos, que têm convivido com toda a sorte de risco (GUIMARÃES, 2004).

Como condição de estabilidade de um curso d'água entende-se o equilíbrio entre a ação do escoamento sobre o leito do rio e a resistência ao movimento (erosão) dos materiais (sedimentos) que o constituem. Este equilíbrio é atingido pela interação entre o escoamento da água e sedimentos provenientes da bacia hidrográfica contribuinte, considerando-se a evolução das seções, traçado e declividades dos cursos de água. O risco advém da suscetibilidade dos solos à erosão e ao tipo de uso que lhes é dado

principalmente nas faixas marginais de preservação permanente (CASADO *et al.*, 2002; HOLANDA *et al.*, 2005).

O propósito fundamental da estabilização e proteção de margens de cursos d'água, sob o ponto de vista hidráulico, é manter a seção do curso d'água estável e dentro dos limites estabelecidos para sua utilização, seja como via de navegação (proteção de portos, ancoradouros e acesso a eclusas), componente de um sistema de drenagem (proteção de pistas de tráfego junto às margens, pontes, encontros e acessos), aproveitamento hidrelétrico (proteção de tomadas d'água e estruturas de descarga) ou abastecimento de água (proteção de propriedades às margens do curso d'água) (BRIGHETTI e MARTINS, 2001).

A erosão marginal, como componente da erosão fluvial, é uma variável da dinâmica dos cursos d'água, definida como o “reco linear das margens”, devido à remoção dos materiais do barranco (talude) pela ação fluvial (correntes, ondas) ou por forças de origem externa (precipitação).

Bandeira (2005), afirma que os cursos d'água se encontram sempre em busca do seu perfil de equilíbrio, erodindo seus leitos em determinados pontos, transportando sedimentos de um ponto a outro e depositando em trechos à jusante.

As grandes barragens e formação de grandes reservatórios construídas nos canais fluviais, na medida em que estabelecem um novo regime hidrosedimentológico, induzem a um novo comportamento morfodinâmico para o rio, considerado como as responsáveis primárias pela atual fase de erosão marginal acelerada e de disseminação de focos erosivos (BANDEIRA, 2005).

A retenção de sedimentos promovida pelas barragens pressupõe uma descarga líquida mais leve, conseqüentemente, com maior energia, o que acentua o processo de erosão marginal e no leito do rio, se constituindo em uma resposta do sistema fluvial às alterações hidrosedimentológicas do canal devido aos efeitos geomorfológicos à jusante das barragens (GUIMARÃES, 2004)

Segundo Fontes (2002), após a construção da barragem de Sobradinho (BA), no Sub-médio São Francisco, foram iniciadas as mudanças sócioambientais no Baixo São Francisco. As barragens causaram entre outros impactos, modificações na hidrologia e na geomorfologia dos canais. Santos (2002) relatou que outro problema de grande relevância, proveniente da construção da barragem da Usina Hidrelétrica de Xingó, em 1994, foi a acentuação da erosão dos taludes das margens do rio, conseqüência da

destruição de grande parte dos diques de proteção.

Obras de engenharia em canais fluviais possuem a particularidade de não só afetar a área de influência direta, mas também o ambiente de toda a bacia hidrográfica. A construção de uma grande estrutura de engenharia representa um impacto localizado de grande magnitude sobre o vale do rio, e, mais do que isto, representa a deflagração de uma reação em cadeia de outros impactos. Estas modificações no meio ambiente, sem dúvida, são de naturezas distintas e não ocorrem com a mesma intensidade, variando de um local para outro (FONTES, 2002).

A modificação brusca no regime hídrico e a alteração no comportamento de descarga e transporte da carga sólida de um rio têm contribuído para um forte desequilíbrio, gerando impactos ambientais em todo o vale como a aceleração da erosão nos taludes marginais (SANTOS, 2002). Bandeira (2005) afirmou que entre os problemas ambientais do baixo curso do Rio São Francisco, resultante da intervenção antrópica, a erosão na sua margem se destaca pela sua visibilidade, amplitude, distribuição e conseqüências sócio-econômicas, associada ao assoreamento do leito do rio e à devastação da mata ciliar para o cultivo das terras próximas às margens.

Segundo Oliveira (2006), para os agroecossistemas que estão implantados em regiões ribeirinhas, os efeitos da erosão fluvial podem se tornar um fator de desestabilização da sustentabilidade principalmente em rios cujo ciclo hidrológico foi alterado pela construção de barragens e ocorrem variações bruscas e constantes no regime de vazão, desestabilizando os taludes marginais. Bandeira (2005) comentou que a erosão marginal tem destruído no baixo São Francisco os diques de proteção contra as cheias, casas, obras de engenharia e estradas, diminuindo a área dos perímetros irrigados e de faixas de terra agricultáveis, implicando na perda de produção agrícola e piscícola, decréscimo da produtividade, inundação de povoados e ônus extras com obras de infra-estrutura. A manifestação mais drástica dos processos erosivos vem ocorrendo na foz do rio, onde o recuo da margem levou à destruição do povoado Cabeço.

2.6 Estabilidade de taludes

No processo de remodelagem das paisagens naturais, os fatores geomorfológicos atuam de maneira, interna e externa, como transformadores do relevo local, podendo

levar à degradação do meio ambiente, seja pela erosão em taludes de estrada ou fluviais (ROSA e DURLO, 2009).

Para Zea Huallanca (2004) e Xia et al., (2008) a estabilidade de taludes é fornecida pela relação entre as forças atuantes no solo e os parâmetros que condicionam a sua resistência. Todavia, características intrínsecas e extrínsecas dos terrenos influenciam na susceptibilidade dos solos aos deslizamentos. Coronado (2006) relata que a topografia, geologia, geomorfologia, presença de vegetação, hidrologia e clima são classificados como fatores de interferência nas encostas, visto que esses influenciam em parâmetros como declividade e tensão cisalhante, propriedades físicas, mudanças na paisagem, conteúdo de água no solo e regime climático e de águas subterrâneas respectivamente.

A atividade antrópica também interfere na estabilidade dos taludes, desempenhando um papel deflagrador, ou seja, de atuação direta na dinâmica de deslizamentos em encostas através da retirada da vegetação, mudanças na topografia e nas condições de umidade dos taludes. Terzaghi (1952) classifica os fatores de estabilidade como internos, externos e intermediários, onde os internos são definidos como os fatores que reduzem a resistência ao cisalhamento do talude, os externos são os fatores que alteram o estado de tensões sobre o solo provocando um acréscimo nas tensões cisalhantes, e os intermediários são os fatores que não se enquadram nas classes citadas anteriormente.

Quando as forças atuantes no solo são superiores à sua estabilidade, ou seja, à resistência do solo ao cisalhamento, inicia-se o processo de desprendimento de massa de solo, e conseqüentemente o processo erosivo (XIA et al., 2008).

A resistência do solo ao cisalhamento pode ser definida como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura ou tensão de cisalhamento no plano em que a força atua (SILVA e CABEDA, 2005; VENTURA, 2009). Essa resistência é influenciada diretamente pelo ângulo de atrito interno e pela coesão, sendo esses parâmetros determinados por propriedades e atributos dos solos (SILVA et al., 2004; BRAIDA et al., 2007; XIA et al., 2008), onde em solos arenosos a resistência ao cisalhamento é influenciada basicamente pelo nível de compactação (destruição da estrutura), pelo atrito entre as partículas do solo e pela distribuição diamétrica dos grãos, e em solos argilosos essa resistência dependerá, além do atrito entre as partículas, da estrutura e da coesão do solo.

Muitas equações são propostas para determinação da resistência do solo ao cisalhamento, entre elas está a equação de Coulomb ($\tau = c + \sigma_n \text{tg}\Phi$) onde: τ é a tensão máxima cisalhante suportada pelo solo (kPa); c é o intercepto de coesão do solo (kPa); σ_n é a tensão normal aplicada (kPa); e Φ é o ângulo de atrito interno do solo ($^\circ$) (ROCHA et al., 2002; SILVA et al., 2004; SILVA e CABEDA, 2005; SILVA e CARVALHO, 2007, PARKER et al., 2008).

Silva e Carvalho (2007) definem a coesão como o resultado da força de atração apresentada pelas superfícies das partículas do solo e da tensão superficial da água nos microporos, levando à aproximação entre as partículas sólidas. Além disso, Rocha et al., (2002) afirmam que essa pode ser influência pela densidade do solo, pelos teores de umidade (SILVA e al., 2004), de óxidos de Fe, Al e Si (SILVA e CARVALHO, 2007) e de argila (AL-SHAYEA, 2001; SILVA e CABEDA, 2005), onde o aumento dos teores de argila em camadas subsuperficiais pode aumentar a coesão. A coesão pode ser dividida em coesão específica e coesão aparente, onde a primeira é resultado do efeito dos agentes cimentantes, como os teores de óxidos de Fe e Al e de argilas silicatadas, e a segunda é definida como o resultado da tensão superficial da água nos poros do solo, formando meniscos capilares de água entre as partículas do solo diminuindo a distância que as separa sendo normalmente atribuída aos solos não saturados (PARKER et al., 2008)

O ângulo de atrito interno representa as características friccionais entre os sólidos que compõem o solo e é definido como o ângulo que a força normal faz com a resultante das outras forças que atuam no talude, sem que haja o desprendimento de massa no plano de ruptura (ROCHA et al., 2002; SILVA e CARVALHO, 2007). Esse parâmetro é influenciado diretamente pelo teor de umidade do solo, granulometria das partículas e pelo tipo de argilomineral. Silva e Cabeda (2005), Braidá et al., (2007) e Xia et al., (2008) observaram uma redução significativa nos valores de ângulo de atrito interno com o aumento dos teores da fração argila, de matéria orgânica e do conteúdo de água no solo, respectivamente.

A estabilidade de um talude pode ser aferida através do Coeficiente ou Fator de Segurança (CS ou FS), onde esse parâmetro varia em relação à condição do talude, e pode ser definido como a relação entre a resistência ao cisalhamento do solo (S) e a tensão cisalhante atuante (τ), podendo ser obtida através da equação: $F = S / \tau$. Para que o cálculo do Fator de Segurança seja realizado é necessário que se estabeleça uma

superfície de ruptura do solo, ou seja, a superfície por onde se dará o processo de desprendimento de massa, sendo essa dependente do perfil do solo que compõem o talude e de sua formação geológica (PIMENTA JÚNIOR, 2005). A vulnerabilidade dos taludes aos deslizamentos é influenciada pelo Índice de Plasticidade, onde esse pode ser obtido através da diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP). O primeiro representa, indiretamente, a resistência do solo ao cisalhamento a um determinado teor de umidade e o segundo representa o teor de umidade mínimo onde a coesão entre as partículas é baixa ao ponto de impossibilitar a deformação, porém suficientemente alta para garantir a forma adquirida pela amostra (SOUZA et al., 2000).

2.7 Caracterização física dos solos

A utilização dos atributos físicos dos solos como parâmetro no estudo das qualidades de um solo desempenha papel importante devido aos baixos custos e metodologias rápidas e simples, que permitem uma relação direta com os atributos químicos e biológicos (MENDES et al., 2006). No obstante o conhecimento destes atributos físicos como estrutura, agregação, densidade e granulometria, além de suas relações intrínsecas, é de importância ímpar para um melhor entendimento dos processos erosivos que atuam em taludes e para geração de conhecimento com o intuito de aumentar a estabilidade dos mesmos.

A estrutura do solo pode ser definida como a posição relativa das partículas primárias que o compõem, umas em relação às outras, presentes em unidades estruturais compostas, onde a classificação é feita com base na forma, desenvolvimento e tamanho das partículas (AMARO FILHO et al., 2008,). Quando essas partículas passam por processos conhecidos como floculação e cimentação há formação de estruturas chamadas de agregados. Em solos cultivados a formação de agregados estáveis se dá através dos agentes cimentantes presentes no solo e permite que haja maior infiltração de água (LIMA e ANDRADE, 2001) reduzindo as perdas por erosão eólica e hídrica.

Em taludes marginais a estabilidade de agregados pode conferir agregação ao solo provocando mudanças na inclinação do ângulo de atrito interno e nos valores de coesão, o que pode levar a uma maior resistência do talude ao desmoronamento (ROCHA, 2009). A presença de vegetação num talude contribui para a formação de agregados mais estáveis por meio do sistema radicular e durante o processo de

evapotranspiração que retira o excesso da superfície terrestre em forma de vapor (LIMA et al., 2003). Com o aumento da estabilidade dos agregados há uma elevação da coesão entre as partículas do solo proporcionando.

A densidade é definida como a relação existente entre a massa de uma amostra de solo e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros, onde essa pode ser utilizada na determinação dos teores de umidade do solo (MENDES et al., 2006), além de influenciar nos parâmetros: porosidade e penetrabilidade (MILLÁN ROMERO, 2007); velocidade de infiltração (TAVARES-FILHO, et al., 2006); e erodibilidade de um solo (LIMA e ANDRADE, 2001).

A densidade é dependente de fatores pedogenéticos, em ambientes não cultivados, e da atividade antrópica (HAMZA e ANDERSON, 2005) e pode ser afetada pelo conteúdo de água de um solo devido ao aumento do efeito lubrificante entre as partículas sólidas, o que leva a um maior distanciamento entre as mesmas. Solos que apresentam altos valores de densidade aparente possivelmente apresentarão menor porosidade, além de apresentar baixos valores de penetrabilidade, afetando diretamente as trocas gasosas que ocorrem no perfil do solo, e o desenvolvimento da vegetação devido à resistência oferecida ao crescimento do sistema radicular das plantas respectivamente, o que pode levar a uma maior concentração das raízes de algumas plantas em camadas mais superficiais do solo, como observado por Reinert et al., (2008).

No entanto, Normaniza e Barakbah (2006), analisando cinco taludes diferentes, não observaram relação significativa entre a penetrabilidade e a densidade de comprimento de raízes. Com efeito, uma forma de manutenção dos atributos físicos dos solos, principalmente em taludes, é a conservação da cobertura vegetal, visto que essa atua diretamente no processo de estruturação dos solos através do aporte de carbono orgânico na forma de serrapilheira, além do aumento na resistência do solo ao cisalhamento proporcionado pelo sistema radicular, o que pode contribuir para a redução da erosão marginal (NORMANIZA e BARAKBAH, 2006; NORMANIZA et al., 2008; MICKOVSKI e VAN BEEK, 2009; YAO et al., 2009; OSTERKAMP e HUPP, 2010).

Para Braida et al., (2007) alterações provocadas em atributos físicos do solo como estrutura e densidade podem provocar modificações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Ademais, os teores de umidade no solo podem afetar indiretamente à resistência ao cisalhamento de um solo devido às variações nos valores de coesão e de ângulo de atrito interno em diferentes teores de umidade (XIA et al., 2008; YAO et al., 2009; FENG et al., 2011). Silva e Carvalho (2007) observaram que em baixos potenciais hídricos houve maior desenvolvimento dos valores de coesão com o aumento dos valores de densidade do solo devido à maior proximidade das partículas sólidas. Por outro lado, quando os taludes marginais apresentam elevados teores de umidade eles estão mais susceptíveis à erosão, uma vez que a água provoca um efeito lubrificante entre as partículas sólidas do solo provocando o afastamento entre os constituintes do solo além da diminuição da altura crítica vertical devido ao aumento do peso específico do solo quando úmido (PARKER et al., 2008). O conteúdo de água no solo, além de afetar a resistência ao cisalhamento, pode alterar, de maneira inversamente proporcional, a resistência à penetração dos solos (MILLÁN ROMERO, 2007), onde esse potencial será influenciado pela granulometria do solo.

Amaro Filho et al. (2008) explicam que inicialmente a palavra textura significava somente a sensação, perceptível pelo tato, que um determinado material apresenta ao ser deslizado entre os dedos, ou seja, um atributo puramente qualitativo. No entanto, com o passar dos anos diversos autores passaram a tratar textura e granulometria como sinônimos e assim, o termo textura passou a ser relacionado com a quantificação dos tamanhos das partículas presentes no solo. Para Vieira (2007) a textura é um dos atributos físicos mais estáveis do solo e depende principalmente do material de origem e dos fatores naturais de formação do mesmo, ou seja, qualquer mudança na textura do solo ocorre devido à diversificação do material de origem ou durante seu processo de formação.

No entanto, a erosão pode provocar leves variações nas frações granulométricas nas camadas mais superficiais de um solo, especialmente em locais que estejam constantemente submetidos à dinâmica deposicional. O diâmetro das partículas, ou seja, a granulometria é classificada em vários sistemas, dos quais a SBCS (Sociedade Brasileira de Ciência do Solo) utiliza a classificação do ISSS (Sociedade Internacional da Ciência do Solo), em que os diâmetros das partículas variam de 0,02 mm a 2,000 mm, podendo ser classificados como: argila, silte, areias e cascalho (AMARO FILHO et al., 2008).

Os teores de silte e argila desempenham papel importante na estabilidade de taludes marginais e podem ser usados para determinar indiretamente a resistência do solo à erosão (JULIAN e TORRES, 2006).

Em taludes marginais, solos que apresentam textura mais fina, ou seja, com predominância de partículas com diâmetro menor, podem resistir mais ao processo de erosão marginal do que solos que apresentam uma textura mais grosseira, com predominância de partículas com diâmetro maior (COUPER, 2003; XIA et al., 2008). Isto ocorre devido à maior coesão entre as partículas de solo, do contrário, solos com elevados teores de areia, estarão mais sujeitos à erosão (WEBB e STRONG, 2011). Braida et al., (2007) trabalhando com um solo franco arenoso observaram que baixas pressões normais eram suficientes para provocar o cisalhamento devido à maior fração de areia presente no solo.

Em margens de rio, predominantemente são encontrados NEOSSOLOS FLÚVICOS que possuem altas frações de areia, o que favorece o processo erosivo, intensificando o recuo das margens (CASADO et al., 2002). Esta classe de solo compreende solos com minerais rudimentares, pouco evoluídos, formados de depósitos aluviais recentes, de tal ordem que apresentam como horizonte diagnóstico apenas o A, seguido de uma sucessão de camadas estratificadas sem relação pedogenética entre si, e de classes texturais distintas.

Os Neossolos Flúvicos típicos são relativamente fáceis de identificar, pois apresentam estratificação bem distinta e estão ainda sujeitos a deposições periódicas, o que é muito importante na sua identificação. A feição mais importante a considerar na identificação desses solos é a ausência de horizonte diagnóstico de subsuperfície. Apresentam um horizonte A, assentado diretamente sobre o horizonte C, composto dos estratos das deposições sedimentares.

São caracteristicamente muito variáveis a pequenas distâncias, tanto na horizontal quanto na vertical, necessitando de um número maior de amostras a fim de caracterizá-los adequadamente. São, portanto, solos que apresentam um horizonte diagnóstico de superfície seguido de uma sucessão de camadas estratificadas. A seqüência de horizontes e, ou camadas é do tipo A, C ou A, 2C, etc, geralmente bem diferenciadas, cuja soma de espessuras normalmente ultrapassa um metro. As cores do fundo mais comuns dos estratos variam de bruno-amarelado até bruno acinzentado,

podendo compreender ou não mosqueados. As texturas são muito variadas, havendo maior predomínio da faixa média para a argilosa, com elevado teores da fração silte.

Os solos Neossolos Flúvicos, em quase todo o mundo, São considerados de grande potencialidade agrícola, mesmo aqueles com baixa saturação de bases, tendo em vista a posição que ocupam na paisagem, ou seja áreas de várzeas, pouco ou não sujeitas à erosão, onde a mecanização agrícola pode ser praticada de maneira intensiva. Raros são os casos desses solos ocuparem áreas contínuas apreciáveis, pois estão restritos às margens dos cursos d'água, lagoas e planícies costeiras onde geralmente ocupam pequenas porções de várzeas.

As principais limitações decorrem de problemas de: permeabilidade lenta dos solos com textura muito fina; riscos de inundações e drenagem superficial dificultada devido ao relevo plano; e níveis de sodicidade e, ou salinidade elevados nas camadas superficiais (HOLANDA, 2000).

2.8 Morfologia e resistência das raízes

As raízes das plantas exercem a função de estabilização das partículas do solo por diversos mecanismos como o aumento da resistência ao cisalhamento, promovida especialmente pelas radículas, que mantém maior relação superfície/volume radicular, e com a estabilização de movimentos de massa pelo efeito das raízes, especialmente as pivotantes, que atuam de maneira semelhante à “tirantes vivos”, promovendo o acoramento de grandes massas de solo (COELHO e PEREIRA, 2006)

Esses são exemplos desse potencial, a capacidade de resistência das raízes a forças de tração e corte a capacidade de resistência a fortes solicitações mecânicas, a capacidade de consolidar o terreno e a capacidade de criar um solo estruturado, nomeadamente conferindo-lhe uma maior capilaridade e permeabilidade. São principalmente estas as características, que fazem das plantas agentes importantes no controle de fenômenos erosivos (queda de blocos de pedra, deslizamentos, movimentos nas camadas superficiais do solo, etc.) (MARTINHO, 2005).

O aumento da resistência do solo é desenvolvido pela transferência direta das tensões de cisalhamento para resistência das raízes à tensão, promovendo redução da erodibilidade e aumento de estabilidade do solo.

Segundo Martinho (2005) esse efeito é denominado reforçamento radicular e pode variar em função de fatores como: valores de resistência à tensão das raízes, propriedades de interface entre as raízes e o solo, concentração, características de ramificação e distribuição de raízes no solo-arquitetura radicular, 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.

A vegetação diminui o impacto da gota da chuva no solo, aumento de quantidade de água infiltrada e diminuição do run-off (massas de água em movimento), conseqüentemente diminui a ação da erosão.

A principal limitação da utilização das plantas como material de construção vivo reside no tempo que é necessário ao desenvolvimento do aparelho radicular (Figura 2). Nesse período a resistência da obra é assegurada pela utilização de materiais inertes (troncos mortos, pedra, pregos, arames, etc.) (AIPINI *et al*, 2002).

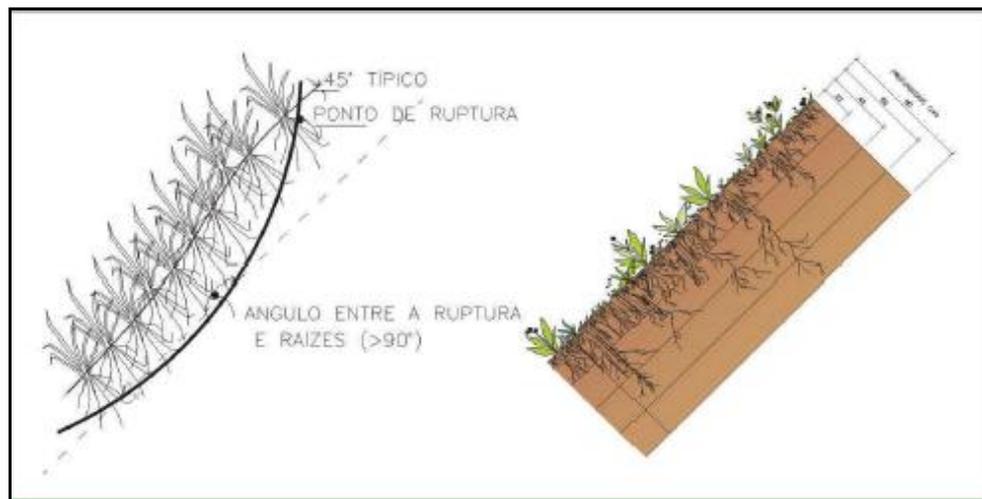


FIGURA 2. Efeito da vegetação na estabilidade de taludes (Fonte: PEREIRA, 2006).

A vegetação exerce resistência ao corte devido à estabilização mecânica do terreno, exercida pelas raízes; ao aumento da coesão capilar por via da evapotranspiração (a vegetação evapotranspira uma grande quantidade de água presente no solo, aumentando a coesão entre as partículas do solo e o ângulo de atrito); à criação de agregados de partículas de solo, derivados de secreções das raízes e da atividade dos microrganismos (Figura 3).

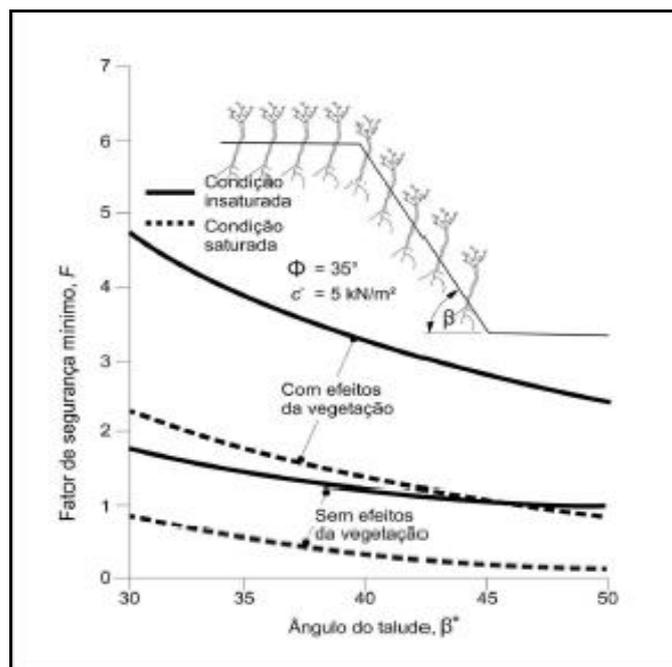


FIGURA 3. Efeito da vegetação na estabilidade de taludes (Fonte: PEREIRA, 2006)

O sistema radicular da vegetação ciliar, além de dificultar o cisalhamento do solo, forma uma rede de canais que permitem a interação da vazão com a margem, ou seja, a água fluvial consegue percolar no solo marginal, reduzindo a taxa de erosão e permitindo, conseqüentemente, a estabilização da margem (DAVIDE *et al.*, 2000).

Estudos de Brugger *et al.* (2005) revelam que a presença da vegetação provoca um retardo e uma distribuição em tempo mais prolongado de precipitações intensas. A vegetação está continuamente retirando água do solo através das raízes e devolvendo para a atmosfera através da transpiração. A vegetação quando natural possui no solo uma camada de vegetação rasteira e matéria orgânica em decomposição, o que evita a erosão decorrente da queda da chuva diretamente sobre o solo. Esta camada também é bastante porosa e permeável, favorecendo o fluxo subsuperficial, diminuindo o escoamento superficial, que é responsável pela erosão.

2.8 Formas de controle da erosão em margens de cursos d'água

O controle e recuperação de margens de um curso d'água submetido a processos erosivos é um trabalho bastante complexo devido à sua dinâmica hidrosedimentológica, especialmente margens desflorestadas e com solos pouco coesivos, onde o processo de

erosão é mais intenso. Em margens de rios de grande, médio ou pequeno porte, o controle da erosão assume peculiaridades que devem considerar aspectos geomorfológicos, geotécnicos e sociais face à forma de uso e ocupação dessas áreas, pelas populações locais.

No Baixo São Francisco foi possível identificar diversas formas de controle da erosão marginal, entre elas temos o uso de enrocamentos, embora apresentem uma boa eficiência no controle da erosão, são bastante onerosas, impossibilitando o seu uso de forma ampla em toda a margem do rio, e o uso da bioengenharia de solos é tecnicamente eficiente e economicamente viável, menos agressiva ao ambiente e que promove o envolvimento das populações ribeirinhas na sua implantação e condução.

Como registro de alternativas adotadas pela população local na proteção das margens as práticas empíricas são utilizadas de caráter emergencial para o controle da erosão em agroecossistemas produtivos. Independentemente da atuação dos órgãos públicos no controle da erosão, a população ribeirinha, preocupada com o avanço das águas do rio sobre suas terras, tem procurado amenizar a degradação das suas terras por meio de soluções que utilizem materiais de baixo custo ou mesmo que compõem descartes de uso cotidiano (HOLANDA et al.,2009).

Os materiais mais utilizados para esse tipo de ação têm sido palha de coqueiro, sacos de areias, borracha de câmaras de ar entrelaçada e pneus usados. Embora sejam tentativas que buscam resolver o problema que demanda uma solução imediata é importante destacar os conseqüentes riscos ambientais. Fenner; Clarke (2003) apresentam resultados que mostram que o fator limitante para o uso de pneus em situações como estas é a liberação de metais pesados como cádmio, níquel e zinco (HOLANDA et al.,2010).

2.8.1 Bioengenharia de solos

As técnicas de bioengenharia de solos são antigas, originadas na civilização sumária e romana (SILVA, 2008). Na Europa, os primeiros trabalhos referentes a esta técnica, tradicionalmente empregada no controle dos processos erosivos em morros e encostas, datam do século XVII (SUTILI et al., 2004). O sucesso desta técnica torna uma alternativa cada vez mais atraente para as abordagens tradicionais de engenharia, que muitas vezes são muito mais caros para construir e sustentar (MING-HAN e

EDDLEMAN, 2002). Embora os projetos de bioengenharia de solos sejam inicialmente caros devido a replantios, reparos e acompanhamento. O custo da manutenção será significativamente menor ao longo do tempo devido a sua resiliência e autosustentabilidade (ALLEN e JAMES, 1997).

Existem várias terminologias dentre estas temos a técnica a bioengenharia de solos, engenharia biotécnica e engenharia ecológica que são bastante comentadas e confundidas, mas apresentam a mesma definição (Morgan e Rickson, 1995). Esta biotécnica é usada para conter erosões em margens de cursos d'água, que ganha espaço pela menor agressividade no que diz respeito às alterações paisagísticas, é a bioengenharia de solos. Ela consiste no uso de elementos biologicamente ativos, representados pela vegetação e se apresenta ambientalmente sustentável para contenção de erosão dos taludes em suas diversas condições de declividade, granulometria e composição, inclusive para margens de corpos d'água como reservatórios, canais de irrigação e rios em obras de estabilização de solo e de sedimentos, conjugados com elementos inertes como concreto, madeira, ligas metálicas, polímeros, e mantas confeccionadas com fibras vegetais, que são chamadas de geotêxteis ou geomantas (GRAY e SOTIR, 1996).

A bioengenharia de solo é uma técnica importante para tratamento de locais instáveis e em processo erosivo, devido as suas características ambientais e paisagísticas desejáveis, tanto no restabelecimento da vegetação natural, com também nos benefícios ao ecossistema, aumento da diversidade da flora e surgimento de fauna.

Essa técnica baseia-se em critérios mecânicos, biológicos e ecológicos para a proteção do solo em áreas afetadas pela erosão e movimento de massa de solo superficial (CAMPBELL et al., 2008), para assim reduzir os problemas ambientais de erosão e proporcionar a estabilização de encostas e margens de curso d'água (LEWIS, 2000). A técnica também proporciona o aumento da resistência do solo em diversas condições de declividade e granulométrica (DURLO e SUTILI, 2005), em obras de estabilização de solos e sedimentos (SUTILI, et al, 2004) e obras para restabelecer a vegetação (USDA–NRCS, 2007).

Segundo (Gray e Leiser, 1982) esta biotécnica apresentam algumas limitações principais como: deficiência no crescimento das espécies vegetais utilizadas devido aos animais que se alimentam das mesmas. Apesar dessas limitações, a bioengenharia de solos oferece várias vantagens em relação abordagens tradicionais .Algumas destas

vantagens incluem: eficácia do custo, compatibilidade ambiental, materiais de origem natural.

O solo estabilizado e os materiais vegetais auxiliam no desenvolvimento da cobertura vegetal, para garantir a sucessão ecológica natural, facilitado pela degradação dos materiais bio e fotodegradáveis utilizados nesta técnica (JONES e HANNA, 2004). A combinação de práticas de engenharia com critérios ecológicos tem efeito imediato, além de promover uma estruturação do solo em longo prazo que possibilita o desenvolvimento da vegetação na área.

Gray e Sotir (1996) descrevem os mecanismos primários da bioengenharia de solo para estabilização do solo como o reforço do solo com tensão das fibras das raízes, o aumento da resistência ao cisalhamento por redução da pressão dos poros através da transpiração e a ancoragem do talude através da penetração de raízes profundas em solo mais estável.

Venti et al. (2003) descreve detalhadamente os principais objetivos (tecnológicos, ecológicos, econômicos e estéticos) da bioengenharia de solo. Os objetivos tecnológicos são: proteção superficial do solo contra o processo erosivo, redução da velocidade do fluxo ao longo do talude, aumento da coesão superficial e profunda e estabilização do solo. Os ecológicos são: melhoria do regime hídrico, infiltração e capacidade de retenção hídrica, drenagem do solo, melhoria a fertilidade do solo e disponibilidade de nutrientes, recomposição da vegetação natural, melhoria dos atributos físicos do solo pelo sistema radicular e aumento da biodiversidade. Os econômicos são: redução dos custos de implantação e manutenção. Já as funções estéticas são: integração de estruturas e matérias com a paisagem e estabilização e controle de processos erosivos que modificaram a paisagem, por causas naturais ou antrópicas.

2.8.1.1 Enrocamento de Pedras (Rip Rap)

No baixo curso do rio São Francisco medidas para este controle do processo erosivo tem sido tomadas por meio da utilização de enrocamentos de pedras, rock slope protection (RSP). De acordo com Holanda (2009) os enrocamentos são maciços de pedras destinados a proteger as margens do rio dos efeitos da erosão.

Os enrocamentos são obras de engenharia usadas para o controle da erosão,

sendo um, entre vários, dos métodos de proteção das margens dos rios, também chamado de RSP (Rock Slope Protection) ou “riprap”. Consiste em uma ou mais camadas de pedra que são colocadas ao longo das margens do rio ou beirando mares e lagos como forma de prevenir a erosão. Cada camada é graduada de acordo com porcentagens especificadas, dentro de padrões de tamanhos variados. Os enrocamentos são flexíveis e as rochas podem se mover para posições mais estáveis pela força do fluxo da água, ações das ondas ou da gravidade, sem necessariamente comprometer a estabilidade de todo o talude, e o solo pode naturalmente preencher os vazios entre as rochas (RACIN *et al.*, 2000).

Para Teixeira (2006) os enrocamentos ou rip-raps consistem no simples revestimento de taludes com pedras ou blocos artificiais, objetivando a formação de um maciço de pedras arrumadas ou jogadas; ou blocos arrumados, destinados a proteger aterros, encostas, taludes, margens de rios, dos efeitos da erosão.

A estabilidade dos enrocamentos é função de diversos aspectos, tais como a velocidade de escoamento, as condições de turbulência do fluxo e as propriedades físicas das rochas (TEIXEIRA, 2006). A espessura do revestimento e as dimensões das rochas devem ser planejadas para resistir ao movimento causado pela correnteza e evitar a erosão do solo da base (BRIGHETTI e MARTINS, 2001).

Os enrocamentos quando submetidos a uma variação de tensões, sofrem transformações estruturais devida ao deslocamento, rotação e quebra de partículas. Para ter em conta estas variações e a sua influência nas características de deformação e resistência é necessário estudar a distribuição das forças de contato e os fundamentos da quebra de partículas (CRUZ, 1982). Com isso espessura do revestimento e as dimensões das pedras devem ser tais que resistam ao movimento causado pela correnteza e evitem a erosão do solo da base (BRIGHETTI e MARTINS, 2001).

A utilização do enrocamento (rip-rap) na base do talude favorece a estabilização deste, pois diminuirá o impacto causado pelo fluxo e refluxo das ondas e ventos na base do talude, evitando assim a ocorrência do solapamento de base. Com o talude estável, a vegetação implantada terá melhor condições de desenvolvimento, evitando a ocorrência da erosão marginal.

A estabilidade dos enrocamentos é em função de diversos aspectos, tais como a velocidade de escoamento, as condições de turbulência do fluxo e as propriedades físicas das rochas (TEIXEIRA, 2006). A espessura do revestimento e as dimensões das

rochas devem ser planejadas para resistir ao movimento causado pela correnteza e evitar a erosão do solo da base (BRIGHETTI e MARTINS, 2001).

Os revestimentos das margens com enrocamentos são caracterizados como uma medida emergencial para a contenção da erosão nos taludes do rio (HOLANDA et al, 2001). A Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (CODEVASF) utilizou essa técnica para o controle do processo erosivo em áreas dos Perímetros Irrigado Cotinguiba-Pindoba e Betume. Nesses locais o enrocamento foi implantado em todo o talude marginal, com a função de proteção das margens e suporte para desenvolvimento de espécies vegetais (RIBEIRO, 2008).

A técnica de enrocamento de rochas pode ser associada com ramos vivos, para proporcionar maior proteção da base do talude, desenvolvimento da vegetação e garantir maior estabilização do talude. Os espaços entre as rochas devem ser preenchidos com solo para possibilitar o desenvolvimento da vegetação (RACIN et al., 2000).

2.8.1.2 Enrocamento vegetado

A técnica consiste no plantio de estacas vivas entre espaços e aberturas das rochas nos enrocamentos de pedras (riprap) (MING-HAN LI e EDDLEMAN, 2002). Essa técnica fornece proteção imediata às margens em processo de erosão ativo. As características estéticas dessa técnica são melhores do que somente a utilização do enrocamento de pedras (Figura 4).

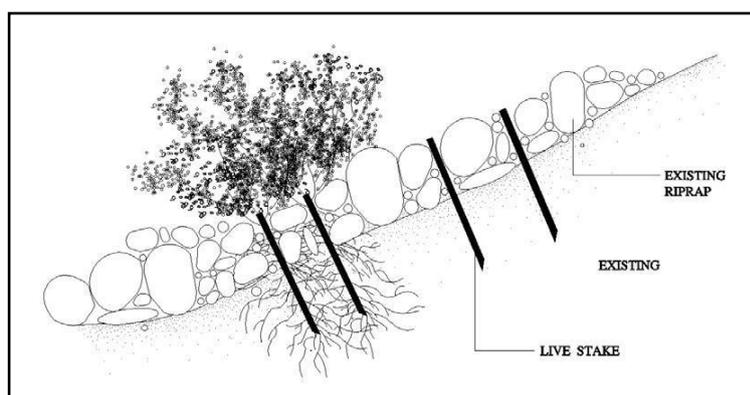


FIGURA 4. Ilustração esquemática do enrocamento vegetado. Fonte: SOTIR (1998) retirado de CAMPBELL et al. (2008).

As estacas vivas proporcionam uma ligação das partículas do solo, controle do excesso de umidade pelo sistema radicular e garante, com o enrocamento, maior estabilização mecânica do solo. É adequada para áreas afetadas pela movimentação superficial de massa do solo e fluxo subsuperficial de água. As estacas devem ter de 12 a 40 mm de diâmetro e 0,85 a 1,00 m de comprimento (CAMPBELL et al., 2008). O custo de implantação é médio.

2.8.1.3 Retentores de sedimentos

Os retentores de sedimentos são estruturas de cilíndricas, com comprimento e diâmetro variável, compostas por fibras de vegetais (material orgânico fibroso, como fibra de coco beneficiada, serragem, palhada de herbáceas (CEMIG, 2002) desidratadas e prensadas, revestidas por rede de polipropileno fotodegradável (Figura 5). Utilizados em terrenos íngremes com a finalidade de reter sedimentos da erosão superficial, para preenchimento de espaços vazios no leito (GOMES, 2005) e proteção da base do talude, enquanto permite o estabelecimento da vegetação. Em rios de pequeno porte, reservatórios e canais artificiais são utilizados para absorver a energia das ondas nas margens (CEMIG, 2002). Por ser um material flexível garante ser moldado de acordo com a curvatura da margem do rio (MING-HAN LI e EDDLEMAN, 2002).



FIGURA 5. Retentores de sedimentos Bermalonga® D- 20 fixados na base do talude no Baixo São Francisco.

2.8.1.4 Vegetação

A utilização da cobertura vegetal na técnica de bioengenharia de solo tem como função acelerar as sucessões naturais, visando alcançar, o mais rápido possível, os efeitos de proteção. A utilização de espécies inadequadas pode interferir na estabilização do talude, favorecendo o processo erosivo. Para favorecer o desenvolvimento da vegetação e melhorar as características do solo, a bioengenharia utiliza o geotêxtil, mantas de fibras vegetais utilizados para controle de erosão, exercendo maior cobertura e proteção ao talude marginal.

A vegetação tem uma importância fundamental no equilíbrio hídrico e sedimentológico da bacia, facilita a infiltração de água no solo, reduz o escoamento superficial e evita a erosão da camada superficial do solo (HOLANDA, 2008). Já o sistema radicular das espécies de porte arbóreo, arbustivo e gramíneas desempenha um eficiente papel no que diz respeito à estabilização de taludes (GRAY e LEISER, 1982). Essa estabilização favorece a agregação das partículas de solos e diminui os efeitos dos processos erosivos.

Segundo Durlo e Sutili (2005) essa estabilização se dá por meio da vegetação se dá principalmente pelo efeito do sistema radicular, que providencia um reforço mecânico, acrescentando substancialmente a resistência das massas terrosas ao cisalhamento. Esta função protetora exercida pela vegetação riparia representa um considerável valor sócio-econômico para a sociedade, por impedir os prejuízos da erosão do solo, perda de solo agricultável.

De uma forma geral o uso da vegetação para recomposição de taludes no controle de processos erosivos, portanto, deve ser criterioso. Devem ser observadas algumas características importantes para o seu desenvolvimento no local. Segundo Pereira (2008) estas características são edafoclimáticas, fisiológicas e ambientais das espécies escolhidas para a proteção e revegetação das áreas instáveis. já que podem interferir intensamente na infiltração de água no solo e no escoamento superficial.

2.8.1.4.1 Capim Vetiver

A vegetação desempenha um importante papel no controle da erosão em taludes marginais, uma vez que a cobertura do solo com gramíneas ou vegetação herbácea

oferece uma das mais eficientes proteções contra a erosão superficial pela diminuição do impacto das chuvas sob um solo desnudo (CHENG, 2003; DAVIDE et al., 2000; HENGCHAOVANICH, 1999), além do aumento da percolação da água e da resistência e coesão do solo nas margens proporcionados pelo sistema radicular (BURYLO et al., 2009; STOKES et al., 2009).

As poaceas como o capim vetiver, espécie originária da Índia foi promovida em 1980 pelo Banco Mundial para a conservação de solos por sua vez têm sido utilizadas em práticas de controle de erosão, estabilização de taludes, remediação de áreas salinas dentre outros usos (MICKOVSKI e VAN BEEK, 2009). O capim vetiver (*Vetiveria zizanioides* L. Nash) recentemente reclassificada como *Chrysopogon zizanioides* L (Roberty) é uma planta herbácea, ereta, pertencente ao grupo das gramíneas (Poaceae), perene do grupo C4 que atingem uma altura que varia entre 1,5 a 2,0 m de altura e folhas são alternas dísticas relativamente rígidas, compridas com 75 cm de comprimento e finas não mais de 8 mm de largura (THE WORLD BANK, 2003; SOUZA e LORENZI, 2005).

O vetiver está presente nos mais variados climas, sobretudo tropical e subtropical, sendo muito utilizada na recuperação de áreas degradadas, com destaque no controle de erosão, pois seu sistema radicular possui numerosas fibras e raízes cilíndricas, capaz de alcançar 3 m de profundidade e em alguns casos tem-se conseguido raízes até de 5 metros, ou seja, grandes profundidades possibilitando à planta boa resistência à seca e forte poder de resistência às enxurradas, permitindo que as mesmas continuem aderidas ao solo (CAZZUFFI et al., 2005; BOLETIN VETIVER NÚMERO 14, 2006 ;MICKOVSKI e VAN BEEK, 2009; SALIN 2005; TRUONG, 2002; TROUNG e LOCH, 2004). Resultados obtidos em plantios em contorno com a utilização do capim vetiver mostram que houve redução em 50% e 70% do escoamento superficial e do solo erodido, respectivamente, quando comparado com a agricultura convencional (PHIEN e TAM, 2007).

A reprodução do capim vetiver se dá de forma sexuada e assexuada, sendo a propagação por mudas a mais comum e utilizada, em que os perfilhos são retirados da planta-mãe, levados diretamente ao campo ou repicados em recipientes com o objetivo de multiplicá-los (CAZZUFFI et al., 2006; CHONG e CHU, 2007). Ainda que a espécie apresente espigas e inflorescência de coloração atrativa avermelhada, testes de DNA mostraram que a maioria dos cultivos são estéreis.

O vetiver primeiramente tornou-se conhecido devido foi devido ao seu potencial do óleo essencial essência utilizada para diversos fins comerciais na indústria de perfumaria.

Com mais detalhes foi verificadas características importantes em sua morfologia (Talos duros, eretos que podem resistir a fluxos de água intensos; densas barreiras quando plantadas juntas, reduzindo a velocidade do fluxo e formando um eficiente filtro; Sistema radicular profundo e denso), fisiologia (Tolerância a variações extremas do clima; Ampla faixa de pH entre 3,5 até 9,6 no solo; Alta tolerância a níveis tóxicos de metais) e ecologia (Reprodução por mudas, sendo assim uma planta não invasora (sementes estéreis); Promove a sucessão natural), tendo grande importância na proteção ambiental (TRUONG e HENGCHAOVANICH, 1997 ; GRIMSHAW, 2005).

Sendo a morfologia do sistema radicular de grande valia e alguns trabalhos afirmam as diferenças deste sistema em outras partes do mundo como relata registros (Ke et al 2003; Mickovski et al 2005). A necessidade desses resultados nos fornece o cálculo adicional de coesão, proporcionado pelo aumento do reforço no sistema radicular. Este aumento na coesão do solo pela raízes está relacionado com a quantidade de raiz ou a área da raiz variando de espécie para espécie, das propriedades do solo, e principalmente sobre a distribuição do sistema radicular e propriedades de resistência.

As raízes desta espécie possui resistência média à tração que varia de 75 MPa, com diâmetro médio de 0,7 mm comum para as raízes da poacea (TRUONG e HENGCHAOVANICH, 1997; HENGCHAOVANICH, 1998). Devido ao seu desenvolvimento rápido do sistema radicular e ganho expressivo em comprimento em profundidade favorece por sua vez um maior reforço estrutural do solo, formando um espécie de ancora natural de encostas e taludes íngremes prevenindo deslocamento de massa de solo. Segundo Cazzuffi *et al.* (2006) em seus estudos relatou que em média são capazes de crescer 2 m nos primeiros dois anos. De acordo com Mickovski *et al.* (2005) ; Cazzuffi *et al.* (2006); Truong e Loch, (2004) afirmam que em seus resultados que esta espécie promovem boa resistência ao cisalhamento e sobrevive em várias classes de solos com diferentes granulometrias.

2.8.1.4.2 Estacas vivas

A propagação vegetativa é o processo no qual ocorre à indução do desenvolvimento de raízes adventícias em segmentos destacados da planta matriz, que, submetidos a condições favoráveis, originam uma muda. Qualquer parte da planta

matriz, capaz de regenerar parte ou partes que lhe estão faltando, a fim de formar uma planta nova e completa pode ser considerada uma estaca.

Em espécies florestais a propagação vegetativa é feita por meio de estacas um dos métodos mais importantes da macropropagação. Nesse sentido, a estaquia apresenta algumas vantagens como: Algumas vantagens são inerentes à estaquia como: pode-se obter, em curto espaço de tempo, uma grande quantidade de mudas a partir de uma única planta matriz; técnica facilmente executada; não apresenta problemas comuns a outros processos de propagação vegetativa como a incompatibilidade entre enxerto e porta-enxerto. Além disso, obtém-se maior uniformidade devido à ausência de variação genética dos progenitores (HOPPE et al., 1999).

Esta técnica consiste no plantio de estacas de espécies vegetais, diretamente, em taludes marginais ou encostas para a contenção do processo erosivo. O desenvolvimento das raízes das estacas vai garantir a formação de um sistema radicular denso para auxiliar no reforço do solo, na ligação das partículas e no controle do excesso de umidade do solo (USDA–NRCS, 1992; LEWIS, 2000), fatores que possibilitam a estabilidade do talude.

Segundo a descrição de USDA–NRCS (1992) sobre as eficiências dessa técnica, ela é simples, com baixo custo operacional e favorece a introdução de outras espécies vegetais da região na área do projeto. Além disso, pode ser associada a materiais inertes, geomantas, como também a outras técnicas de bioengenharia, feixes vivos, no controle da erosão superficial.

As espécies utilizadas como estacas vivas devem apresentar alta tolerância às variações das condições ambientais, alta taxa de crescimento, enraizamento e sistema radicular extenso e resistente.

As estacas devem ser retiradas de plantas vivas, sem presença de déficit hídrico, deficiência nutricional e presença de doença. O tamanho das estacas deve ser entre 0,75-1,00 m de comprimento por 0,12-0,40 cm de diâmetro (CAMPBELL et al., 2008).

O corte da estaca deve ser realizado mantendo um ângulo de fácil inserção da estaca no solo, realizada a limpeza dos ramos laterais, mantendo a gemas de crescimento intactas (CAMPBELL et al., 2008). Após o corte, as estacas devem ser imersas em água, para evitar a desidratação do material como também submetida a tratamento com hormônio, para auxiliar no enraizamento. O manuseio das estacas deve ser adequado para evitar estresses, secagem ou exposição ao calor (LEWIS, 2000) e

danos na casca. Deve-se realizar cortes nas extremidades basais e instalar os materiais no mesmo dia do corte.

O tipo de estaca utilizada pode determinar o percentual de enraizamento, visto que o potencial para enraizar varia entre as diferentes porções de um mesmo ramo. Ramos lenhosos, coletados no inverno, em geral apresentam maior enraizamento na porção basal, enquanto que ramos coletados em outras épocas, portanto semi-lenhosos e herbáceos, possuem maior potencial de enraizamento em sua porção apical (HARTMANN e KESTER, 1990; FACHINELLO et al., 1994).

2.8.1.4.2 .1 Sabiá

Mimosa caesalpiniaefolia Benth, conhecida vulgarmente como sabiá, unha de gato e sansão-do-campo é uma espécie com ocorrência preferencial em solos profundos, sendo pioneira, decídua, heliófita (LORENZI, 2000). É pertencente à família Mimosaceae, sendo muito comum no Nordeste do Brasil e utilizada para mourões, estacas, postes, lenha e carvão, já que sua madeira é apropriada para esse fim. Essa planta possui algumas características importantes como alta tolerância à luz direta, além de ter alta precocidade. A planta é também utilizada como fonte de alimento por vários animais, como os caprinos, que se alimentam das folhas na época de estiagem (MENDES, 1989).

A espécie sabiá é muito indicada para programas de recomposição de áreas degradadas (LORENZI, 2000), a partir da recuperação do solo através da fixação do nitrogênio e pelo aumento do teor de matéria orgânica originada da queda de suas folhas (LEAL JÚNIOR et al., 1999). A espécie possui também elevado poder de rebrote beneficiando outras espécies que venham a ser plantadas em consórcio com ela (OLIVEIRA et al., 2007).

3 Referências Bibliográficas

ALLEN, H. H. **Bioengineering for streambank erosion control**. Report 1, Guidelines / by Hollis H. Allen, James R. Leech ; prepared for U.S. Army Corps of Engineers...: ill. ; 28 cm. — (Technical report ; EL-97-8 rept. 1), 1997. 103 p

AL-SHAYEA, N.A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. **Engineering Geology**, v.62, n.4, 2001, p.319-342.

ALTIERI, M. A. **Agroecologia. As bases científicas da agricultura alternativa**. 2. ed. Rio de Janeiro. PTA/FASE, 1989. 235p.

ALTIERI, M. A.; YURJEVIC, A. **Agroecologia y desarrollo**. Santiago: CLADES, La agroecologia y el desarrollo rural sostenible en América Latina, v.1. 1991, p. 25-36.

AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. **Física do solo: conceitos e aplicações**, 1ª ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008. 290 p.

ANA – Agência Nacional de Águas. Projeto GEF – São Francisco. 2008. Disponível em <http://www.ana.gov.br>, acessado em 03/07/2010.

ASSIS, F. O. e MURATORI, A. M. Poluição hídrica por dejetos de suínos: um estudo de caso na área rural do município de Quilombo, Santa Catarina. **Revista Eletrônica Geografar**, Curitiba, v.2, n.1, p.42–59, 2007. ISSN:1981-089X. Disponível em: <www.ser.ufpr.br/geografar>. Acesso em: 15 de fev. 2008.

ASSOCIAZIONE ITALIANA PER INGEGNERIA NATURALISTICA (AIPIN). **Regolamento per l'attuazione degli interventi di Ingegneria Naturalistica nel Territorio della Regione Campania**. AIPIN, Itália, 2002.

BANDEIRA, A. A. **Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco e eficiência dos enrocamentos no controle da erosão no trecho em estudo**. 2005. 183 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2005.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. V. 3. Florianópolis: Editora da UFSC, 1436 p, 2003.

BOLETÍN VETIVER. Maracay, Venezuela: RLAV - Red Latinoamericana del Vetiver, n. 14, oct. 2006.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SOARES, J.M.D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.7, n.6, p.1646-1653, 2007.

BRANDT, A. A. **Propriedades mecânicas do solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais**. 2005. 78 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2005.

BRASIL. **Plano decenal de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco**, PBHSF (2004-2013), Diagnósticos da bacia e canários de desenvolvimento. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco ANA/GEF/PNUMA/OEA. Subprojeto 4.5. Plano decenal de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco (2004-2013). Brasília/DF, 2004.

BRIGHETTI, G. e MARTINS, J. R. S. **Estabilização e proteção de margens – PHD 5023 - Obras hidráulicas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2001. 73 p.

BRUGGER, P. J.; BORMA, L. S.; NAVAL, L. P. Revisão de alguns conceitos de modelagem hidrológica, uso do solo e análise de risco. In: IV Conferência Brasileira sobre estabilidade de Encostas – COBRAE - 2005, Salvador/BA. **Anais da 4ª da Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas – COBRAE – 2005, Salvador/BA**, Rio de Janeiro, ABMS, 2005. V. 1, p. 91 - 99.

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**, Crawley, Australia, v. 324, n. 324, p. 31-42, 2009.

CAMPBELL, S. D. G.; SHAW, R; WONG, J. C. F.. **Guidelines for soil bioengineering applications on natural terrain landslide scars**. Geo Report N° 227. Geotechnical Engineering Office Civil Engineering and Development Department the Government of the Hong Kong Special Administrative Region. 2008.

CARNEIRO, J. R., ALMEIDA, P. J., LOPES, M. DE L. Durabilidade de geotêxteis expostos a diversos fatores climáticos. 10.º Congresso Nacional de Geotecnia. Anais... 2006.

CASADO, A. P. B. **Estudo do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco: Perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba – Baixo São Francisco Sergipano**. 139 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Núcleo de Pós-graduação e Estudos do Semi-Árido, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2000.

CASADO, A.P.B.; HOLANDA, F.S.R.; ARAUJO FILHO, F.A.G.; YAGUIU, P. Evolução do processo erosivo na margem direita do Rio São Francisco (perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba – SE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.1, p.231-239, 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.

CEMIG, Companhia energética de Minas Gerais. **Controle de erosão em margens de reservatórios**, com ênfase em métodos de bioengenharia de solo. 2002.

CHENG, H.; YANG, X.; LIU, A.; FU, H.; WAN, M. A study on the performance and mechanism of soil reinforcement by herb root system. In: Proceedings of the 3rd International Vetiver Conference, 2003. Proceedings...Guangzhou, 2003.

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

CHRISTOFOLETTI, A. **A modelagem de sistemas ambientais**. Edgard Blücher: São Paulo, 1999. 236p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2 ed. São Paulo. SP: Edgard Blücher Ltda. 1981. 188 p.

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento do São Francisco e Vale do Paraíba. **Projeto básico de proteção da margem direita do rio São Francisco no perímetro de irrigação Cotinguiba/Pindoba**, 4ª SR – Sergipe. Brasília, DF: CODEVASF, 2010.

COELHO, A. T. e PEREIRA, A. R. Efeitos da vegetação na estabilidade de taludes e encostas. **Boletim técnico**, Deflor Bioengenharia, ano 1, n. 2, 20 p., 2006. Disponível em: <<http://www.deflor.com.br/portugues/pdf/boletim2.pdf> r>. Acesso em: 01 de jul. 2008.

CONEJO, J. G. L.. **Relatório Final Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado da Bacia do Rio São Francisco e da sua Zona Costeira – PAE**. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco GEF São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Subprojeto 4.5 B – Formulação de um Programa de Gerenciamento Integrado da Bacia do rio São Francisco e da sua Zona Costeira. Brasília, DF. 2003.

CONWAY, G. R. **The Properties of Agroecosystems**. Agricultural Systems. Great Britian, n.24, p.95-117, 1987.

CORONADO, J.A. **Avaliação da suscetibilidade a deslizamentos por meio do uso de sistema de informação geográfica: aplicação em uma área do eixo cafeeiro colombiano**. 2006. 92 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 2006.

CORTES, R. M. V. **Requalificação de cursos de água**. Lisboa: Instituto da Água, 2004. 135 p.

COSTA, J.S.; ALVARENGA, M.I.N.; MELLONI, E.G.P.; MELLONI, R. Proteção de taludes e controle de erosão com técnicas de bioengenharia. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.29, n.244, p. 75-88, maio/jun. 2007.

COUPER, P. Effects of silt-clay content on the susceptibility of river banks to subaerial erosion. **Geomorphology**, v.56, n.1-2, p.95-108, 2003.

CRUZ, O. **Estudo dos processos geomorfológicos do escoamento pluvial na área de Caraguatatuba/SP**. 1982. 151 f. Tese (Livre-Docência em Geografia Física). Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.

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.

DEFLOS BIOENGENHARIA. **Soluções ambientais definitivas**. Belo Horizonte: 2006. 39p. (Catálogo)

DURLO, M. A. e SUTILI, F. J. **Bioengenharia: manejo biotécnico de cursos de água**. Porto Alegre, RS: EST Edições, 2005. 198 p.

DURLO, M. A.; SUTILI, F. J. **Bioengenharia: manejo biotécnico de cursos de água**. Porto Alegre/RS: EST Edições, 2005. 189p.
e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2001.

EUBANKS, C. E.; MEADOWS, Dexter. **A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization**. U. S. Department of Agriculture (USDA). Forest Service. 2002.

FACHINELLO, J.C.; HOFFMANN, A.; NACHTIGAL, J.C; KERSTEN, E.; FORTES, G.R.L. **Propagação de plantas frutíferas de clima temperado**. Pelotas: UFPEL, 1994. 179 p.

FENG, G.; SHARRATT, B.; YOUNG, F. Soil properties governing soil erosion effected by cropping systems in the U.S. Pacific Northwest. **Soil e Tillage Research**, v.111, n.2, p.168-174, 2001.

FENNER, R. A.; CLARKE, K. Environmental and structural implications for the re-use of tyres in fluvial and marine construction projects. **Water and Environment Journal**, London, v. 17, n. 2, p. 99-105, 2003.

FLICKINGER, H.G.; NEUSER, W. **Teoria de autoorganização: as raízes da interpretação construtivista do conhecimento**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1994. 84p.

FONTES, L. C. S. (Coord.). **Estudo do processo erosivo das margens do Baixo São Francisco e seus efeitos na dinâmica de sedimentação do rio. Relatório Final. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco - GEF São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA)**. Subprojeto 2.4 – Estudo do processo erosivo das margens do Baixo São Francisco e seus efeitos na dinâmica de sedimentação do rio. Aracaju: UFS/FAPESE, 2003.

FONTES, L. C. S. **Erosão marginal no baixo curso do rio São Francisco: um estudo de caso de impactos geomorfológicos à jusante de grandes barragens**. 2002. 321 f.

Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2002.

GOMES, L. G. N. **A bioengenharia como ferramenta para restauração ambiental das margens rio São Francisco**. 2005. 130 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2005.

GRAY, D. H. e LEISER, A. T. **Biotechnical Slope Protection and Erosion Control**. Florida: Krieger Publishing Company Malabar, 1982.

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

GRAY, D. H; SOTIR, R. **Biotechnical and soil Bioengineering Slope Stabilization**. New York: John Wiley, 1996. 378p.

GRIMSHAW, R. **The vetiver system: Vetiver grass Technology: Technology characteristics**. Apresentação de slides. 28 slides, 2005.

GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. p. 211-252.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. Geomorfologia e Meio Ambiente. 3ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil, 2003. 394p.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 3ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil, 2003. 394p.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 340 p.

GUIMARÃES, M. F. R. **Indicadores ambientais aplicados ao processo erosivo na margem direita do Baixo São Francisco**. 163 f. São Cristóvão, SE: Programa de Pósgraduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA). São Cristóvão: UFS. Dissertação de Mestrado. 2004.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil e Tillage Research**, v.82, n.2, p.121-145, 2005.

HART, R. D. **Agroecossistemas, conceptos básicos**. Turrialba: CATIE, 1980. 211p

HARTMANN, H. T.; KESTER, D. E. **Propagacion de plantas: principios y practicas**. 4. ed. México: Continental, 1990. 760p.

HENGCHAOVANICH D. Vetiver System for Slope Stabilization. In: **Proceedings of Third Internatioal Vetiver Conference**, October, Guangzhou, China, 2003.

HENGCHAOVANICH, D. **15 Years of bio engineering in the wet tropics: from A (Acacia auriculiformis) to V (Vetiveria zizanioides)**. In: First Asia-Pacific Conference on Ground and Water Bio-engineering, 1999. Proceedings... Manila, 1999.

HOLANDA, F. S. R. **Estudo integrado do vale do São Francisco sergipano: região de tabuleiros costeiros e pediplano sertanejo pedologia**. Aracaju:CODEVASF, 2000. 138p.

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 técnicas da bioengenharia de solos. **Revista RA'EGA**, n. 17, Curitiba: Editora UFPR, 2009. p. 93-101.

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. v. 20, n.1, **Ciência Florestal**, Jan-Mar, 2010, p. 157-166

HOLANDA, F. S. R.; RESENDE, 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.: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 7, Anais. Goiânia, 2001.

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.; 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.; SANTOS, L.G.C.; SANTOS, C.M.; CASADO, A.P.B.; PEDROTTI, A.; RIBEIRO, G.T. Riparian vegetation affected by bank erosion in the Lower São Francisco River, Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.2, p.327-336, 2005.

HOPPE, J. M.; SCHUMACHER, M. V.; MIOLA, A. C.; OLIVEIRA, L. S. Influência do diâmetro de estacas no desenvolvimento dos brotos de Platanus x acerifolia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 25-28, 1999.

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

JULIAN, J.P.; TORRES, R. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. **Geomorphology**, v.76, n.1-2, p.193-206, 2006.

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, pp 365–374, 2003.

LEAL JÚNIOR, G.; SILVA, J. A. da; CAMPELLO, R. C. **Proposta de manejo sustentado do sabiá**. Boletim Técnico 3, 1999. Projeto IBAMA/PNUD/BRA/93/033.

LENZI, M.; ORTH, A.I. Caracterização funcional do sistema reprodutivo da aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi), em Florianópolis-SC, Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal-SP, v.26, n.2, 2004 p. 198-201.

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.

LIMA, C.L.R.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; SILVA, J.B. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, 2003, p.199-205.

LIMA, P.M.P.; ANDRADE, H. Erodibilidade entressulcos e atributos de solos com B textural e B latossólico do sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, 2001 p.463-474.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 1992. 352p.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 3. ed. Nova Odessa: Instituto Platarum, v. 1. 351p., 2000.

MARTEN, G. C. Productivity, Stability, Sustainability, Equitability and Autonomy as Properties for Agroecosystem Assessment. **Agricultural Systems**. n.26, 1988, p.291-316,.

MARTINHO, P. R. M. **Contribuição para o estudo de técnicas de engenharia biofísica: grade de vegetação e grade de vegetação Vesúvio**. 2005. 95 p. Trabalho de fim de curso (Curso de Engenharia Biofísica). Universidade de Évora, 2005.

MARZALL, K. **Indicadores de sustentabilidade para agroecossistemas**. Porto Alegre, 1999. 208 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

MASCARENHAS, A. C. M. **Conflitos e gestão de águas: o caso da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Dissertação de mestrado. Centro de Desenvolvimento Sustentável. Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2008. 211p.

MENDES, B. V. **Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth): valiosa forrageira arbórea produtora de madeira das caatingas**. ESAM – Mossoró, 1989.

MENDES, F.G.; MELLONI, E.G.P.; MELLONI, R. Aplicação de Atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá/MG. **Cerne**, Lavras, v.12, n.3, p.211-220, 2006.

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

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 and Soil**, v.324, n.1-2, p.43-56, 2009.

MICKOVSKI, S.B.; VAN BEEK, L.P.H.; SALIN, F. Uprooting of vetiver uprooting resistance of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*). **Plant and Soil**, UK, n. 278, p. 33-41, 2005.

MILLÁN ROMERO, E. **Condutividade hidráulica, porosidade e resistência à penetração em Latossolos artificialmente compactados**. 2007. 55 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Núcleo de pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, MG, 2007.

MING-HAN Li; EDDLEMAN, K.E.; Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods a biotechnical streambank stabilization design approach. **Landscape and Urban Planning** ,v.60. 2002. p. 225-242.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco**. Brasília/DF: 2006. 148 p.

Morgan, R.P.C., and R.J. Rickson. Slope **Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach**. E e F Spon, London, England, 1995.

NORMANIZA, O.; BARAKBAH, S.S. Parameters to predict slope stability – Soil water and root profiles. **Ecological Engineering**, v.28, n.1, p.90-95, 2006.

NORMANIZA, O.; FAISAL, H.A.; BARAKBAH, S.S. Engineering properties of *Leucaena leucocephala* for prevention of slope failure. **Ecological Engineering**, v.32, n.3, p.215-221, 2008.

ODUM, E. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1988. 434p.

OLIVEIRA, F.F.M.; SILVA e, K.M.B.; OLIVEIRA de, G.F.; DANTAS, I.M.; CAMACHO, R.G.V. Micropropagação de *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth. a partir de segmentos nodais e ápices caulinares. **Revista caatinga**. Mossoró, Brasil, v.20, n.3, p. 152-159, Jul-Set 2007.

OLIVEIRA, V.S. de. **Erosão marginal no baixo curso do rio São Francisco e seus efeitos nos agroecossistemas**. 2006. 64 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2006.

OSTERKAMP, W.R.; HUPP, C.R. Fluvial Processes and vegetation – Glimpses of the past, the present, and perhaps the future. **Geomorphology**, v.116, n.2-3, p.274-285, 2010.

PARKER, C.; SIMON, A.; THORNE, C.R. The effects of variability in bank material on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. **Geomorphology**, v.101, n.4, p.533-543, 2008.

PENTEADO, M. M. **Fundamentos de Geomorfologia**. 3ª Edição. Rio de Janeiro:

PEREIRA, A. R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. Belo Horizonte: FAPI, 2006. 150 p.

PEREIRA, A. R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. 2 ed. Belo Horizonte: Editora FAPI, 2008. 239 p.

PHILLIPS, C.; MARDEN, M. **Use of plants for ground bioengineering and erosion e sediment control in New Zealand**. In: Proceedings of “Soil e Water. Too good to lose”. Joint Annual Conference NSW Stormwater Industry Association and the Internatioanal Erosion Control Association, 2006, Parramatta. Proceedings... Parramatta, 2006.

PIMENTA JÚNIOR, I. **Caracterização geotécnica e análise de estabilidade de taludes de mineração em solos da mina de Capão Xavier**. 2005. 145 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 2005.

PIMENTA, C. F. **Curso de hidráulica geral - volume 2**. 4ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Dois, 1981

PINHEIRO, S. L. G. **O Enfoque sistêmico e o desenvolvimento rural sustentável: uma oportunidade de mudança da abordagem hard-systems para experiências com soft-systems**. Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 27-37, 2000.

POLLEN, N. e SIMON, A. Temporal and Spatial Variability in the Root-Reinforcement of Streambanks: Incorporating Variations in Soil Shear Strength and Soil Moisture into the RipRoot Model. In: 2006 World Environmental and Water Resources Congress. **Proceedings of the 2006 World Environmental and Water Resources Congress** (R. Graham, Ed.), Omaha, Nebraska, May 21 - 25, 2006.

RACIN, J. A.; HOOVER, T. P.; AVILA, C. M. C. **California bank and shore rock slope protection design**. Califórnia: California Department of Transportation, 2000. 109 p.

RAVEN, P.; EVERT, R. E.; EICHHONR, S.E.. **Biologia Vegetal**. 6ª ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 2001.

REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de

cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.5, p.1805-1816, 2008.

RIBEIRO, L. F. **Alterações da paisagem em margens de cursos d'água: os casos dos rios São Francisco e Paramopama, Sergipe**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2008.

RICKLEFS, Robert E. **A economia da natureza**. Tradução de Cecília Bueno, Pedro P. de Lima-e-Silva e Patrícia Mousinho. 5ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003.

ROCHA, I.P. **Relação entre a erosão marginal, atributos físicos do solo e variáveis hidrológicas e climáticas no Baixo São Francisco sergipano**. 2009. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Núcleo de pós-graduação e estudos em recursos naturais, Universidade Federal de Sergipe, SE, 2009.

ROCHA, W.W.; DIAS JUNIOR, M.S.; LIMA, J.M.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, A.R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.297-303, 2002.

ROSA, S.F.; DURLO, M.A. Enraizamento de estacas de duas espécies de Salix com vistas à estabilização de taludes fluviais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.19, n.1, p.53-60, 2009.

SANTOS, C. M. **A erosão no Baixo São Francisco sergipano e os mecanismos de destabilização dos taludes na margem do rio**. 2002. 143 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2002.

SANTOS, L. G. da C. **Diagnóstico dos remanescentes de mata ciliar no baixo São Francisco sergipano afetado pela erosão marginal e a compreensão dos ribeirinhos sobre a degradação desta vegetação**. 2001. 105 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si e Al em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n.3, 2005, p.447-457.

SILVA, A.J.N.; CARVALHO, F.G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de uma Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.5, p.853-862, 2007.

SILVA, A.J.N.; CARVALHO, F.G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de uma Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.5, 2007, p.853-862.

SILVA, F. C. **Métodos de semeadura e uso de mantas no controle de erosão em taludes de corte**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, 2008.

SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SANTOS, F.L.; FRANZ, C.A.B. Resistência ao Cisalhamento de um Latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.1, 2004, p.165-173.

SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L.; VIEIRA, L.B. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.460-464, 2000.

STOKES, A.; ATGER, C.; BENGOUGH, A. G.; FOURCAUD, T.; SIDLE, R. C.; Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. **Plant and Soil**, Crawley, AU, v. 324, p. 1-30, 2009.

SUGUIO, K. **Dicionário de Geologia Sedimentar e Áreas afins**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998

SUTILI, F. J. **Manejo biotécnico do arroio Guarda-Mor**: princípios, processos e práticas. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

SUTILI, F. J.; DURLO, M. A.; BRESSAN, D. A. Potencial biotécnico do sarandi-branco (*Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg.) e vime (*Salix viminalis* L.) para revegetação de margens de cursos de água. **Ciência Florestal**, v.14, n.1, p.13-20, 2004.

TAVARES-FILHO, J.; FONSECA, I.C.B.; RIBON, A.A.; BARBOSA, G.M.C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, 2006, p.996-999.

TEIXEIRA, M. D. M. **Influência dos parâmetros geomorfológicos e hidráulicos na navegabilidade fluvial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte). Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2006. 199 p.

TERZAGHI, K. **Mecanismo dos escorregamentos de terra**. São Paulo: revista Politécnica, 1952.

THE WORLD BANK. **Vetiver Grass: the hedge against erosion**. 4. ed. Washington, D.C.: The World Bank, 1993. 78 p.

THEISEN, M.S. The role of geosynthetics in erosion and sediment control: na overview. **Geotext. Geomemb.**, 1992, n.44, p.535-550.

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.N.V.; LOCH, R. Vetiver system for erosion and sediment control. In: **ISCO - International Soil Conservation Organisation Conference**, 13th, 2004, Brisbane.

USDA–NRCS. **Technical Supplement 14I Streambank Soil Bioengineering**. In 210–VI–NEH, 2007. 84p.

ALVAREZ V., VAZQUEZ A., BERNAL, C. Fracture behavior of sisal fiber reinforced starch based composites, **Polym Compos**, 26 (2005) (3), pp. 316–323.

VENTI, D., BAZZURRO, F., PALMERI, F., UFFREDUZZI, T., VENANZONI, R., GIBELLI, G. Manuale Tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni, Servizio Assetto del Territorio – Ufficio Urbanistica, Terni, Itália. 2003.

VENTURA, L.C. **Análise da influência de barreiras hidráulicas no padrão do fluxo e na estabilidade de taludes de cavas a céu aberto de minas de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG**, 2009. 202 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2009.

VIEIRA, V.A.S.; MELLO, C.R.; LIMA, J.M. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma microbacia hidrográfica. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v.31, n.5, p.1477-1485, 2007.

WEEB, N.P.; STRONG, C.L. Soil erodibility dynamics and its representation for Wind erosion and dust emission models. **Aeolian Research**, 2011.

XIA, J.Q.; WU, B.S.; WANG, Y.P.; ZHAO, S.G. An analysis of soil composition and mechanical properties of riverbanks in a braided reach of the Lower Yellow River. **Chinese Science Bulletin**, v.53, n.15, p.2400-2409, 2008.

YAO, S.; QIN, J.; PENG, X.; ZHANG, B. The effects of vegetation on restoration of physical stability of a severely degraded soil China. **Ecological Engineering**, v.35, n5, p.723-734, 2009.

ZEA HUALLANCA, R.E. **Mecanismos de ruptura em taludes altos de mineração a céu aberto**. 2004. 132 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.

CAPÍTULO 1: Influência das propriedades físicas e mecânicas na estabilidade do talude fluvial do baixo curso do rio São Francisco, estado de Sergipe

1 Resumo

Nos países em desenvolvimento a degradação dos recursos hídricos é um grande problema, devido a seu uso intenso e de forma equivocada. O uso intensivo da margem do rio São Francisco com agroecossistemas na região do baixo São Francisco exerce influência direta na degradação desses recursos possibilitando a ocorrência da erosão marginal, a erosão marginal, ocasionando o desequilíbrio na dinâmica fluvial. Este estudo foi realizado com o objetivo de verificar o comportamento dos atributos físicos e mecânicos do talude fluvial na susceptibilidade à erosão no baixo São Francisco município de Amparo de São Francisco, estado de Sergipe. O ensaio experimental foi realizado na margem direita do baixo São Francisco, localizada no município de Amparo de São Francisco, estado de Sergipe (coordenadas UTM N= 8.868.789,506 / E= 736.583,864), com solo classificado como Neossolo Flúvico. Para obtenção das amostras de solo foram realizadas coletas de amostras indeformadas e deformadas de solo com execução de furos de sondagem a trado até o nível d'água sendo retiradas de camadas representativas do talude. Posteriormente à coleta das amostras foram realizados ensaios laboratoriais possibilitando a caracterização e identificação das propriedades físicas e mecânicas do solo. As camadas superiores do talude estudado são compostas por silte e argila e as camadas inferiores pela fração areia, sendo esse material muito semelhante ao longo do trecho estudado. A saturação e secagem através das elevações da cota do rio comprometem a estabilidade do talude devido à diminuição da altura crítica vertical através da redução dos valores de coesão. A granulometria de amostras de solo coletadas no talude está intimamente relacionada com suscetibilidade ao processo erosivo e com o comportamento mecânico desse talude.

Palavras chave: cisalhamento direto, coesão, erosão marginal.

CHAPTER 1: Influence of physical properties and mechanical stability of the slope of the lower course of the river São Francisco, Sergipe

2 Abstract

In developing countries the degradation of water resources is a major problem, due to its intensive use in the wrong way. The agroecosystems of the Lower San Francisco have a direct influence on the degradation of these resources causing, the marginal erosion, and the imbalance in the dynamics of the basin. This study was conducted in order to verify the influence of physical and mechanical attributes of the riverbanks in the susceptibility to erosion in experimental area located in the municipality of Amparo San Francisco, state of Sergipe (coordinates UTM N = 8868789.506 / E = 736,583.864) and the soil of the experimental area was classified as Neossolo. Soil samples were collected from undisturbed soil and then deformed to run the auger boreholes down to the water being removed layers representing the slope. Subsequent to sampling laboratory tests were performed allowing the characterization and identification of physical and mechanical properties of the soil. The upper layers of the slope studied are composed of silt and clay and the lower layers of the sand fraction, and this material very similar along the studied stretch. Saturation and drying through the elevations of the quota of the river compromise the stability of the slope due to the critical vertical height loss by reducing the values of cohesion. The granulometry of the material of the slope is closely related to susceptibility to erosion and the mechanical behavior of the same.

Keywords: direct shear test, cohesion, riverbank erosion.

3 Introdução

Nos países em desenvolvimento a degradação dos recursos hídricos é um grande problema, devido a seu uso exarcebado e de forma equivocada (XU, 2002). Nos agroecossistemas da região do baixo São Francisco são identificados vários pontos de ocorrência de erosão marginal, o que afeta diretamente a degradação desses recursos, rompendo o equilíbrio dinâmico da bacia (HOLANDA, 2007).

Os processos e alterações de origem natural ou antrópica que ocorrem nas bacias hidrográficas são refletidos diretamente nos cursos d'água, ou seja, a qualidade de um curso d'água está diretamente relacionada com a qualidade ambiental da sua bacia hidrográfica como um todo (HOLANDA, 2009). O grau de degradação dos solos marginais é um dos parâmetros utilizados para determinação da qualidade de um curso d'água, onde o processo erosivo tem grande importância.

O processo de erosão marginal é uma manifestação natural de reajuste dos canais, no entanto o que ocorre é a sua aceleração, fazendo com que a dinâmica fluvial se intensifique em busca de um novo equilíbrio. Em ecossistemas equilibrados, o processo erosivo ocorre de maneira harmoniosa onde o material erodido é depositado num local diferente de origem, mantendo assim a estabilidade da dinâmica fluvial (XIA et al., 2008; SILVA, 2010).

Diante das condições hidráulicas do curso d'água, juntamente com as partículas de solo transportados, a erosão das paredes dos canais do rio e do seu respectivo leito é dada pela erodibilidade do solo característico de uma determinada região. A erodibilidade é a propriedade do solo em resistir a erosão, sendo definido como material removido por unidade de área quando demais fatores determinantes da erosão permanecem constante (BRANDT, 2005).

O conhecimento das características fluviais é extremamente importante no que concerne aos recursos hídricos, tanto do ponto de vista da hidráulica, do controle da erosão, e da qualidade da água. A erosão, transporte e deposição são processos que não podem ser separados, são interdependentes dentro de relações constantemente mutáveis do fluxo e da carga existente (ASSIS e MURATORI, 2007).

No entanto, as alterações nas margens dos rios provocadas pela ação humana nos últimos anos, seja pela operação de reservatórios ou pelo uso e ocupação inadequado do solo, vêm acelerando o processo de degradação ambiental. Essas alterações são

responsáveis por inúmeros impactos ambientais, como o assoreamento dos rios, diminuição das áreas agricultáveis, aumento da ocorrência de inundações e ampliação das áreas atingidas por elas, além da possibilidade de redução da qualidade da água (HOLANDA et al., 2005).

No entanto, características como topografia, geomorfologia, presença de mata ciliar e atividade antrópica são classificados como fatores que interferem na estabilidade dos taludes, visto que elas modificam parâmetros como declividade, resistência ao cisalhamento, propriedades físicas, capacidade de retenção de água no solo e regime climático. Quando as forças que atuam

no solo são superiores às que promovem a estabilidade, o processo de desprendimento de massa de solo é iniciado e, conseqüentemente, ocorre erosão. A estabilidade dos taludes é dada pela relação entre as forças erosivas e os parâmetros que promovem a resistência do solo (XIA et al., 2008).

A propriedade dos solos em suportar cargas e conservar sua estabilidade, depende da resistência ao cisalhamento do solo (τ). Toda massa de solo se rompe quando esta resistência é excedida (CAPUTO, 1988). A resistência do solo ao cisalhamento é uma importante propriedade mecânica e dinâmica do solo (SILVA et al., 2004). Segundo Gaggero (1998) entende-se por coesão a resistência do solo ao cisalhamento, quando nele não existe nenhuma pressão externa atuante.

A resistência dos solos ao cisalhamento é então definida como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, onde parâmetros como ângulo de atrito interno e coesão influenciam e alteram diretamente essa resistência, sendo esses parâmetros determinados por atributos físicos dos solos (SILVA et al., 2004; BRAIDA et al., 2007). Para tanto, o conhecimento dos atributos físicos do solo como a estrutura, agregação, densidade e granulometria, além de suas relações intrínsecas, é de importância ímpar para um melhor entendimento dos processos erosivos que atuam em taludes e para geração de conhecimento com o intuito de aumentar a estabilidade dos mesmos.

Segundo Thorne (1981); Vargas (1989); Silva e Carvalho (2007); Parker *et al.* (2008) a determinação dos atributos físicos do solo na resistência do solo ao cisalhamento pode ser expressa pela equação de Coulomb, realizada por meio dos parâmetros intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito interno do solo (ϕ). Para Braida et al. (2007) essas variáveis são características intrínsecas do solo, pois são dependentes de

outras propriedades e características deste, como granulometria, estrutura, teor de matéria orgânica, densidade do solo, mineralogia e conteúdo de água.

Pinto (2000) define ângulo de atrito como o ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem que haja o cisalhamento do solo no plano de ruptura. Este ângulo representa as características friccionais entre os sólidos que compõem o solo e é definido como o ângulo que a força normal faz com a resultante das outras forças que atuam no talude, sem que haja o desprendimento de massa no plano de ruptura (ROCHA et al., 2002; SILVA e CARVALHO, 2007). Essa variável é influenciada diretamente pelo teor de umidade do solo, granulometria das partículas e pelo tipo de argilomineral. Silva e Cabeda (2007), Braida et al., (2007) e Xia et al., (2008) observaram uma redução significativa nos valores de ângulo de atrito interno com o aumento dos teores da fração argila, de matéria orgânica e do conteúdo de água no solo, respectivamente.

A utilização dos atributos físicos dos solos como variável no estudo das qualidades de um solo desempenha papel importante devido aos baixos custos e metodologias rápidas e simples, que permitem uma relação direta com os atributos químicos e biológicos (MENDES et al., 2006). A estrutura do solo pode ser definida como a posição relativa das partículas primárias que o compõem, umas em relação às outras, presentes em unidades estruturais compostas, onde a classificação é feita com base na forma, desenvolvimento e tamanho das partículas (AMARO FILHO et al., 2008).

Outra atributo importante quanto a vulnerabilidade dos taludes aos deslizamentos é o Índice de Plasticidade, onde esse pode ser obtido através da diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP). O primeiro representa, indiretamente, a resistência do solo ao cisalhamento a um determinado teor de umidade e o segundo representa o teor de umidade mínimo onde a coesão entre as partículas é baixa ao ponto de impossibilitar a deformação, porém suficientemente alta para garantir a forma adquirida pela amostra (SOUZA et al., 2000).

O objetivo neste trabalho foi verificar a influência dos atributos físicos e mecânicos do talude fluvial no comportamento da erosão na margem direita do baixo São Francisco município de Amparo de São Francisco, estado de Sergipe.

4 Material e Métodos

4.1 Características da área experimental

O ensaio experimental foi realizado na margem direita do baixo São Francisco, município de Amparo de São Francisco, Sergipe (coordenadas UTM N= 8.868.789,506 / E= 736.583,864). O solo da área experimental foi classificado como Neossolo Flúvico (HOLANDA, 2000).

O clima do trecho sedimentar do baixo São Francisco, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Am (clima megatérmico úmido e subúmido) com temperatura média anual de 25° C, sendo dezembro o mês mais quente, com temperaturas entre 26 e 27 °C, e junho o mês mais frio, com temperaturas em torno dos 23° C. A precipitação média anual é de 744,0 mm ano⁻¹, com variações na distribuição das chuvas ao longo do ano, com período chuvoso entre os meses de março e agosto e o período seco entre os meses de dezembro e fevereiro (CODEVASF, 2003).

O talude marginal estudado foi identificado, por meio de campanhas de campo para reconhecimento do local, e levantadas informações referentes ao nível de degradação (cobertura vegetal incipiente, estágio e tipo do processo erosivo), proximidade do talvegue, características do terreno (declividade, textura e estrutura do solo, comprimento da rampa), apresentando as seguintes dimensões: comprimento 100,0 m, largura: 15,0 m, perfazendo uma área total de 1500,00 m², altura média de 6,00 m, inclinação média de 89,7 %, Vazão média do curso d'água de 2.557 m³. s⁻¹(Figura 1).

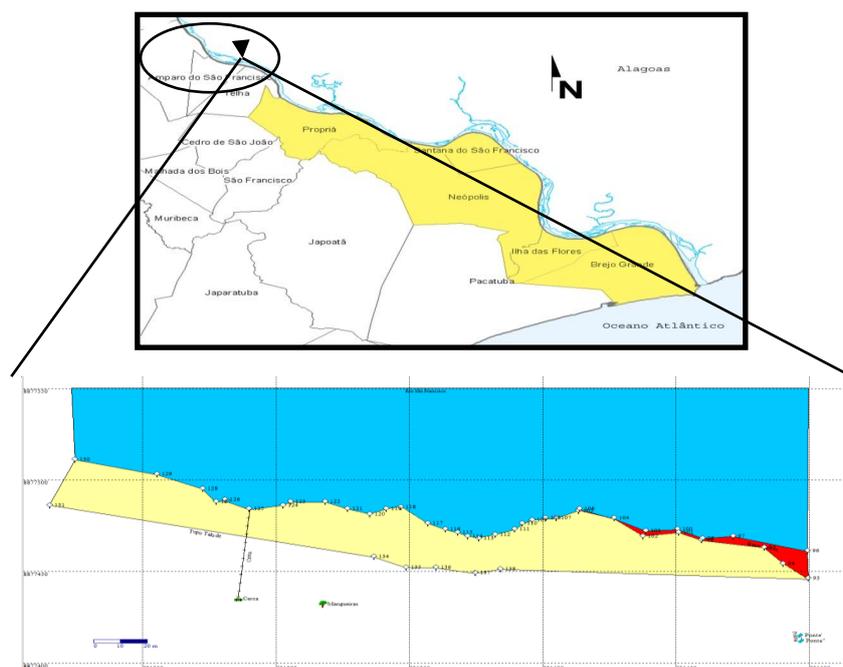


FIGURA 1. Localização da área experimental no município de Amparo de São Francisco no Estado de Sergipe (ADAPTADO DE SERGIPE, 2004).

Os dados climatológicos referente à média mensal para o período de coleta no município de Amparo de São Francisco foram obtidos pelo INMET através da estação de superfície convencional, como precipitação: 260,3 mm; temperatura máxima: 29,3 °C; mínima: 22,4°C; velocidade média do vento: 2 m.s⁻¹; umidade relativa do ar: 84,7%.

4.2 Coleta e análise do solo

Para a o estudo do solo foram realizados inicialmente levantamentos expeditos no terreno, que consistiu de operações rápidas da área; de precisão grosseira, e que ofereceu informações de caráter geral do terreno. Posteriormente estas informações serviram para a definição e o planejamento do levantamento regular realizado. Nas coletas de campo observaram as prescrições da NBR 6497 (1983), NBR 6502 (1995), NBR 8044 (1983), NBR 11682 (2009)), além de um extenso programa experimental e laboratorial. As investigações envolveram levantamento topobatimétrico, coleta de amostras indeformadas de solo e execução de furos de sondagem a trado com coleta de

amostras deformadas retiradas das camadas de solo representativas do maciço do talude. Posteriormente, à coleta de amostras foram realizados ensaios laboratoriais, possibilitando a caracterização e identificação das propriedades físicas e mecânicas do solo.

As amostras de solos foram coletadas na área experimental do talude fluvial para verificar a situação geotécnica do mesmo antes da implantação de elementos de contenção. As amostras indeformadas foram coletadas em cilindros de alumínio e as deformadas por meio de sondagem a trado até o nível d'água, a cada 20 m totalizando 5 amostragens da área experimental (Figura 2).

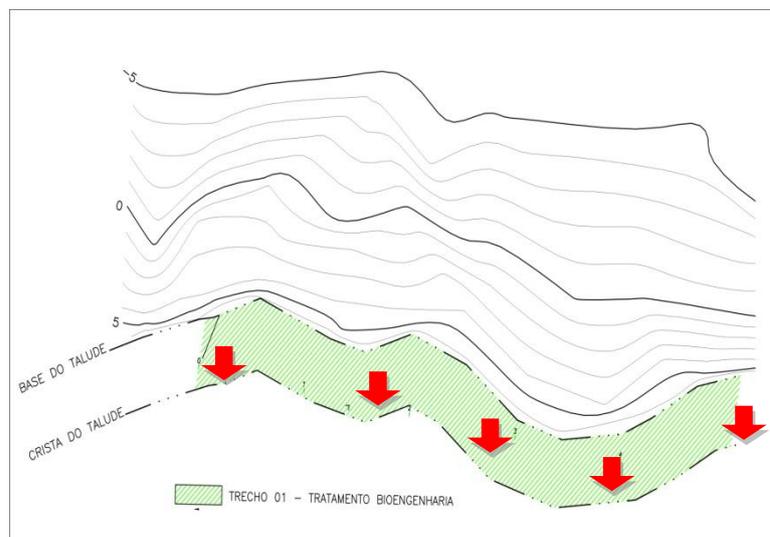


FIGURA 2. Trecho correspondente ao talude marginal onde foi implantada a técnica de bioengenharia de solos.

Foram realizados ensaios com amostras de solo no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe, para a caracterização dos solos e determinação dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito). Os ensaios de caracterização consistiram em ensaios de análise granulométrica, determinação da densidade real, teor de umidade e limites de Atterberg. Além do ensaio de cisalhamento direto para determinação da resistência ao cisalhamento (coesão e o ângulo de atrito do solo).

As amostras de solo foram coletadas em períodos distintos, conforme apresentado na Tabela 1.

TABELA 1. Coleta de amostras de solos no talude fluvial

Coletas	Descrição	Data	Tipo de Amostra
Coleta 1	Terreno Natural	20/05/2011	Indeformadas
Coleta 2	Terreno Natural	14/05/2011	Deformadas

Coleta 1: Foram realizadas cinco coletas locais, e espaçadas a cada 20 metros. O solo foi coletado com cilindros de aço com diâmetro de 0,15 m e altura de 0,20 m, e somente estas amostras foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto.

Coleta 2: foram executados cinco furos de sondagem a trado ao longo do perfil do talude, localizados em seu topo, espaçados a cada 20 metros, perfurados até o nível d'água (Tabela 2). As amostras deformadas foram coletadas e acondicionadas de forma a não perder umidade, à medida que fosse sendo observada a variabilidade textural do solo. A execução da sondagem foi realizada de acordo com a NBR 9603 (1986).

TABELA 2. Coordenadas e profundidades das Sondagens a Trado

Sondagens a Trado	Profundidades	Coordenadas (UTM)	
		E	N
ST 01	0,00 a 0,83 m	731275,249	8877439,322
	0,83 a 1,50 m		
	1,50 a 2,32 m		
ST 02	0,00 a 1,50 m	731287,381	8877431,333
	1,50 a 2,50 m		
	2,50 a 3,00 m		
ST 03	0,00 a 1,44 m	731308,077	8877424,920
	1,44 a 1,80 m		
	1,80 a 2,82 m		
ST 04	0,00 a 2,30 m	731325,398	8877416,508
	2,30 a 2,88 m		
ST 05	0,00 a 1,80 m	731349,061	8877417,031
	1,80 a 2,00 m		
	2,00 a 2,94 m		

4.3 Ensaio de laboratório e análise do solo

Nas investigações de laboratório, as amostras (deformadas e indeformadas) foram preparadas para realização dos ensaios de caracterização do solo (distribuição granulométrica, limites de Atterberg e densidade de partículas) e cisalhamento direto através dos quais serão obtidos os índices físicos do solo.

O comportamento mecânico do solo foi analisado através dos seguintes índices físicos: índice de vazios, grau de saturação, densidade de partículas e umidade; determinados no ensaio de cisalhamento direto, comparados na etapa inicial (fase de adensamento) e final (fase de cisalhamento), nas amostras.

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de Geotecnia e Pavimentação do Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Sergipe. Os ensaios de caracterização foram realizados de acordo as Normas Brasileiras NBR 6459 (1984), NBR 6508 (1984), NBR 07181 (1988), NBR 07180 (1984). Os ensaios de cisalhamento direto foram desenvolvidos de acordo com a Série Normatização, 031; Método de ensaio MSL-15; Ensaio de Cisalhamento Direto em Solos (CESP, 1986).

4.4 Ensaio de cisalhamento direto

Para determinação foi utilizado o equipamento de cisalhamento direto convencional com uso de uma prensa de cisalhamento direto Marca Wille Geotechnik, modelo LO 2900, avaliando as envoltórias efetivas do solo ao longo de uma superfície de interesse, através do critério de Mohr-Coulomb.

O intercepto de coesão (c), coeficiente de atrito ($tg\Phi$) e, por conseguinte, a tensão cisalhante (τ) foram determinados por meio de corpos de prova obtidos por cravação de anéis metálicos nas amostras indeformadas dos solos, onde foram extraídos quatro corpos de provas. As tensões a que foram submetidas para ensaio foram 50, 100, 150 e 200 kPa, estimadas em função do peso específico médio dos grãos multiplicado pela altura do talude, que provavelmente englobam os níveis médios de tensões geostáticas verticais efetivas do talude onde o solo foi amostrado. A velocidade horizontal de deslocamento utilizada para os ensaios foi de $0,50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, sendo as leituras realizadas nos intervalos de 15, 30, 60 segundos e a cada 2 minutos, com a amostra sendo saturada (sob inundação) aos 30 segundos.

Para cada nível de tensão normal (σ_n) foi obtida a tensão cisalhante máxima (τ), usando a Equação de Coulomb, que permitiu obter o intercepto de coesão (c) e o coeficiente de atrito ($tg\Phi$).

$$\tau = c + \sigma_n tg\Phi \quad (1)$$

Procurando reproduzir as condições de campo em que encontra o talude e as que se pretende alcançar com a utilização da técnica de bioengenharia de solos, o ensaio foi baseado em uma fase de adensamento prévio, com as condições de carregamento citadas acima, caracterizado como ensaio de cisalhamento direto rápido com pré-adensamento (CAPUTO, 1988), medindo-se inclusive, as deformações alcançadas pelo solo.

A modalidade de ensaio rápido é caracterizada pela aplicação simultânea inicial das tensões: normal (σ_n) constante e cortante (τ), sendo esta última aumentada gradativamente até a ruptura do corpo de prova. Neste ensaio, o corpo de prova foi colocado na caixa de cisalhamento que contém placas porosas, de forma que a metade inferior do corpo ficou dentro da caixa de cisalhamento, e a metade superior, dentro do anel. A força horizontal provocou o deslocamento, com velocidade constante, da metade do corpo de prova, cuja resistência oferecida pela outra metade foi registrada por leitura feita pelo relógio comparador do anel dinamométrico. Determinando-se, assim, para cada tensão normal (σ_n) aplicada à superfície de deslizamento, o valor da força cortante (τ) necessária para provocar a deformação contínua do solo até a ruptura do corpo de prova (LAMBE, 1951).

5. Resultados e Discussão

5.1 Caracterização e Classificação do talude

As características granulométricas observadas no talude fluvial apresentaram pequenas descontinuidades preenchidas com textura argilossiltosas nas camadas superiores e as camadas inferiores uma textura média classificada como franco-arenosa na amostra ST 01 e nas demais ST 02, 03, 04 e 05 textura arenosa (Tabela 3). Esta disposição das camadas com granulometria distinta é explicada pelo processo de formação dos Neossolos Flúvicos que consiste na deposição de sedimentos aluviais de origem variada ao longo do tempo sem uma relação pedogenética definida.

TABELA 3. Caracterização física das amostras coletadas no talude marginal

Amostras	Profundidade	Umidade	Granulometria					SUCS ¹	Classe Textural ²
			Areia			Silte	Argila		
			Grossa	Fina	Total				
	m	Kg kg ⁻¹	g kg ⁻¹						
ST 01	0,00 a 0,83 m	0,104	1,1	63,3	64,4	486,6	449,0	CL	Argilosa
	0,83 a 1,50 m	0,089	0,00	109,8	109,8	469,1	421,1	ML-CL	Argilosa
	1,50 a 2,32 m	0,023	52,3	564,5	616,8	214,3	168,9	SM	Franco-Arenosa
ST 02	0,00 a 1,50 m	0,088	0,5	25,6	26,1	558,8	415,1	CL	Argilosa
	1,50 a 2,50 m	0,079	0,5	9,2	9,7	504,3	486,0	ML	Argilosa
	2,50 a 3,00 m	0,006	233,7	627,1	860,8		139,2	SP	Areia
ST 03	0,00 a 1,44 m	0,066	1,6	78,9	80,5	501,7	417,8	CL	Argilosa
	1,44 a 1,80 m	0,091	7,1	100,8	107,9	446,6	445,5	CL	Argilosa
	1,80 a 2,82 m	0,003	169,9	654,5	824,4		175,6	SP	Areia
ST 04	0,00 a 2,30 m	0,059	0,4	36,2	36,6	470,2	493,2	CL-ML	Argilosa
	2,30 a 2,88 m	0,010	231,4	614,9	846,3		153,7	SP	Areia
ST 05	0,00 a 1,80 m	0,046	0,00	9,0	9,0	515,3	475,7	ML	Argilosa
	1,80 a 2,00 m	0,065	10,7	31,7	42,4	490,7	466,9	ML-CL	Argilosa
	2,00 a 2,94 m	0,002	126,4	786,8	895,2		86,8	SP	Areia

1 Sistema Unificado de Classificação do Solo ; 2 Santos et al (2005).

A Tabela 3 mostra a predominância da fração areia nas camadas mais profundas do talude, próxima ao nível d'água. Estas camadas apresentaram baixos teores das frações silte e argila, com exceção da amostra ST 01 na profundidade 1,50 a 2,32 m, onde se observou 38,32 percentual de finos. De acordo com Brandy (1989), solos com textura arenosa apresentam uma maior quantidade de espaços vazios, ou seja, uma maior macroporosidade, devido à baixa atividade dos agentes cimentantes, o que leva à formação de agregados com baixa estabilidade. A formação de agregados com baixa estabilidade, principalmente nas camadas mais inferiores das margens dos rios, possui correlação positiva com a erodibilidade de solos em taludes marginais.

Em relação aos Índices de Atteberg, todas as amostras nas porções inferiores do talude foram classificadas como não plástica (NP) e não líquida (NL), baixa consistência das amostras demonstrando o caráter arenoso, possuindo coloração variando entre amarelo claro e marrom escuro, textura em grande parte granular, maior concentração de frações médias, aparentando possuir considerável quantidade de mica. Esses valores podem ser explicados pelas altas frações de areia que fazem parte da composição das amostras. As amostras superiores apresentaram Índices de Plasticidade (IP) variáveis entre 15 e 21% (Tabela 4). Materiais que apresentam IP acima de 15% são classificados como altamente plásticos (MENEZES *et al.*, 2003). Os altos valores de IP estão relacionados com a umidade que as amostras conseguem reter através dos teores de finos que compõem o talude, aumentando sua resistência mecânica ao cisalhamento.

TABELA 4. Valores de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP) das amostras analisadas

Sondagens a Trado	Profundidade	LL %	LP %	IP %
ST 01	0,00 a 0,83 m	44	23	21
	0,83 a 1,50 m	40	23	17
ST 02	1,50 a 2,32 m	NL	NP	-
	0,00 a 1,50 m	40	24	16
	1,50 a 2,50 m	45	27	18
ST 03	2,50 a 3,00 m	NL	NP	-
	0,00 a 1,44 m	40	24	16
ST 04	1,44 a 1,80 m	41	23	18
	1,80 a 2,82 m	NL	NP	-
ST 05	0,00 a 2,30 m	44	26	18
	2,30 a 2,88 m	NL	NP	-
ST 05	0,00 a 1,80 m	41	26	15
	1,80 a 2,00 m	44	25	19
	2,00 a 2,94 m	NL	NP	-

*NL – Não Líquido; NP – Não Plástico

O processo de erosão em taludes marginais ocorre geralmente em dois momentos, sendo iniciado pelo solapamento da base, que consiste na retirada do material das camadas mais inferiores através do fluxo e refluxo do rio, e finalizado pelo desmoronamento do talude (HOLANDA et al., 2007). Xia et al (2008) observaram que a predominância da fração argila nas camadas inferiores dos taludes contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento dos mesmos devido à maior agregação fornecida ao solo na região onde o fluxo d'água próximo ao talude é alto. As propriedades mecânicas de um talude estão ligadas à sua composição granulométrica onde a erodibilidade é inversamente proporcional aos teores de silte e argila, desta forma taludes que apresentam sedimentos com maiores porcentagens de silte e argila resistirão mais ao processo erosivo (JULIAN e TORRES, 2006; ROCHA e SOUZA FILHO, 2008).

A composição granulométrica do solo é um atributo físico que influencia indiretamente a resistência ao cisalhamento do solo, visto que ela altera a coesão das partículas e o ângulo de atrito interno (BRAIDA et al., 2007; PARKER et al., 2008). O predomínio da fração areia provoca um acréscimo no ângulo de atrito interno e uma diminuição da coesão, aumentando a susceptibilidade do solo ao processo erosivo

através da redução da resistência ao cisalhamento e intensificando a movimentação de massa. Essas faixas de frações granulométricas diferentes, provavelmente apresentarão uma anisotropia de resistência ao cisalhamento no sentido vertical e horizontal, constituída por parâmetros de coesão e ângulos de atrito distintos ao longo do talude, acompanhando essa variação granulométrica, consequência do processo de formação do solo.

Silva e Carvalho (2007) observaram um aumento significativo nos valores de ângulo de atrito interno com o aumento dos teores da fração areia no solo. A granulometria mais grosseira observada na base do talude (Tabela 3) quando associada a outras variáveis atuantes no processo erosivo como, velocidade dos ventos e movimento de ondas, levam ao aumento do movimento de massa de solo. Esse movimento é intensificado devido à maior fração de areia presente na base do talude, visto que esse material confere baixa coesão ao solo e quando associado à ausência de cobertura vegetal torna-se mais susceptível aos processos de umedecimento e secagem ocasionados pelas variações na cota do rio, culminando na fácil desagregação das partículas quando submetidas a pequenas forças.

O aumento da resistência ao cisalhamento em taludes marginais pode ocorrer com a manutenção da vegetação, visto que a presença de cobertura vegetal em taludes além de fornecer carbono orgânico que contribui para agregação do solo tornando-o menos susceptível à ação de forças de desprendimento, promove o aumento da resistência aos deslizamentos através das fibras dos sistemas radiculares que reforçam o solo e promovem o aumento da coesão aparente, o que pode contribuir para a redução das perdas por erosão marginal (JANKAUSKAS et al., 2008; MICKOVSKI e VAN BEEK, 2009; YAO et al., 2009; OSTERKAMP e HUPP, 2010).

Sotir e Gray (1997) afirmam que a coesão proporcionada pelo sistema radicular da vegetação é essencial em solos com elevados teores de areia para o aumento na resistência aos movimentos de massa visto que esses solos apresentam pouca ou nenhuma coesão intrínseca. Normaniza e Barakbah (2006) trabalhando com taludes que apresentavam diferentes áreas de cobertura vegetal observaram que os maiores valores de resistência ao cisalhamento foram encontrados para os solos com 100% de cobertura vegetal, demonstrando a importância do sistema radicular no controle da erosão.

As camadas mais superiores apresentaram maiores teores de finos, silte e argila, o que provoca um aumento na resistência do solo ao cisalhamento através da

diminuição do ângulo de atrito interno e aumento da coesão (Tabela 3). Silva e Carvalho (2007) trabalharam com solos de tabuleiros costeiros e observaram aumento na resistência ao cisalhamento nas amostras com maiores teores de argila. Solos predominantemente finos são mais resistentes ao processo de erosão fluvial, no entanto, estão mais vulneráveis aos demais processos erosivos (COUPER, 2003). O aumento da resistência ao processo de erosão marginal se dá devido à possibilidade de formação de maior coesão entre as partículas de solo (WEBB e STRONG, 2011).

Em taludes fluviais, a velocidade e pressão de percolação da água são maiores nas camadas mais inferiores do que nas partes superiores provocando a movimentação das partículas ao longo do fluxo d'água. No entanto, nas camadas superiores, devido ao afloramento da água presente no talude, ocorre o transporte e retirada das partículas mais finas de maneira horizontal, fenômeno conhecido como erosão piping, contribuindo para uma situação de desequilíbrio no talude (BANDEIRA, 2005).

A umidade representa um importante atributo físico para determinação da vulnerabilidade dos taludes à erosão marginal. As amostras analisadas nas porções inferiores são mais sujeitas às variações da cota do rio, as camadas superficiais apresentaram os maiores teores de umidade (Tabela 3). Essa porcentagem de umidade representa a umidade higroscópica que está intrinsecamente relacionada aos teores de silte e argila presentes no solo evidenciando o aumento na capacidade de retenção de água quando há predominância de frações com sua maior superfície específica (CARDUCCI et al., 2011).

É possível afirmar que as camadas inferiores das amostras estudadas estão mais susceptíveis à erosão quando comparadas às outras amostras por apresentarem alta drenagem devido à sua composição granulométrica com predominância da fração areia o que reduz a agregação das partículas do solo e não proporcionam coesão suficiente para manter as partículas unidas quando submetidas a forças externas (Tabela 3). Além disso, essas amostras estão mais sujeitas ao desprendimento das partículas por estarem mais próximas ao nível d'água, onde sofrem frequentemente as variações na cota do rio aumentando constantemente o teor de água no solo e por seguinte o efeito lubrificante entre os seus constituintes, fazendo com que as partículas fiquem mais distantes umas das outras, provocando redução na coesão (PARKER et al., 2008). Em taludes fluviais, esse fenômeno também é comum em trechos chamados de faixas de oscilação, onde alguns trechos do talude sofrem ciclos de secagem e umedecimento através das

oscilações na cota do rio. Com a redução na coesão a resistência ao cisalhamento do talude é diretamente reduzida tornando a margem mais erodível especialmente em períodos onde o fluxo do rio apresenta uma baixa carga sedimentar (XIA et al., 2008). Entretanto, Silva et al., (2004) e Normaniza e Barakbah (2006) identificaram menor resistência ao cisalhamento em encostas com baixos teores de umidade.

A maior porcentagem de umidade apresentada pela amostra 01 – (0,00 a 0,83 m) também pode ser explicada pela maior presença de teores de matéria orgânica oriunda da decomposição da serrapilheira proveniente da vegetação presente nesse ponto quando comparada a outros pontos, visto que a área correspondente ao ponto 01 apresentava vegetação mais densa (Tabela 3). Normaniza e Barakbah (2006) e Yao et al (2009) identificaram maiores teores de umidade e maior capacidade de retenção de água, respectivamente, nas camadas mais superiores dos solos que apresentavam densa cobertura vegetal, devido ao extenso sistema radicular presente nos solos onde a umidade diminuía com o aumento da profundidade.

As camadas superiores por apresentarem maior capacidade de armazenamento de água devido à composição granulométrica que as compõem possivelmente comprometerão a estabilidade do talude quando saturados devido à redução da altura vertical crítica do mesmo. Xia et al (2008) observaram que um talude com predominância da frações finas, silte e argila, teve sua altura vertical crítica reduzida de 6,6 m quando seco a 0,80 m quando saturado, indicando que o mesmo sofreria desmoronamento somente através da sua saturação sem a ação de forças externas. Quando o talude está saturado ocorre o aumento do seu peso específico, visto que o peso específico do solo úmido é maior do que quando seco, além do fluxo de água ser superior, o que aumenta o peso sobre as partículas do solo, desta forma a pressão no talude aumenta por si só, provocando facilmente o movimento de massa (NORMANIZA e BARAKBAH, 2006).

5.2 Análise do comportamento do solo em relação aos índices mecânicos

As amostras coletadas apresentaram diferenças nas características granulométricas, no cilindro de coleta. Esse fato promoveu comportamentos distintos de determinados parâmetros ao longo dos ensaios e nos seus limites.

No geral, observou-se para todas as tensões que o desenvolvimento do índice de vazios, grau de saturação e massa específica, não acompanharam a proporcionalidade direta, para as amostras que apresentaram os menores valores dos parâmetros no estado inicial serem as mesmas do estado final e vice-versa, no universo da coleta 1.

As amostras coletadas apresentaram os menores valores do índice de vazios na fase final, ainda nessa fase apresentaram os maiores graus de saturação e peso específico na fase final do ensaio (Tabela 5).

TABELA 5. Parâmetros físicos das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto nas tensões de 50, 100, 150 e 200 kPa

Amostras	Tensões Normais	Densidade de partículas de solo inicial	Densidade de partículas do solo seco final	Índice de vazios inicial	Índice de vazios final	Grau de saturação inicial	Grau de Saturação final	Umidade inicial	Umidade final
	kPa	g cm ⁻³	g cm ⁻³	%	%	%	%	%	%
1	50	1.448	1.475	0.82	0.78	62.9	100.3	19.51	29.88
	100	1.428	1.534	0.84	0.71	58.9	105.7	18.85	28.70
	150	1.472	1.585	0.78	0.66	60.8	103.4	18.2	25.93
	200	1.490	1.580	0.76	0.66	56.9	102.5	16.54	25.91
2	50	1.578	1.615	0.67	0.63	84.8	108.9	21.63	26.21
	100	1.567	1.631	0.68	0.62	83.2	102.9	21.6	24.14
	150	1.530	1.643	0.72	0.60	87.4	110.9	24.06	25.53
	200	1.502	1.632	0.75	0.61	79.3	107.2	22.79	25.12
3	50	1.625	1.635	0.63	0.62	95.3	105.2	22.79	24.77
	100	1.593	1.658	0.66	0.60	87.2	105.0	21.95	23.83
	150	1.593	1.681	0.66	0.58	82.9	100.0	20.85	21.90
	200	1.630	1.749	0.63	0.52	87.0	108.9	20.64	21.31
4	50	1.737	1.757	0.53	0.51	97.9	110.2	19.64	21.37
	100	1.580	1.608	0.68	0.65	94.5	112.4	24.34	27.74
	150	1.564	1.650	0.70	0.61	85.5	109.8	22.60	25.37
	200	1.541	1.664	0.73	0.60	82.6	107.8	22.62	24.35
5	50	1.560	1.681	0.69	0.57	83.9	125.0	22.01	26.99
	100	1.599	1.716	0.65	0.53	85.4	125.9	21.04	25.65
	150	1.566	1.639	0.68	0.61	87.5	107.1	22.70	24.76
	200	1.592	1.696	0.65	0.55	86.8	114.2	21.64	24.04

As variações do índice de vazios foram decrescendo para a amostra 1 do talude marginal, já as amostras 2, 4 e 5 apresentaram alternâncias de valores de índices de vazios e para amostra 3 a qual se estabiliza e logo após volta a diminuir para os quatro

níveis de tensões. Observou-se também, que no estado final do ensaio, o índice de vazios decresce proporcionalmente com o aumento da tensão efetiva, praticamente para todas as amostras coletadas.

De acordo Souza Pinto (2006) quando há um acréscimo de tensão aplicado a água dos espaços vazios suporta esta pressão, com isso a água sai e ocorre redução do índice de vazios, ou seja, está havendo deformação na estrutura sólida do solo. Caputo (1988) relata também que onde existe variação do índice de vazios indica uma variação de volume, dependendo do volume de vazios, uma vez que o volume da parte sólida não varia, ou varia pouco, durante o fenômeno de adensamento.

O índice de vazios expressa a relação existente entre o volume de vazios e o volume de sólidos de um solo (CAPUTO, 1988). Os índices de vazios das amostras mesmos apresentando essas variações nas tensões submetidas apresentaram em seu comportamento valores próximos de 1.0, isto se refere quando o volume de sólidos do solo é aproximadamente igual ao volume de espaços vazios. Proporcionalmente o grau de saturação obteve o mesmo comportamento, quanto menor o índice de vazios maior preenchimento dos vazios com água (VARGAS, 1989; ORTIGÃO 1995).

As amostras 1 e 4 foram aquelas que apresentaram índices de vazios distintos. A amostra 1 apresentou o maior índice de vazios, com valor inicial de 0,842 e final 0,714. Este maior valor encontrado para o índice de vazios, além de classificar o solo como solto e poroso, justifica o menor valor de peso específico encontrado. Já a amostra 4, apresentou o menor valor de índice de vazios, com valor inicial de 0,535 final e 0,517 e ao contrario da amostra 1 o seu peso específico foi maior. Concordando com Ribeiro et al (2007) esse comportamento justifica o menor valor do peso específico aparente seco encontrado para a mesma. Corroborando o resultado dos ensaios onde as amostras em todas as tensões, na fase inicial e final do ensaio, que possuem o menor índice de vazios, possuem o maior peso específico e vice-versa.

O grau de saturação na fase final do ensaio apresentou-se maior que na fase inicial para todas as amostras, nos quatro níveis de tensões. Possivelmente, em virtude da inundação do solo no anel do corpo de prova na fase de adensamento. Os valores do grau de saturação foram crescendo em torno de um intervalo variando em média 3,88% para as amostras do estado inicial para o final do ensaio. De um modo geral, as amostras atingiram um grau de saturação maior na fase final do ensaio.

Todas as amostras se apresentaram completamente saturadas, e isto foi provocado na fase de adensamento em consequência crescimento no grau de saturação no final do ensaio. O material apresentou grau de saturação diferenciado nas rupturas. Alguns destes fatores provavelmente podem ter sido influenciados para esse comportamento como a heterogeneidade dos solos nas amostras coletadas.

O solo do talude fluvial possui grande variabilidade, que varia de lugar para lugar e que não pode ser observado em sua totalidade, mas tão somente através de amostras, ainda assim suscetíveis a alterações quando de sua extração das amostras. Mais ainda, o seu comportamento é função das tensões com que é solicitado, bem como depende do tempo e do meio físico (CAPUTO, 1988).

A variação apresentada pelo grau de saturação influencia no comportamento do solo refletindo as condições que se encontra em campo, em seus diferentes níveis de umidade. Consequência dos embates da corrente fluvial, em diferentes frequências, tensões, níveis de carregamento, desenvolvendo variações cíclicas e aleatórias no comportamento mecânico e geotécnico do solo, influenciando o grau de estabilidade do talude fluvial.

Essas condições hidráulicas e hidromecânicas do terreno e o estado de saturação do solo, características que condicionam a sua poro-pressão, estando de acordo com Coronado e Diniz (2005), sua resistência pode determinar a estabilidade da encosta.

Para as amostras coletadas, o grau de saturação apresenta proporcionalidade direta com a massa específica. Não foi possível definir um comportamento nítido com a umidade. A massa específica aparente do solo seco aumentou no estado final. Em termos médios o aumento da massa específica foi proporcional ao aumento nas quatro tensões. Esse comportamento é consequência do aumento dos esforços para os quais o solo é solicitado e a diminuição do volume de solo no anel, devido ao adensamento. Além da variação da rigidez e resistência, segundo Filho et al. (2001) ocorreu aumento do peso da massa de solo proveniente do aumento da umidade.

As amostras que apresentaram peso específico menor pode ter sido devido à contribuição da matéria orgânica no solo. Concordando com os achados de Caputo (1988) e Ribeiro et al (2007) que o peso específico das partículas diminui para os solos que contêm elevado teor de matéria orgânica.

Essas menores densidades de partículas de solo observadas na amostra 1 foram identificadas em experimentos conduzidos por Reinert et al. (2008) que colocam que podem estar relacionadas à maior teor de matéria orgânica.

Contudo, no universo das amostras, as que apresentaram maior percentual de frações finas como visto na amostra 4 apresentaram as menores umidades e os maiores pesos específicos, exceto na amostra 1 que apresentou menor umidade e menor peso específico, isto pode estar relacionado com a presença de raízes no corpo de prova analisado. E os solos com maior presença de frações grossas tiveram maiores umidades e menores pesos específicos. Contrariando a relação de aumento de massa devido ao aumento da umidade. Possivelmente, esse comportamento alterado é devido à influência das raízes no solo.

De modo geral, as amostras de solo coletadas nos pontos de coleta correspondente, apresentaram maiores valores de umidade. Essas amostras apresentaram umidades finais maiores que as iniciais.

As amostras apresentaram na fase inicial do ensaio, as menores umidades, encontrando-se não saturadas, peso específico menor e índice de vazios relativamente alto. Como possivelmente, a tensão de 200 KPa encontra-se em um nível de tensões maior do que o nível que efetivamente atua no talude, a atuação dessa pressão no solo confinado no anel de cisalhamento, diminui ainda mais o índice de vazios, e sendo o solo posteriormente inundado, não consegue absorver água, que não consegue percolar na estrutura do solo. Possivelmente, ao invés de absorver mais água com a inundação, a água é expulsa, enquadrando o solo, em níveis de umidade menores do que as iniciais. Para as demais tensões, provavelmente a perda de umidade ocorreu devido ao manuseio da retirada do anel depois de realizado o ensaio, que inclusive influenciou o grau de saturação das amostras.

A variação da umidade desenvolve-se em termos gerais, proporcional em relação ao índice de vazios. É conveniente ressaltar que mesmo as amostras que apresentaram umidade alta, o peso específico aparente do solo seco encontra-se baixa e o índice de vazios alto, ou seja, mais um indício que o solo está possivelmente no estado solto.

Segundo Braidá et al. (2007) o aumento ou redução da resistência do solo dependerá do balanço entre seus efeitos conjuntos sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação de água.

5.3 Resistência ao cisalhamento e estabilidade mecânica do talude fluvial

Para análise dos parâmetros mecânicos do solo foram coletadas as amostras antes da implantação do experimento de bioengenharia de solos. A predominância nas camadas de solo de textura argilosa e os respectivos valores do intercepto coesivo no topo do talude indicam que a faixa de solo constituinte nessa área do talude encontra-se completamente susceptível ao processo erosivo (Tabela 6).

TABELA 6. Valores da coesão e do ângulo de atrito obtidos no ensaio de cisalhamento direto para as amostras de solo coleta 1 para os quatro níveis de tensões (50 kPa – 100 kPa – 150 kPa – 200 kPa)

Amostras	Coesão kPa	Angulo de Atrito °
01	8.135	32.79
02	31.327	24.91
03	34.166	28.95
04	42.101	24.52
05	7.150	33.16

No comportamento cisalhante do Neossolo Flúvico, as tensões de ruptura ocorreram para deformações axiais variando de 0,08% a 3,76% com picos médios de 85 e 122 KPa. Em relação à coesão e o ângulo de atrito das amostras superficiais de solo, os menores valores são para as amostras 05 ($c = 7.150$ KPa) e a amostra 04 (24.52°) (Tabela 6).

Por tratar-se de um Neossolo Flúvico, foram encontradas diferentes granulometrias no universo das amostras coletadas, fator que interfere no comportamento mecânico e na resistência ao cisalhamento do solo. Isto se explica pela variabilidade horizontal e vertical das camadas que compõe os Neossolos Flúvicos resultantes da sedimentação na margem do rio nos ciclos de inundação.

Na análise efetuada, fazendo-se o comparativo das amostras 2, 3 e 4 considerando o local de coleta de solo, observou-se de uma maneira geral, os melhores resultados do intercepto coesivo do solo. Em relação ao ângulo de atrito foi observada uma diminuição dos seus valores para as amostras 2, 3 e 4 (Tabela 6). Retomando a abordagem anterior do comportamento mecânico das amostras, foi constatado um

aumento na massa específica das mesmas, além de apresentarem valores maiores de umidade para 2 e 3. Esse comportamento mecânico influenciou a estabilidade mecânica do solo.

O ângulo de atrito interno é dependente da densidade e do teor de água do solo. A densidade afeta o ângulo de atrito interno por estar relacionada ao arranjo espacial das partículas, ou seja, o número de pontos de contato entre as mesmas, sendo que para um mesmo material, o atrito é tanto maior quanto maior a densidade. A água afeta o ângulo de atrito interno por constituir-se em um agente lubrificante entre as partículas sólidas. A adição de água ao solo resulta na formação de filmes de moléculas de água ao redor das partículas minerais, reduzindo o atrito entre as mesmas. Portanto, o efeito da matéria orgânica sobre o ângulo de atrito interno dos solos, vai depender de seus efeitos sobre a densidade e a retenção de água dos mesmos. Em baixos teores de água as substâncias orgânicas, por reterem fortemente a água, podem aumentar a fricção entre as partículas minerais (SOANE, 1990; ZHANG E HARTGE, 1990), pois impede que a mesma se distribua uniformemente entre elas.

As amostras que apresentaram umidade elevada, possivelmente não reteram a água utilizada suficientemente para aumentar a fricção entre as partículas do solo, houve uma distribuição uniforme dessas moléculas de água, diminuindo o atrito entre as mesmas. Conseqüentemente, promoveu valores de ângulo de atrito menores para as amostras (Tabela 6).

Outro fator é a incorporação da matéria orgânica através da vegetação para efeito de coesão do solo. Isso decorre da natureza coloidal e molecular da matéria orgânica, o que lhe confere um elevado número de cargas superficiais com CTC variando entre 400 e 1400 cmolc kg^{-1} (CANELLAS *et al.*, 1999) e uma elevada área superficial específica, com ASE variando 800 e 900 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ (MEURER *et al.*, 2000). O incremento de matéria orgânica no solo resulta em maior número de ligações entre as partículas minerais, com conseqüente aumento da estabilidade dos agregados (CARPENEDO e MIELNICZUK, 1990; PALADINI e MIELNICZUK, 1991; CAMPOS *et al.*, 1995), aumento da força de retenção de água (CENTURION e DEMATTÊ, 1985), aumento da CTC (capacidade de troca catiônica) (BAYER e MIELNICZUK, 1997), entre outros atributos (BRAIDA, 2004).

Na execução dos cinco furos de sondagem a trado ao longo do talude (coleta 2), dispostas no mesmo local desses furos e das coletas de solos, foi estabelecido os níveis

médios de tensões geostáticas verticais efetivas do talude onde o solo foi amostrado, tomando como referência informações sobre as características físicas do talude obtidas nos levantamentos topográficos (Tabela 7).

TABELA 7. Valores da altura e inclinação do talude nas cinco seções (S-01, S-02, S-03, S-04 e S-05) em estudo no período de monitoramento.

	Data do Monitoramento	S-01	S-02	S-03	S-04	S-05					
Cota da Base (m)	22.05.2011	4.050	4.050	4.050	4.050	4.050					
	Altitude (m)	6.756	6.790	6.846	6.908	6.823					
Altura do Talude (m)	22.05.2010	2.706	2.740	2.796	2.858	2.773					
	1/2 H	1.353	1.370	1.398	1.429	1.387					
Inclinação do Talude (°)	22.05.2010	(1/2)H	BASE	(1/2)H	BASE	(1/2)H	BASE	(1/2)H	BASE	(1/2)H	BASE
		53	31	53	39	53	34	55	36	54	38

S: seções monitoradas; (1/2)H: ângulo de repouso (inclinação) em graus na meia altura do talude;
 BASE: ângulo de repouso (inclinação) em graus na base do talude.

5.3.1 Estado do solo solto

Como verificado as características mecânicas apresentadas em quase todas as seções de instabilidade no corpo e na base do talude, somente na seção 01 a base permanece estável num período transitório (Tabela 8).

TABELA 8. Comparativo do ângulo de repouso na base e na meia altura do talude com o ângulo de atrito interno do solo e o movimento de massa desenvolvido nas seções do talude em estudo no período de monitoramento.

Amostras	(1/2)H	BASE	(°)	CORPO	BASE	MOVIMENTO
S - 01	53	31	32.79	INSTÁVEL	ESTÁVEL	Deposição
S - 02	53	39	24.91	INSTÁVEL	INSTÁVEL	Erosão
S - 03	53	34	28.95	INSTÁVEL	INSTÁVEL	Erosão
S - 04	55	36	24.52	INSTÁVEL	INSTÁVEL	Erosão
S- 05	54	38	33.16	INSTÁVEL	INSTÁVEL	Erosão

(1/2)H: ângulo de repouso (inclinação) em graus na meia altura do talude ;BASE: ângulo de repouso (inclinação) em graus na base do talude; (°): ângulo de atrito em graus obtido no ensaio de cisalhamento direto.

Nas seções no período de monitoramento, o talude apresentou-se instável em seu corpo ((1/2)H), embora esse fato não determina condições de segurança, visto que a erosão que se processa na margem do rio São Francisco começa pela base.

Um talude de altura constante produziria o mesmo efeito geral que uma variação de altura num talude de material com resistência constante. Portanto, pode-se admitir que as deformações e rupturas de taludes de diferentes alturas, formados do mesmo material são comandadas em grande parte pela natureza do material subsequente a base do talude (TSCHEBOTARIOFF, 1978).

Ocorrem casos de instabilidade e estabilidade geotécnica na base do talude exceto seção 01, encontra-se em estágio de estabilização temporária no ciclo erosivo fluvial (Tabela 7). Para as situações de instabilidade da base, o ângulo de atrito dessa massa de solo solta depositada ou erodida promove instabilidade mecânica por possuir valores menores que o ângulo de repouso do talude.

A estabilização no ciclo erosivo não significa gerar a estabilidade mecânica do talude, pois, o que muda é o ponto de atuação da força da água no material resultante do movimento de solo que se deposita na área da base e não diretamente na base do talude, atenuando o movimento de massa ao longo do corpo do talude, que passa a desenvolver-se agora da base do talude para o rio causando assoreamento.

Para a situação de estabilidade geotécnica no corpo do talude, no período monitorado o solo continua em movimento de massa de solo, provavelmente, devido à continuidade da ação da corrente fluvial promover o estado de saturação do solo, provocando perda de sua resistência ao cisalhamento (seções com camadas de solos com percentual maior de fração fina).

Para as seções com camadas de solo com maiores percentuais de frações grosseiras, considerando o estado de saturação nas areias, mesmo que em determinados

níveis, desenvolva coesão aparente nas mesmas, ainda assim o solo é rompido devido à incidência que provoca estágios de descarregamento e carregamento do solo ou aos valores escalares da resultante das forças de atuação das ondas nesse material provocarem uma tensão cisalhante maior que a resistência do solo, levando-o a ruptura.

Segundo Bressani (2005) diz que a ruptura pode ocorrer mesmo com valores de poro-pressão inferiores ao valor necessário para que a trajetória de tensões atinja a envoltória de ruptura experimental. Isso pode acontecer devido às variações cíclicas de poro-pressão, por efeitos normais de ciclos chuva-drenagem, que levam o solo a uma espécie de fadiga. Esse aumento de poro-pressão faz com que o estado de tensões efetivas do solo se aproxime das condições de ruptura.

Pode-se considerar ainda, o estado da descida do nível d'água onde o ressecamento traz como consequência a perda da coesão aparente provocando a separação das partículas e a sua remoção pela ação da gravidade, facilitando a ocorrência de movimentos de massa gravitacionais (FONTES, 2002). Isso faz com que o solo passe então, novamente para o estado seco e provavelmente solto. A tensão de cisalhamento (τ) está diretamente relacionada com os contatos existentes entre as partículas do solo, que dependem da origem do material e dos processos naturais de umedecimento e secagem, o qual vai atuar no afastamento ou não das partículas (ROSA, 2007).

5.3.2 Estado do solo com peso específico natural, saturado e submerso

A análise desse estado foi considerada os valores da altura para cada seção na estabilidade do talude, dentro do período de monitoramento (Tabela 8).

TABELA 8. Valores da tensão vertical e cisalhante (meia altura e base) desenvolvidos nas cinco seções do talude em estudo.

VARIÁVEIS		S-01	S-02	S-03	S-04	S-05
$C_{(1/2)H}$	KPa	8.135	31.327	34.166	42.101	7.15
$\phi_{(1/2)H}$	°	32.79	24.91	28.946	24.52	33.16
C_{BASE}	KPa	7.15	7.15	7.15	7.15	7.15
ϕ_{BASE}	°	24.52	24.52	24.52	24.52	24.52
$\gamma(\text{natural})$	KN/m ³	17.07	18.83	19.57	20.39	18.99
$\gamma(\text{saturado})$	KN/m ³	19.58	20.23	20.81	20.92	20.94
$\gamma(\text{submerso})$	KN/m ³	9.77	10.42	11.00	11.11	11.34
(1/2)H	M	1.353	1.370	1.398	1.429	1.387
BASE	M	2.706	2.706	2.706	2.706	2.706
$\sigma_{(1/2)H, \text{NATURAL}}$	KPa	23.095	25.797	27.359	29.137	26.339
$\sigma_{(1/2)H, \text{SATURADO}}$	KPa	26.488	27.715	29.092	29.895	29.044
$\sigma_{(1/2)H, \text{SUBMERSO}}$	KPa	13.215	14.275	15.378	15.876	15.729
$\sigma_{BASE, \text{NATURAL}}$	KPa	56.664	46.251	54.858	56.074	54.406
$\sigma_{BASE, \text{SATURADO}}$	KPa	59.207	56.252	61.540	62.905	61.034
$\sigma_{BASE, \text{SUBMERSO}}$	KPa	32.661	29.373	34.111	34.868	33.831
$\tau_{(1/2)H, \text{NATURAL}}$	KPa	23.013	43.307	49.298	55.392	24.360
$\tau_{(1/2)H, \text{SATURADO}}$	KPa	25.199	44.198	50.256	55.737	26.127
$\tau_{(1/2)H, \text{SUBMERSO}}$	KPa	16.648	37.956	42.671	49.343	17.427
$\tau_{BASE, \text{NATURAL}}$	KPa	24.296	19.891	23.532	24.046	23.341
$\tau_{BASE, \text{SATURADO}}$	KPa	25.372	24.122	26.358	26.936	26.144
$\tau_{BASE, \text{SUBMERSO}}$	KPa	14.142	12.751	14.755	15.075	14.636

A seção S-04 mecanicamente é a seção que possui o maior peso específico, isso lhe confere condições de carregamento maiores e de suportar a maior tensão cisalhante. As menores tensões desenvolvem-se na seção S-01, que possui altura, intercepto coesivo e ângulo de atrito próximos das demais seções (S2, S3 e S5), porém apresenta um peso específico menor que as outras, que foi determinante para desenvolver as menores tensões efetivas que atuam no talude e conseqüentemente as menores tensões cisalhantes.

Segundo Lambe e Whitman (1969) acrescentam a dependência da natureza química e física da superfície das partículas. Também mencionam que a resistência ao cisalhamento é proporcional à tensão normal, pois se há redução da força normal

aplicada a um agregado, a resistência ou número de contatos entre partículas reduzem, ocasionando à diminuição da tensão cisalhante (τ) (ROSA, 2007).

Fatores como variação granulométrica do talude, diferenças estruturais das amostras e da variação do nível d' água, e/ou da sua presença podem inferir diretamente na resistência ao cisalhamento. Essa variação de parâmetros desenvolve uma anisotropia de resistência ao cisalhamento no talude, sendo que a condição de umidade é a que mais se destaca.

A quantidade de água presente no solo desenvolve numa mesma massa parâmetros distintos de resistência ao cisalhamento. O talude encontra-se em um nível de tensões geostáticas, onde a máxima seção 4 atinge 56.074 KPa (solo natural), 62.905 KPa (solo saturado) e 34.868 KPa (solo submerso). Apresentando ainda uma resistência ao cisalhamento mínima seção S1 de 24.296 KPa (solo natural), 25.372 KPa (solo saturado) e 14.142 KPa (solo submerso).

Para o talude em estudo, considerando apenas o valor escalar do vetor tensão cisalhante; qualquer tensão atuando na seção S4 maior ou igual às tensões apresentadas acima, leva o solo, nessa seção, a romper-se. Esse comportamento ocorre para as demais seções, de acordo com a resistência ao cisalhamento apresentada para cada seção, direcionada para o estado de cada peso específico.

Torna-se nítida, portanto a influência da umidade na alteração do estado de tensões no solo. Adicionalmente foi constatado para uma mesma condição de umidade no solo, o aumento da resistência ao cisalhamento com a profundidade do talude.

No caso de haver uma diminuição da sucção, o que é mais comum, o solo pode deformar plasticamente devido a esta mudança de sucção e aumento do carregamento decorrente do aumento do peso da massa de solo. As deformações geradas neste processo que pode ser de colapso, expansão, modificam o estado de tensões do solo podendo plastificar o solo, gerando rupturas localizadas que se propagam gerando o escorregamento (FILHO et al., 2001), e a conseqüente instabilização do talude.

Em termos gerais, para a condição natural do solo, dimensionando obras de contenções nos limites de maior segurança, o talude em estudo é capaz de permanecer estável, sem rupturas, resistindo tensões inferiores a 24.296 KPa, para uma análise dinâmica do solo considerando um período de observação de cinco meses.

5.4 Tempo de adensamento e cisalhamento

As amostras apresentaram um tempo médio de 3 horas como mostra a figura 3. Isto reflete a capacidade que os solos têm de responder a uma determinada carga impressa sobre ele.

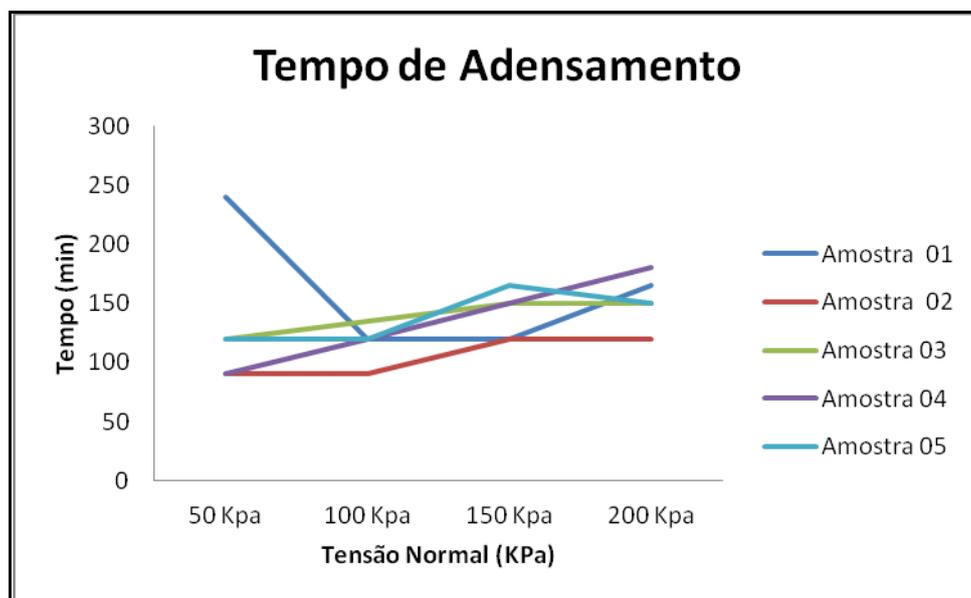


FIGURA 3. Tempo médio de adensamento do solo das amostras para cada nível de tensão do ensaio (50 kPa – 100 kPa - 150 kPa – 200 kPa).

De acordo com o comportamento mecânico das amostras em relação aos índices físicos do ensaio de cisalhamento direto, o desenvolvimento do índice de vazios, massa específica, umidade e grau de saturação para os quatro níveis de tensões apresentaram comportamento semelhante, observando que a ordem dos valores dos índices de vazios não é a mesma para o tempo de adensamento. Possivelmente, um dos fatores que influenciou as diferenças no comportamento entre as amostras avaliadas foi essa variabilidade apresentada pelo grau de saturação.

Dentre os parâmetros mecânicos o tempo de adensamento é resultante de um comportamento de um conjunto de índices físicos.

A velocidade do adensamento reflete a expulsão da água retida entre as partículas de solo e é dada pelo índice de vazios inicial do solo, que sofre influência direta da granulometria, sendo mais rápida quando este índice é mais elevado (CODUTO, 1999; SILVEIRA, 2008).

A variação do índice de vazios indica uma variação de volume, dependendo por sua vez do volume de vazios em que o volume da parte sólida a variação é nula ou quase nula, durante o adensamento. As amostras que demoraram mais a adensarem significa dizer os índice de vazios estão ocupados por raízes (CAPUTO, 1988)

Segundo Braidá et al., (2002) a matéria orgânica contribui para a elevada capacidade de retenção de água, pois ao atrair a água para suas partículas, a matéria orgânica reduz o efeito da água na diminuição da fricção entre as partículas minerais. Se a fricção é maior, menor é o índice de compressão do solo. E provavelmente este necessitará de um tempo maior para adensar.

As amostras apresentaram um tempo crescente para cisalhamento conservando a mesma ordem para as amostras analisadas. Apesar de não se desenvolverem na mesma proporção. Em termos gerais, considerando valores médios, o tempo de cisalhamento apresentou-se maior para as amostras submetidas a tensões de 200 Kpa. Ou seja, as amostras de solo romperam-se com maior facilidade e com rapidez, contudo demoram a adensar uma das possíveis ocorrências é devido a presença de raiz (Figura 4).

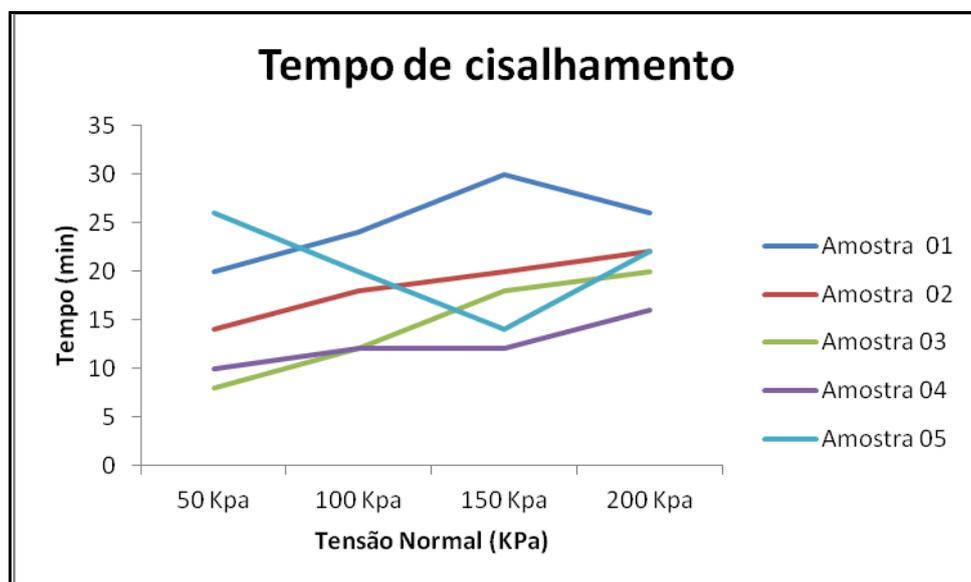


FIGURA 4. Tempo médio de cisalhamento do solo das amostras para cada nível de tensão do ensaio (50 kPa – 100 kPa – 150 kPa – 200 kPa).

A matéria orgânica pode ser associada a dois efeitos contraditórios sobre a resistência do solo: aumento da força de ligação entre as partículas minerais e mudança no arranjo das partículas (diminuição da densidade) (EKWUE, 1990; ZHANG, 1994,

HORN e LEBERT, 1994). O aumento ou redução da resistência do solo dependerá do balanço entre seus efeitos conjuntos sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação de água (ZHANG et al., 1997).

5.5 Deformações do solo

A deformação do solo e a susceptibilidade do solo à compactação estão relacionadas ao estado inicial de compactação, grau de saturação, pressão aplicada ao solo, matéria orgânica e estrutura do solo (SILVA et al., 2000)

As deformações aumentaram com o aumento do nível das tensões. Porém, não dentro de uma mesma taxa de variação. Também, em termos médios as amostras submetidas à tensão 200 kPa apresentaram uma maior deformação quando comparada com as demais tensões (Figura 5).

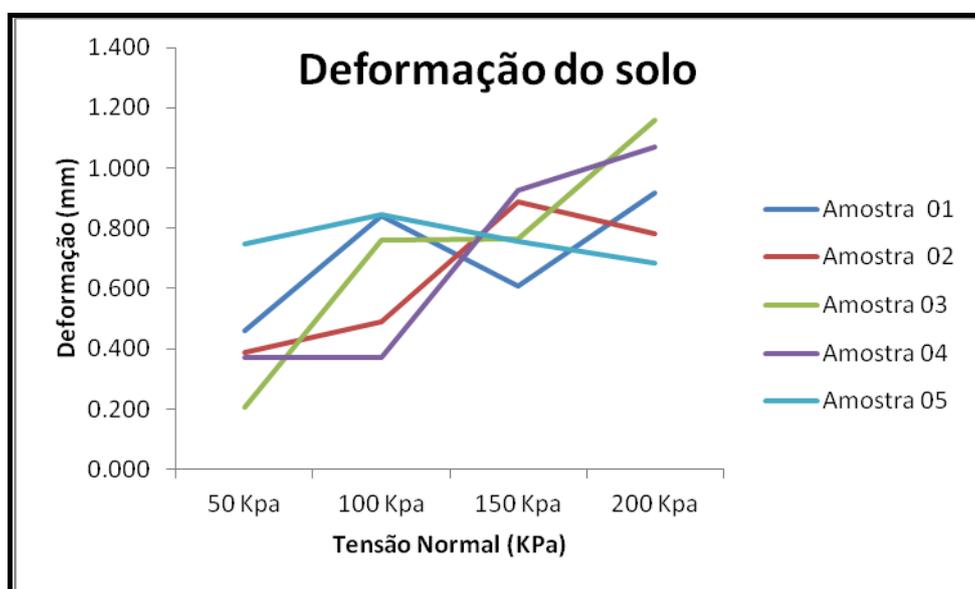


FIGURA 5. Desenvolvimento médio das deformações do solo das amostras para cada nível de tensão do ensaio (50 kPa – 100 kPa – 150 kPa – 200 kPa).

Em experimentos realizados por Braida *et al.* (2002) foi observado que o aumento do teor de carbono orgânico resultou em redução no índice de compressão do solo. Tal comportamento justifica-se pela capacidade da matéria orgânica em estabelecer ligações entre as partículas minerais, em função do seu elevado número de cargas superficiais e elevada área superficial específica. Assim, o incremento em matéria orgânica resultaria em aumento do número de ligações entre as partículas

minerais e, pelo efeito aditivo dessas ligações, em aumento da resistência do solo à deformação.

A maior deformação foi apresentada pela amostra 3 com composição granulométrica Argilo Siltosa em relação às demais amostras. Por sua vez trata-se das mesmas amostras em termos de comparação granulométrica. Esse comportamento foi observado em achados de Braida et al. (2002), em que o efeito do carbono orgânico é dependente da tensão de água no solo. Esse comportamento está relacionado ao fato de que a compressibilidade do solo é dependente do grau de saturação do solo (SILVA *et al.*, 2000) e sua condutividade hidráulica.

Assim, para solos muito úmidos a compressibilidade é muito limitada pelo elevado grau de saturação inicial, impossibilitando a manifestação do efeito da matéria orgânica. Entretanto, à medida que o solo se tornou mais seco, o grau de saturação diminuiu e a compressibilidade tornou-se maior, permitindo a manifestação do efeito da matéria orgânica sobre a mesma.

5.9 Tensões cisalhantes

Em relação à variação dos índices físicos do solo e as tensão do ensaio, percebeu-se que não existe uma padrão de desenvolvimento desses índices (Figura 6), esse fenômeno não poderia existir devido ao dinamismo do comportamento do solo da bacia, provocando diferentes níveis de carregamento no mesmo, movimentos de massa, variações de cota de nível d'água; provoca uma variabilidade nos índices físicos e geotécnicos do talude. Caso existisse somente uma variação no nível de tensões, o comportamento do talude possivelmente seria constante.

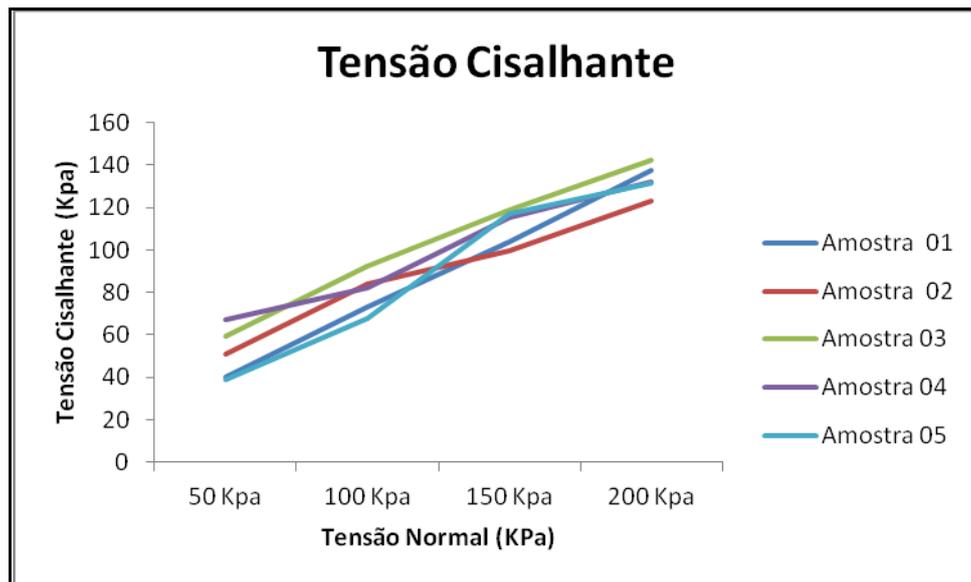


FIGURA 6. Desenvolvimento médio das tensões cisalhantes do solo das amostras para cada nível de tensão normal do ensaio (50 KPa – 100 KPa – 150 KPa – 200 KPa).

O comportamento supracitado também foi constatado por Braida et al. (2007) que mencionam que na literatura, encontram-se resultados contraditórios, mostrando situações em que maiores teores de matéria orgânica são acompanhados de diminuição da resistência ao cisalhamento do solo (OHU; et al., 1985; OHU et al., 1986; EKWUE, 1990) e outros nos quais essa aumenta (DAVIES, 1985; EKWUE, 1990). Provavelmente, essas diferenças são devidas à origem da matéria orgânica (EKWUE, 1990), ao tempo decorrido após a incorporação da matéria orgânica, ao teor de água no solo (DAVIES, 1985; ZHANG e HARTGE, 1990) e à textura do solo.

Considerando, ainda, que o comportamento mecânico do solo é dependente do comportamento mecânico de seus agregados (HORN, 1990), é possível que parte dos resultados contraditórios existentes na literatura sejam produzidos por diferenças estruturais das amostras avaliadas.

6 Conclusões

O comportamento mecânico e a suscetibilidade ao processo erosivo está intimamente relacionada com a granulometria do material do talude.

As diferenças granulométricas, estruturais e a formação do solo que compõe o talude colaboram para uma variação no comportamento mecânico do talude com variações horizontais e verticais.

A erodibilidade deste talude marginal está nitidamente ligada à sua composição granulométrica sendo que as camadas inferiores estão mais susceptíveis à erosão quando comparadas às camadas superiores que compõem o talude justificando o processo de solapamento da base.

A atuação dos embates da corrente fluvial permanente em sua base promove diferentes valores de umidade no solo provocando níveis diferentes de densidades que modificam suas propriedades mecânicas desenvolvendo um comportamento dinâmico no solo.

A saturação e secagem através das elevações da cota do rio compromete a estabilidade do talude devido à diminuição da altura crítica vertical através da redução dos valores de coesão, ou seja, a quantidade de água no solo tem alto grau de influência nos parâmetros geotécnicos e pode melhorá-los ou não, pois existe um intercepto de coesão máximo para uma umidade ótima de coesão.

7 Referências Bibliográficas

- _____. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro. 2009. 33 p.
- _____. **NBR 6497**: Levantamento Geotécnico, Rio de Janeiro, 7p., 1983.
- _____. **NBR 6502**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.
- _____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. 8p.
- _____. **NBR 7180**: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.
- _____. **NBR 7181**: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1988. 13 p.
- _____. **NBR 8044**: Projeto Geotécnico. Rio de Janeiro, 1983. 58p.
- _____. **NBR 9603**: Sondagem a Trado. Rio de Janeiro, 1986. 6 p.
- AMARO FILHO, J. ASSIS JUNIOR, R. N. MOTA, J. C. A. **Física do solo conceitos e aplicações**. 1º. ed. Fortaleza, CE, 2008. 290 p.
- ASSIS, F. O. e MURATORI, A. M. Poluição hídrica por dejetos de suínos: um estudo de caso na área rural do município de Quilombo, Santa Catarina. **Revista Eletrônica Geografar**, Curitiba, v. 2, n. 1, p. 42 – 59, 2007. ISSN: 1981-089X. Disponível em:<www.ser.ufpr.br/geografar>. Acesso em: 15 de fev. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.
- BANDEIRA, A. A. **Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco e eficiência dos enrocamentos no controle da erosão no trecho em estudo**. 2005. 183 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2005.
- BAYER, C. e MIELNICZUK, J. Nitrogênio total de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 21, p. 235 - 239, 1997.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. São Paulo: F. Bastos, 1989. 898 p.
- BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob o plantio direto**. 2004. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2004.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SOARES, J. M. D. Coesão e atrito interno associados aos teores de matéria orgânica e de água de um solo franco arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 6, p. 1646 - 1653, 2007.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. da; CUBILLLA, M. M. A. **Alterações no teor de carbono orgânico, em função do sistema de cultivo, e suas implicações na compressibilidade do solo**. Projeto de Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS, [2002]. Disponível em: http://w3.ufsm.br/ppgcs/congressos/XIV_Reuni%e3o_Brasileira_Cuiab%e1/06.pdf. Acesso em: 17 março de 2010.

BRANDT, A. A. Propriedades mecânicas do solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais. 2005. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2005.

BRESSANI, L. A.; BICA, A. V. D.; SILVEIRA, R. M. Resultados de ensaios triaxiais em um solo conlucionar de arenito da escarpa da serra geral em Timbé do Sul-SC. In: 4a. Conferencia Brasileira de Estabilidade de Encostas – COBRAE - 2005, Salvador/BA. **Anais 4ª da Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas – COBRAE – 2005, Salvador/BA**, Rio de Janeiro, ABMS, 2005. V. 1, p. 183 – 192.

CAMPOS, B. C. de; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um latossolo vermelho-escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 19, p. 121 - 126, 1995.

CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A. AMARAL, N. M. B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. e CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. 508 p.

CAPUTO, H P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6ª Edição. Rio de Janeiro: LTC Editora S. A, 1988. V. 1, 234 p.

CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; ZEVIANI, W.M. Modelagem da curva de retenção de água de LATOSSOLOS utilizando a equação duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.77-86, 2011.

CARPENEDO, V. e MIELNICZUK, J.. Estado de agregação e qualidade de agregados de latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 14, p. 99 - 105, 1990.

CASADO, A.P.B.; HOLANDA, F.S.R.; ARAUJO FILHO, F.A.G.; YAGUIU, P. Evolução do processo erosivo na margem direita do Rio São Francisco (perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba – SE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.1, p.231-239, 2002.

CENTURION, J. F. e DEMATTÊ, J. L. I. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 9, p. 263 - 266, 1985.

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.

CODUTO, D. P. **Geotechnical engineering, principles and practices**. Upper Saddle River: Prentice Hall Publishing, 1999.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - CESP. **Ensaio de cisalhamento direto em solos** (Método de Ensaio MSL - 15), Série Normatização, 031. Ilha Solteira, 1986. 25 p.

CORONADO, J. A. e DINIZ, N. C. Proposta metodológica para avaliação de risco por escorregamento na região andina do Eixo Cafeteiro, Quindio, Colômbia. In: IV Conferência Brasileira sobre estabilidade de Encostas – COBRAE - 2005, Salvador/BA. **Anais da 4ª da Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas – COBRAE – 2005, Salvador/BA**, Rio de Janeiro, ABMS, v. 1, p. 51 - 59, 2005.

COUPER, P. Effects of silt-clay content on the susceptibility of river banks to subaerial erosion. **Geomorphology**, v.56, n.1-2, p.95-108, 2003.

DAVIES, P. Influence of organic matter content, moisture status and time after reworking on soil shear strength. **Journal Soil Science.**, v. 36, n. 2, p. 299 – 306, 1985.

EKWUE, E. I. Organic matter effects on soil strength properties. **Soil Tillage Res**, v. 16, n. 33, p. 289 - 297, 1990.
engineering, 1969. 553 p.

FILHO, F. C. da S.; FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. de S. S. de. Estudo numérico de escorregamentos causados por diminuição de sucção. In: III COBRAE – Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas, Rio de Janeiro, 2001. **Anais ...**, ABMS, Rio de Janeiro, p. 427 – 434, 2001.

FLICKINGER, H.G.; NEUSER, W. Teoria de autoorganização: as raízes da interpretação construtivista do conhecimento. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1994. 84p.

FONTES, L. C. S. **Erosão marginal associada a impactos ambientais a jusante de grandes barragens: O caso do baixo curso do rio São Francisco**. 2002. 321 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio ambiente). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2002.

GAGGERO, M. R. **Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo**. 1998. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Curso de Mestrado em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do

HOLANDA, F. S. R. ; ISMERIM, S. S. ; ROCHA, I. P. ; JESUS, A. S. ; Araújo Filho, R. N. ; MELO JUNIOR, A. V. . Environmental Perception of the São Francisco Riverine Population in Regards to Flood Impact. *Journal of Human Ecology* (New Delhi), v. 28, p. 37-46, 2009.

HOLANDA, F. S. R. Estudo integrado do vale do São Francisco sergipano: região de tabuleiros costeiros e pediplano sertanejo pedologia. Aracaju: CODEVASF, 2000. 138p.

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.; SANTOS, L.G.C.; SANTOS, C.M.; CASADO, A.P.B.; PEDROTTI, A.; RIBEIRO, G.T. Riparian vegetation affected by bank erosion in the Lower São Francisco River, Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.2, p.327-336, 2005.

HORN, R. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. **Soil Tillage Research**, v. 17, p 265 - 289, 1990.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. VAN. (Edi.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 662 p.

JANKAUSKAS, B.; JANKAUSKIENE, G.; FULLEN, M.A. Soil erosion and changes in the physical properties of Lithuanian Eutric Albeluvisols under different land use systems. **Acta Agriculturae Scandinavica Section B – Soil and Plant Science**, v.58, p.66-76, 2008.

JULIAN, J.P.; TORRES, R. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. **Geomorphology**, v.76, n.1-2, p.193-206, 2006.

LAMBE, T. W. e WHITMAN, R. V. **Soil mechanics, SI version**. Series in soil

LAMBE, T. W. **Soil testing for engineers**. New York: John Wiley, 1951.

LIMA, P.M.P.; ANDRADE, H. Erodibilidade entressulcos e atributos de solos com B textural e B latossólico do sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.463-474, 2001.

MENDES, F.G.; MELLONI, E.G.P.; MELLONI, R. Aplicação de Atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá/MG. **Cerne**, Lavras, v.12, n.3, p.211-220, 2006.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Caracterização de argilas plásticas do tipo "ball clay" do litoral paraibano. **Cerâmica**, v. 49, n. 311, p. 120-127, 2003.

MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômenos de superfície. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2000. 174 p.

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 and Soil**, v.324, n.1-2, p.43-56, 2009.

MILLÁN ROMERO, E. **Condutividade hidráulica, porosidade e resistência à penetração em Latossolos artificialmente compactados**. 2007. 55 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Núcleo de pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, MG, 2007.

NORMANIZA, O.; BARAKBAH, S.S. Parameters to predict slope stability – Soil water and root profiles. **Ecological Engineering**, v.28, n.1, p.90-95, 2006.

OHU, O. J.; RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E. Peatmoss effect on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, v. 28, p. 420 - 424, 1985.

OHU, O. J.; RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E.; MEHUYS, G. Shear strength prediction of soils with varying added organic matter contents. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, v. 29, p. 351 - 355, 1986.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos Estados críticos**. 2^aed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

OSTERKAMP, W.R.; HUPP, C.R. Fluvial Processes and vegetation – Glimpses of the past, the present, and perhaps the future. **Geomorphology**, v.116, n.2-3, p.274-285, 2010.

PALADINI, F. L. S. e MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um podzólico vermelho-escuro afetado por sistema de culturas. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 15, p. 135 - 140, 1991.

PARKER, C.; SIMON, A.; THORNE, C.R. The effects of variability in bank material on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. **Geomorphology**, v.101, n.4, p.533-543, 2008.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805 - 1816, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v32n5/02.pdf>. Acesso em: 03 mar de 2010.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de F.; SAMPAIO, F. de M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras, MG. **Ciência Agrotecnologia**, v. 31, n. 4, p. 1167 – 1175, 2007.

ROCHA, P.C.; SOUZA FILHO, E.E. Erosão Marginal e evolução hidrodinâmica no sistema rio-planície fluvial do Alto Paraná-Centro Sul do Brasil. In: NUNES, J.O.R.; ROCHA, P.O. **Geomorfologia: aplicação e metodologias**. 1ª ed. Expressão Popular, São Paulo, 2008, p.133-154.

ROCHA, W.W.; DIAS JUNIOR, M.S.; LIMA, J.M.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, A.R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.297-303, 2002.

ROSA, D. P. da. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade de Santa Maria, RS, 2007.

ROSA, D. P. da. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade de Santa Maria, RS, 2007.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de Descrição e Coleta de solo no Campo**. 5ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

SERGIPE. **Atlas digital sobre recursos hídricos**. Aracaju: Geoambiente, CD-ROM. 2004

SILVA, A. J. N.; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionado a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, 2007, p.853-862.

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si e Al em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n.3, p.447-457, 2005.

SILVA, L.C.da; Manejo de rios degradados: uma revisão conceitual. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.3, n.3, p.23-32, 2010.

SILVA, R. B.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SANTOS, F. L.; FRANZ, C. A. B. Resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 28, p. 165 – 173, 2004.

SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SANTOS, F.L.; FRANZ, C.A.B. Resistência ao Cisalhamento de um Latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.1, p.165-173, 2004.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; RERICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 239 - 249, 2000.

SILVEIRA, R. M. **Comportamento geotécnico de um solo coluvionar de São Vendelino (RS)**. 2008. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil Tillage Res.**, v. 16, p. 179 - 201, 1990.

SOTIR, R. B. e GRAY, D. H: Fill slope repair using soil bioengineering systems. In: International Erosion Control Association. **Methods and techniques for stabilizing steep slopes**. Stremboat Springs, CO, International Erosion Control Association, p. 413 - 425, 1997.

SOUZA PINTO, C de. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 355 p.

SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L.; VIEIRA, L.B. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.460-464, 2000.

TAVARES-FILHO, J.; FONSECA, I.C.B.; RIBON, A.A.; BARBOSA, G.M.C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p.996-999, 2006.

THORNE, C. R. Field measurements of rates of bank erosion and bank material strength. In: Erosion and Sediment Transport Measurement Symposium, 1981, Florence. **Anais...** Florence: International Association of Hydrological Sciences, 1981. p. 503-512.

TRINDADE, T. P.; IASBIK, I.; LIMA, D. C. de; MINETTE, E.; SILVA, C. H. de C.; CARVALHO, C. A. B. de; BUENO, B. de S.; MCHADO, C. C. Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno visando à aplicação em estradas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 215 - 222, 2006.

TSCHEBOTARIOFF, G. P. **Fundações, estruturas de arrimo e obras de terra**: a arte de projetar e construir e suas bases científicas na mecânica dos solos. São Paulo, Ed. Freitas de Quadros, McGraw-Hill, 1978. 524 p.

VARGAS, M. **Introdução a mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1989.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. Segunda parte: hidráulica dos solos. McGraw Hill: 1977. 509 p.

VIEIRA, V.A.S.; MELLO, C.R.; LIMA, J.M. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma microbacia hidrográfica. **Ciência e agrotecnologia.**, Lavras, v.31, n.5, p.1477-1485, 2007.

WEEB, N.P.; STRONG, C.L. Soil erodibility dynamics and its representation for Wind erosion and dust emission models. **Aeolian Research**, v. 3, 2011, 81-242.

XIA, J.Q.; WU, B.S.; WANG, Y.P.; ZHAO, S.G. An analysis of soil composition and mechanical properties of riverbanks in a braided reach of the Lower Yellow River. **Chinese Science Bulletin**, v.53, n.15, 2008, p.2400-2409.

XU, J. River sedimentation and channel adjustment of the lower Yellow River as influenced by low discharges and seasonal channel dry-ups. **Geomorphology**, v.43, n.1-2, 2002, p.151-164.

YAO, S.; QIN, J.; PENG, X.; ZHANG, B. The effects of vegetation on restoration of physical stability of a severely degraded soil China. **Ecological Engineering**, v.35, n5, p.723-734, 2009.

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. **Soil Tillage Research**, v. 31, p. 263 - 275, 1994.

ZHANG, H. Q. e HARTGE, K. H. Cohesion in unsaturated sandy soils and the influence of organic matter. **Soil Technology**, v. 3, p. 311 - 326, 1990.

ZHANG, H; HARTGE, K. H; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society of American Journal**, v. 61, p. 239 - 245, 1997.

CAPÍTULO 2: Eficiência do superfosfato simples no desenvolvimento de mudas de capim vetiver submetidas à técnica de bioengenharia de solos no baixo São Francisco Sergipano

1 Resumo

O conhecimento dos mecanismos para suprimento de nutrientes a partir do solo e absorção da planta é uma importante ferramenta utilizada na formulação de práticas de adubação para sua máxima produção. As gramíneas, como o capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) têm sido utilizadas em práticas de controle de erosão, estabilização de taludes, remediação de áreas salinas dentre outros usos no controle de erosão. O objetivo neste trabalho foi avaliar o desenvolvimento do capim vetiver submetido a diferentes doses de fósforo em taludes da margem do rio São Francisco. A área experimental encontra-se na margem direita do baixo São Francisco, no município de Amparo do São Francisco, estado de Sergipe, onde foi realizada a implantação dos elementos de bioengenharia de solos, caracterizada pela associação dos seguintes elementos: o enrocamento vegetado com estacas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth), mudas de capim vetiver e retentores de sedimentos. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com cinco repetições. Foram avaliados cinco doses 0, 4, 8, 12 e 16 g. cova⁻¹ de superfosfato simples. O crescimento das mudas de vetiver foi observado nos períodos de 30, 60 e 90 dias, realizando-se avaliações quanto ao número de raízes, superfície externa de raízes, densidade de raízes, comprimento de raízes, massa fresca de raiz, massa seca de raiz, massa fresca da parte aérea, e massa seca da parte aérea dentro de cada período de avaliação. As doses de fósforo e os períodos de desenvolvimento morfológico interagiram nos parâmetros massa seca parte aérea, massa seca raiz, massa fresca aérea, massa fresca raiz, densidade de raiz, densidade de comprimento da raiz, numero de raiz, superfície externa, comprimento da parte aérea, comprimento de raiz, exceto a relação parte aérea e raiz. As doses de fósforo foram mais efetivas no período de desenvolvimento, pois promoveram ajustes na morfologia da planta.

Palavras chave: erosão marginal, *Chrysopogon zizanioides*, fósforo, sistema radicular.

CHAPTER 2: Efficiency of simple super phosphate in the development of vetiver grass seedlings subjected to soil bioengineering technique in the lower São Francisco in Sergipe state northeast Brazil

2 Abstract

Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) has been used as erosion control technique, slope stabilization, remediation of saline soils and among other uses in erosion control practices. The objective of this study was to evaluate the development of vetiver grass under different doses of phosphorus in São Francisco riverbanks. The experimental area is on the right bank of the Lower São Francisco, in the municipality of Amparo São Francisco, state of Sergipe, where it was held the use of elements of soil bioengineering, characterized by the combination of vegetated riprap with stakes, seedlings of vetiver grass and sediment retainers. The experimental design was randomized complete block design with five replicates. We evaluated five levels of phosphorus in the form of superphosphate with 0, 4, 8, 12 and 16 g. cova⁻¹, respectively. The growth of vetiver seedlings were observed in periods of 30, 60 and 90 days, carrying out assessments of the number of roots, the outer surface of roots, root density, root length, root fresh weight, root dry mass, shoot fresh weight and dry weight of aerial part at each evaluation period. The phosphorus was efficient in increasing the production of shoot dry weight, root dry weight, fresh air, fresh root, root density, root length density, number of roots, outer surface, shoot length, root length. Phosphorus levels greater than 12 g.cova⁻¹ showed no significant advantage in plant development.

Keywords: bank erosion, *Chrysopogon zizanioides*, phosphorus, root system.

3 Introdução

O baixo curso do rio São Francisco teve seu comportamento hidrossedimentológico alterado pelas modificações no canal fluvial através do represamento das águas para implantação de reservatórios de grandes projetos hidrelétricos. Isto resultou na regularização da vazão e descargas de sedimentos, controle de enchentes, retenção de sedimentos, degradação da vegetação ciliar, erosão marginal, recuo da margem e perda de área agricultável (HOLANDA *et al.*, 2008).

Com isso, para o controle do processo erosivo é necessário utilizar técnicas com soluções simples, porém com atuação ampla na bacia hidrográfica, para promover melhorias estéticas, ecológicas e de produção na área (SUTILI *et al.*, 2004; MONTEIRO *et al.*, 2010). Entre várias técnicas utilizadas para controle dos processos erosivos em margens de cursos d'água, a bioengenharia de solos se apresenta como uma alternativa que possibilita a recuperação da vegetação ciliar além de apresentar baixo custo quando comparada às obras da engenharia civil sendo largamente utilizada na estabilização de taludes instáveis (HOLANDA *et al.*, 2010).

Essa biotécnica consiste no uso de elementos biologicamente ativos representado pela vegetação, em obras de estabilização de solo e de sedimento, conjugados ou não com elementos inertes representado por materiais rochosos ou geotêxteis com o objetivo de conter os processos erosivos em taludes de estradas ou de cursos d'água (DURLO e SUTILI, 2005; PHILLIPS e MARDEN, 2006).

A vegetação desempenha um importante papel no controle da erosão em taludes marginais, uma vez que a cobertura do solo com gramíneas ou vegetação herbácea oferece uma das mais eficientes proteções contra a erosão superficial por meio da diminuição do impacto das chuvas sob o solo desnudo (HENGCHAOVANICH, 1999; DAVIDE *et al.*, 2000; CHENG *et al.*, 2003). Além do aumento da percolação da água, da resistência e coesão do solo nas margens proporcionados pelo sistema radicular (BURYLO *et al.*, 2009; STOKES *et al.*, 2009).

As gramíneas como o capim vetiver têm sido utilizadas em práticas de controle de erosão, estabilização de taludes, remediação de áreas salinas dentre outros usos (MICKOVSKI e VAN BEEK, 2009). O capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.)

Roberty) syn. *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash (Poaceae) é uma gramínea perene, que está presente nos mais variados climas, sobretudo tropical e subtropical, sendo muito utilizada na recuperação de áreas degradadas, com destaque no controle de erosão, devido à presença de pequenos rizomas e ao fino e emaranhado sistema radicular que pode atingir grandes profundidades possibilitando à planta boa resistência à seca e forte poder de resistência às enxurradas, permitindo que as mesmas continuem aderidas ao solo (TRUONG, 2002; TRUONG e LOCH, 2004; MICKOVSKI; VAN BEEK; SALIN 2005). Resultados obtidos em plantios em contorno com a utilização do capim vetiver mostram que houve redução em 50% e 70% do escoamento superficial e do solo erodido, respectivamente, quando comparado com a agricultura convencional (PHIEN e TAM, 2007).

Entre as características do sistema radicular que podem interferir na estabilidade de solos e conseqüentemente na erosão do mesmo, têm-se o número de raízes (N), superfície externa de raízes (S), densidade de raízes (RD) e densidade do comprimento de raízes (RLD), assim diferentes recipientes podem alterar características morfológicas não só do sistema radicular, como da parte aérea das mudas produzidas (REUBENS *et al.*, 2007).

O conhecimento dos mecanismos para suprimento de nutrientes a partir do solo e absorção da planta é uma importante ferramenta utilizada na formulação de práticas de adubação para sua máxima produção. O fósforo é um dos macronutrientes da solução do solo que aumenta a eficiência na produção do sistema radicular, e estando raízes em contato com esse nutriente tem seu crescimento estimulado (HOLANDA *et al.*, 1999).

A deficiência do fósforo faz com que diminua o transporte de fotoassimilados para as gramíneas resultando em baixa produção, conseqüentemente redução de área foliar, taxa fotossintética que diretamente afeta na fixação do gás carbônico da atmosfera. De acordo com Vance; Uhde-Stone; Allan, (2003) as plantas com deficiência de fósforo desenvolveram mecanismo que ajudam no suprimento absorção do mesmo, dentre os processos temos o crescimento radicular e a expansão da superfície radicular. Os mecanismos que aumenta o rendimento no uso desse macronutriente são redução na taxa de crescimento, remobilização do fósforo e no metabolismo do carbono.

O objetivo neste trabalho foi avaliar o desenvolvimento do capim vetiver submetido a diferentes doses de fósforo em taludes da margem do rio São Francisco.

4 Material e Métodos

4.1 Área experimental

O ensaio experimental foi realizado na margem direita do baixo curso do rio São Francisco, localizada no município de Amparo de São Francisco - SE (coordenadas UTM N= 8.868.789,506 / E= 736.583,864). O talude apresentou declividade média de 89,7 %, altura de 6m, com dimensões de 100 m de comprimento por 15 m de largura, perfazendo uma área total de 1500 m² (Figura 1).

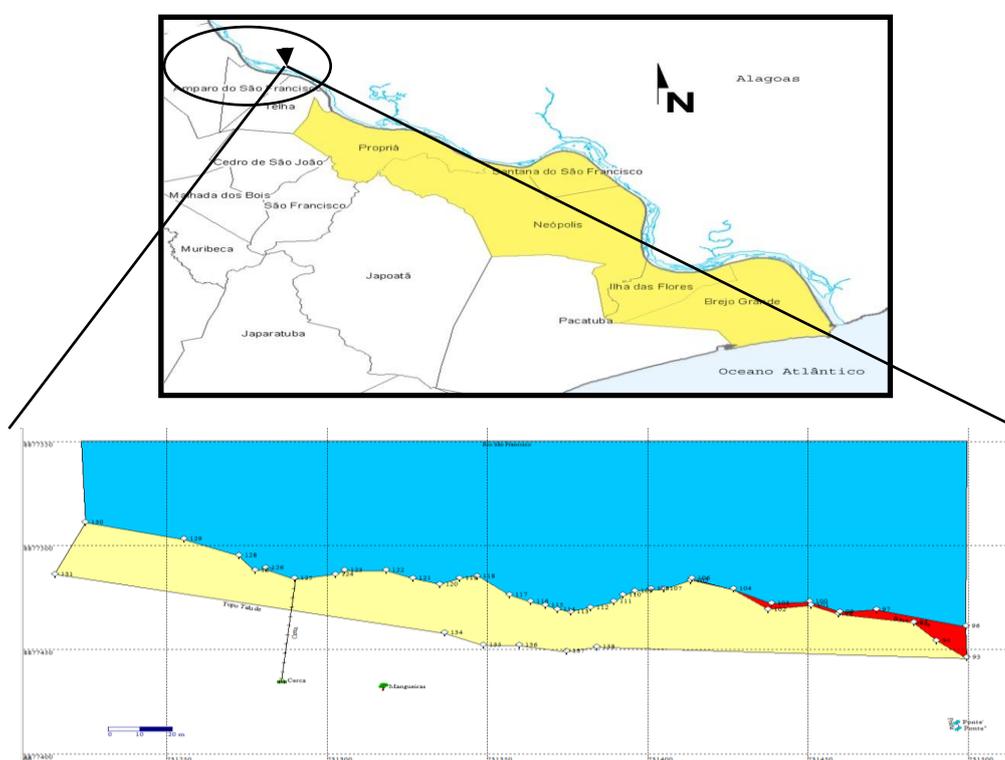


FIGURA 1. Localização da área experimental no município de Amparo de São Francisco - SE (ADAPTADO DE SERGIPE, 2004).

O solo do sítio experimental é classificado como Neossolo Flúvico (HOLANDA, 2000). O clima do trecho sedimentar do Baixo São Francisco, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Am (clima megatérmico úmido e subúmido) com temperatura

média anual de 25 °C, sendo dezembro o mês mais quente, com temperaturas entre 26 e 27 °C, e junho o mês mais frio, com temperaturas em torno dos 23 °C. A precipitação média anual é de 744,0 mm ano⁻¹, com variações na distribuição das chuvas ao longo do ano, onde o período chuvoso se encontra entre os meses de março e agosto e o período seco entre os meses de dezembro e fevereiro (CODEVASF, 2010).

A área experimental foi previamente identificada para implantação da técnica de bioengenharia de solos para controle de erosão em taludes marginais e os critérios escolhidos levaram em conta o nível de degradação do processo erosivo, características físicas do solo (textura e estrutura), dados topográficos do talude (altura, declividade e comprimento de rampa), ausência de cobertura vegetal, distância do talvegue (canal principal do rio), área disponível para ensaio e acesso ao local da área experimental (Figura 2).

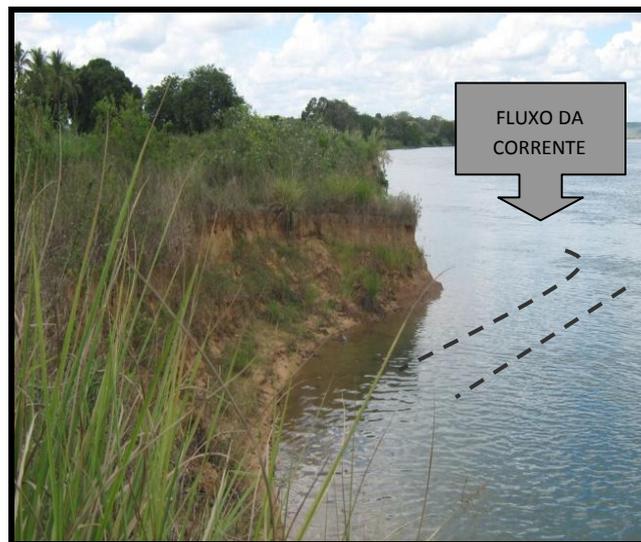


FIGURA 2. Processo erosivo em margem de curso d' água, talude verticalizado, recuo da margem e vegetação ciliar incipiente.

4.2 Dados climatológicos do período monitorado

Os dados meteorológicos referente aos meses monitorados no ano de 2011 no município de Amparo de São Francisco – SE encontram-se na Tabela 1.

TABELA 1. Dados meteorológicos mensal do município de Amparo de São Francisco - SE (INMET,2011)

Mês	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Precipitação (mm)	Umidade Relativa (%)
Maio	29,3	22,4	260,3	84,7
Junho	29,1	20,9	80,9	84
Julho	27,8	20,1	158,6	79,9
Agosto	29,1	19,5	70,9	79,0
Setembro	28,8	19,8	32,9	79,0
Outubro	31,4	21,6	79,4	76,0
Novembro	32	21,9	260,3	64,7

4.3 Análise física e química do solo

As amostras de solos foram coletadas aleatoriamente na área de estudo, nas profundidades de 0 – 20 ; 20 – 40; 40 – 60 cm, sendo posteriormente realizada a caracterização química e física desse solo (Tabela 2). As análises químicas de solo foram realizadas no Instituto de Pesquisa de Sergipe (ITPS) e física no laboratório de geotecnia e pavimentação da Universidade Federal de Sergipe (GEOPAV).

TABELA 2. Atributos químicos e físicos do solo amostrado a profundidade de 0 a 60 cm, na área experimental antes da implantação dos ensaios.

Características	Profundidade 0 – 20 cm	Profundidade 20 – 40 cm	Profundidade 40 – 60 cm
pH (H ₂ O) (RBLE)	5,7	6,2	6,1
MO (g dm ⁻³) ¹	9,46	8,88	3,37
Ca (cmol _c dm ⁻³) ²	7,29	7,15	2,88
Mg (cmol _c dm ⁻³) ²	1,91	4,25	2,53
Al (cmol _c dm ⁻³) ²	0,45	0,12	< 0,08
Na (cmol _c dm ⁻³) ³	0,15	0,26	0,09
K (cmol _c dm ⁻³) ³	0,06	0,07	0,05
H + Al (cmol _c dm ⁻³) ⁴	2,44	2,03	1,24
P (mg dm ⁻³)	2,5	4,3	2,4
pH em SMP ⁴	6,4	6,6	7,0
SB (cmol _c dm ⁻³)	9,41	11,70	5,56
CTC (cmol _c dm ⁻³)	11,90	13,70	6,80
PST (%)	1,2	1,9	1,4
V (%)	79	85	81
Fe (mg dm ⁻³) ⁶	374	397	301
Cu (mg dm ⁻³) ⁶	4,5	2,4	4,4
Mn (mg dm ⁻³) ⁶	60,0	64,8	22,1
Zn (mg dm ⁻³) ⁶	4,1	6,7	3,5
Areia Grossa (g kg ⁻¹)	4,5	0,7	145,6
Areia Fina (g kg ⁻¹)	6,09	4,26	65,82
Silte (g kg ⁻¹)	479,7	506,5	103,9
Argila (g kg ⁻¹)	454,9	450,2	92,3

¹ Método de Walkley Black (colorimétrico); ² KCl; ³ Mehlich – 1; ⁴ SMP; ⁵ MAQS – EMBRAPA; ⁶ Mehlich – 1 (AA)

4.4 Produção de Mudanças de Vetiver

As mudas de capim vetiver foram produzidas no viveiro florestal do Campus da Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão - SE, no período de fevereiro a abril de 2011. A produção de mudas foi realizada a partir de perfilhos extraídos de touceiras matrizes sendo cada tamanho de perfilho padronizado com aproximadamente 20 cm de altura da parte aérea e corte em bisel, as raízes destas foram cortadas e logo depois, as mudas foram plantadas em tubetes de polietileno com capacidade volumétrica de 280 cm³, com forma cônica e furo na parte inferior para drenagem do excesso de água.

O substrato utilizado nos tubetes foi composto de terra preta, pó de coco lavado, calcário dolomítico, na proporção de 30: 60: 0,06 kg, e 73 g de fertilizante NPK (3-12-6) por m³ de substrato. As mudas plantadas foram irrigadas, para manter a umidade aproximadamente em 60% do volume total de poros (Figura 3).



Figura 3. Sequência da técnica de propagação vegetativa: a) Touceira matriz, b) Perfilho padronizado: corte transversal da raiz e em bisel parte aérea, c) Implantação dos perfilhos no substrato, d) mudas de vetiver.

4.5 Implantação da técnica de bioengenharia de solos

A implantação dos elementos de bioengenharia de solos no sítio experimental para o controle do processo erosivo do talude marginal ocorreu no mês de julho de

2011, iniciada com cercamento da área, depois reafeiçoamento do talude com a inclinação exigida 1V:2H com uso de maquinário (retroescavadeira hidráulica).

Na base do talude foi utilizada a técnica do enrocamento vegetado (vegetated riprap), camadas de rochas protegendo a base do talude e entre os espaços das rochas ocorreu o plantio de estacas vivas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth). Nos terços médio e superior do talude foram plantadas as mudas de capim vetiver e no topo do talude foram abertas pequenas valas onde foram colocados os retentores de sedimento Bermalonga® D- 10, compostos por fibras vegetais desidratadas e prensados, envolvidos por malha de polipropileno fotodegradável (DEFLOR, 2011).

Inicialmente foi realizada a padronização dos perfilhos do capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) para a posterior realização do plantio no talude fluvial, precedida da instalação dos elementos inertes de bioengenharia de solos. O plantio foi realizado em covas com dimensões de 0,3 x 0,3 x 0,3 m, em espaçamento de 0,3 x 0,9 metros para proteção e estabilização do solo com diferentes doses de superfosfato simples (P₂O₅) com formulação (0-18-0) baseada em Sobral *et al.*(2007) (Figura 4).



FIGURA 4. Ilustração das etapas de implantação da técnica de bioengenharia de solos : (A) Limpeza e retaludamento da área; (B) Enrocamento vegetado com estacas de sabiá; (C) Implantação de bermalongas; (D) Plantio Vetiver.

4.6 Delineamento Experimental

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso (DBC), com as seguintes doses de superfosfato simples: T_0 - Testemunha, T_1 - 4 g de superfosfato simples por cova, T_2 - 8 g superfosfato simples por cova, T_3 - 12 g superfosfato simples por cova e por ultimo T_4 - 16 g superfosfato simples por cova. As parcelas experimentais apresentaram bordadura de 40 cm, sendo cada tratamento replicado cinco vezes (Figura 5). Cada parcela experimental foi composta de 100 plantas, a duração do experimento foi de 03 (três) meses onde foram realizadas avaliações das mudas aos 30, 60 e 90 dias após o plantio. As mudas foram selecionadas e avaliadas de forma

destrutiva, 05 (cinco) indivíduos de cada parcela experimental coletada aleatoriamente, totalizando 125 plantas para cada avaliação.

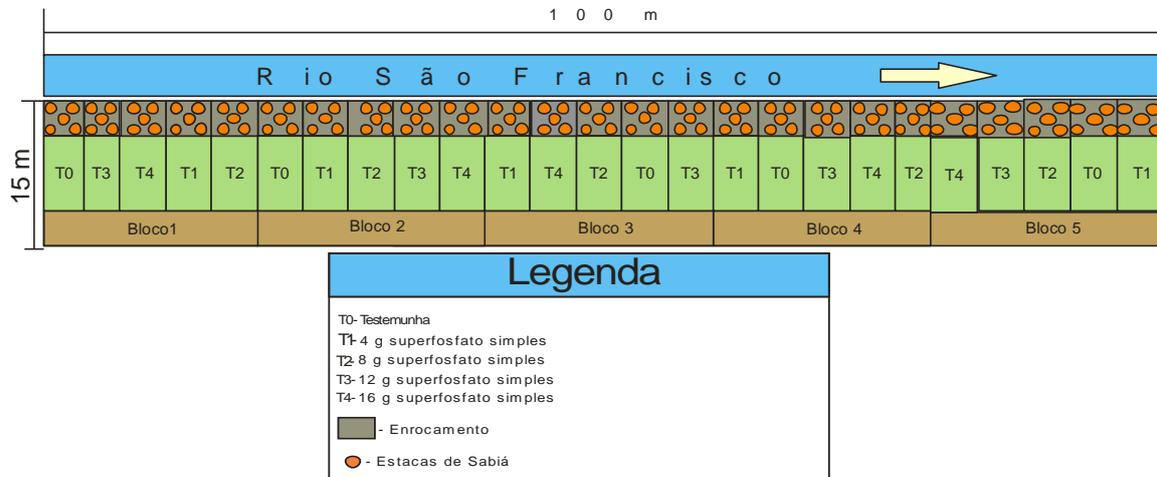


Figura 5. Croqui da área experimental.

4.7 Avaliação do ensaio experimental

Para coleta do vetiver foram utilizados tubos de PVC com forma cilíndrica e volume 15708 cm^3 , possuindo dimensões de 50 cm de altura e 20 cm de diâmetro com espessura de 2 mm. Esses cilindros foram cravados no solo, sendo retiradas amostras indeformadas juntamente com as raízes e parte aérea, para todas as cinco réplicas, em cada tratamento.

Na determinação do comprimento das raízes utilizou-se uma régua graduada em centímetros, tomando como referência a distância do colo ao ápice da raiz. Os valores de superfície externa (S) foram determinados por meio do produto das médias dos diâmetros (superior, médio e inferior) pelo comprimento das mesmas. A massa fresca da raiz e da parte aérea (MFR e MFPA) pesando-se separadamente a parte aérea e o sistema radicular em uma balança analítica de precisão de 0,01 g, para sistema radicular foi realizada a lavagem em água corrente sobre peneira de 0,5 mm para separar solo da raiz. Em seguida, o material foi acondicionado em sacos de papel e levado à estufa com circulação forçada, a temperatura constante de $60 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 72 horas até atingir a

massa constante, para a obtenção dos valores de massa seca da raiz e parte da aérea (MSR e MSPA).

Foram avaliados os seguintes variáveis: a) número de raízes (N), superfície externa de raízes (S) é a área de contato da raiz com o solo, densidade de raízes (RD) expressa em massa seca de raízes vivas por volume de solo, densidade do comprimento de raízes (RLD), relação comprimento total das raízes por volume de solo, massa fresca de raiz (MFR), massa seca de raiz (MSR), massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA).

4.8 Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e em função do nível de significância no teste F para as doses de superfosfato simples, procedeu-se o estudo de regressão polinomial ou teste de médias (Tukey a 5 %), utilizando o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2003).

5 Resultados e Discussão

Na análise de variância, em que se detectaram efeitos significativos das interações dose de superfosfato simples dentro de cada período, relativo às variáveis analisadas com respectivas médias e valores de coeficiente de variação, são apresentados na Tabela 3. As doses de superfosfato simples dentro do período de monitoramento não tiveram significância ($p \geq 0,05$) nas variáveis analisadas densidade de raiz, massa fresca raiz, massa seca raiz, massa seca parte aérea e comprimento da parte aérea. Foram avaliados todas as variáveis e dentre estas se destacaram: comprimento total de raiz, densidade de comprimento de raiz e comprimento da parte aérea com coeficiente de variação baixo.

Os demais não obtiveram o mesmo êxito considerado então o coeficiente de variação como alto.

TABELA 3. Análise de variância dos parâmetros morfológicos do capim vetiver em função das doses de fósforo dentro dos períodos de avaliação.

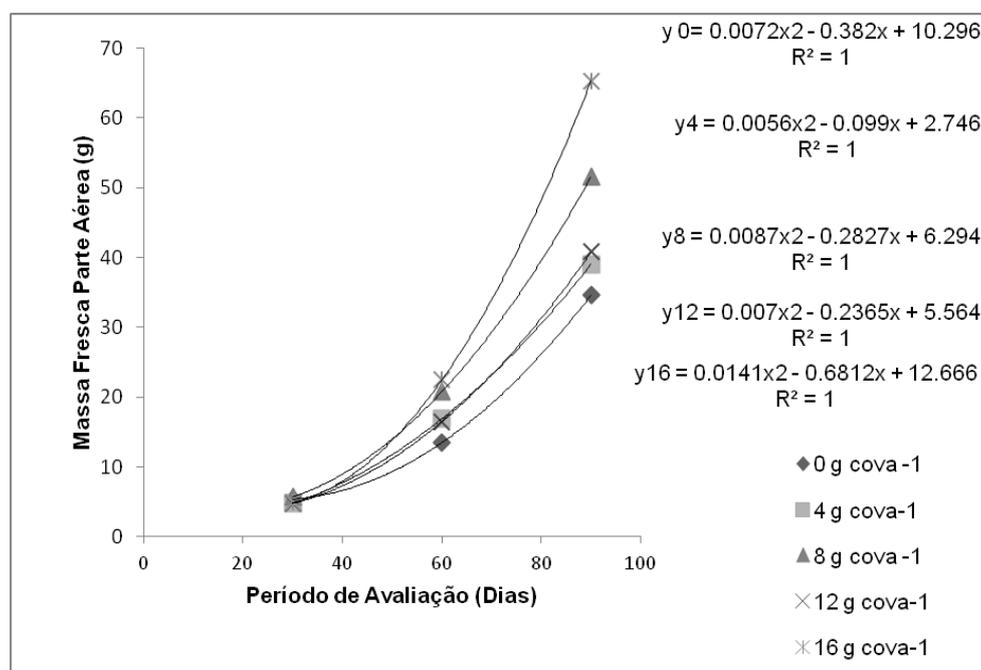
Análise de Variância										
Quadrado Médio										
Fonte de Variação	Número de Raízes	Superfície Externa (mm ²)	Comprimento Total de Raízes (cm)	Densidade de Raíz (g.cm ⁻³)	Densidade de Comprimento de Raíz (mm. cm ⁻³)	Massa Fresca Raíz (g)	Massa Seca Raíz (g)	Massa Fresca Parte Aérea (g)	Massa Seca Parte Aérea (g)	Comprimento Parte Aérea (cm)
Dose	158,98*	2544.38*	463.42 ^{NS}	174506.58 ^N _S	2095875.39 ^{NS}	120.83 ^{NS}	22.21 ^{NS}	416.16*	45.56*	183.24 ^{NS}
Bloco	120.87 ^{NS}	833.88*	1159.10*	160118.64 ^N _S	4141720.05*	109.65 ^{NS}	5.69 ^{NS}	71.44 ^{NS}	18.44 ^{NS}	80.27 ^{NS}
Erro 1	52.78	258.88	171.81	75457.83	1150450.96	55.79	8.89	43.01	8.17	130.56
Período	1743.88*	44805.87*	47814.33*	5173707.27*	178107976.39*	8704.23*	990.22*	11078.70*	1324.17*	15658.49*
Período * Dose	252.68*	1732.94*	542.96 ^{NS}	92220.89 ^{NS}	3206071.61*	39.83 ^{NS}	16.56 ^{NS}	205.10*	20.88 ^{NS}	129.97 ^{NS}
Erro 2	42.63	358.64	258.55	134560.82	1318254.09	120.27	13.30	75.12	12.60	66.32
CV 1 (%)	32.83	19.90	14.35	62.09	18.52	41.04	47.09	28.37	35.58	17.48
CV 2(%)	29.51	23.42	17.60	82.91	19.82	60.26	57.59	37.49	44.20	12.46

^{NS} – Não Significativo

* Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste T.

5.2 Massa Fresca da Parte Aérea (MFPA) e das Raízes (MSRZ)

Os resultados demonstraram que a massa fresca, tanto da parte aérea como das raízes do capim vetiver, variou significativamente ($P < 0,05$) com as doses de superfosfato simples no solo. Como demonstrado na Figura 6, as equações de regressão da produção de massa fresca com as doses de superfosfato simples apresentaram ajustes ao modelo linear e quadrático. Derivando as equações de regressão verificou-se que as máximas produções de massa fresca parte aérea nas doses incorporada foram obtidas aos 27, 32, 17 e 24 dias respectivamente para as doses 0, 8, 12 e 16 g cova⁻¹ utilizadas. A dose 4 g cova⁻¹ apresentou o comportamento linear crescente a partir dos 30 dias do período de avaliação. Para a massa fresca raiz seguiu-se também o modelo quadrático onde foi obtido melhor período de desenvolvimento aos 33 dias.



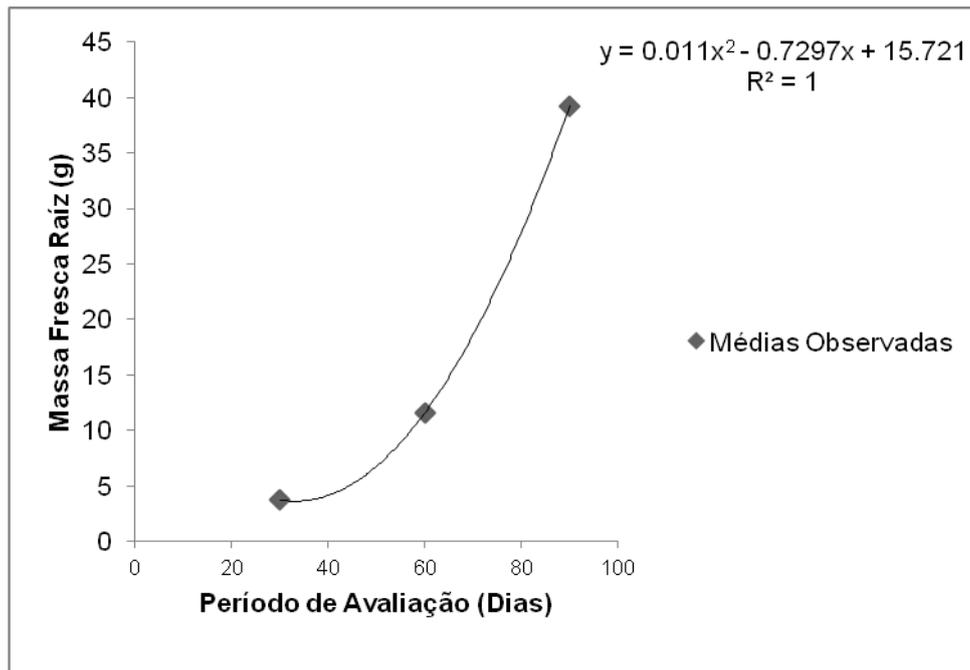


FIGURA 6. Produção de matéria fresca da parte aérea (A) e das raízes (B) do capim vetiver período em função das doses de superfosfato simples.

Apesar dos coeficientes apresentarem baixa correlação para o período de 30 e alta correlação para os período 60 e 90 dias, na análise de variação foi verificado comportamento da equação de regressão de modelo cúbico no período em função das doses. Verificou-se que a produção de matéria seca parte aérea teve uma tendência a aumentar no período 60 e 90 dias e manteve-se constante no período de 30 dias (Figura 7). De acordo com Gomes et al. (2003) esse comportamento parece ocorrer em torno de 90 dias, quando os dados de superfície externa chegam ao seu máximo, apresentando menores valores no período de 30 e 60 dias. Esse resultado também pode ser explicado pela melhor formação do sistema radicular das mudas devido a doses incorporadas ao solo, apresentando maior formação de raízes.

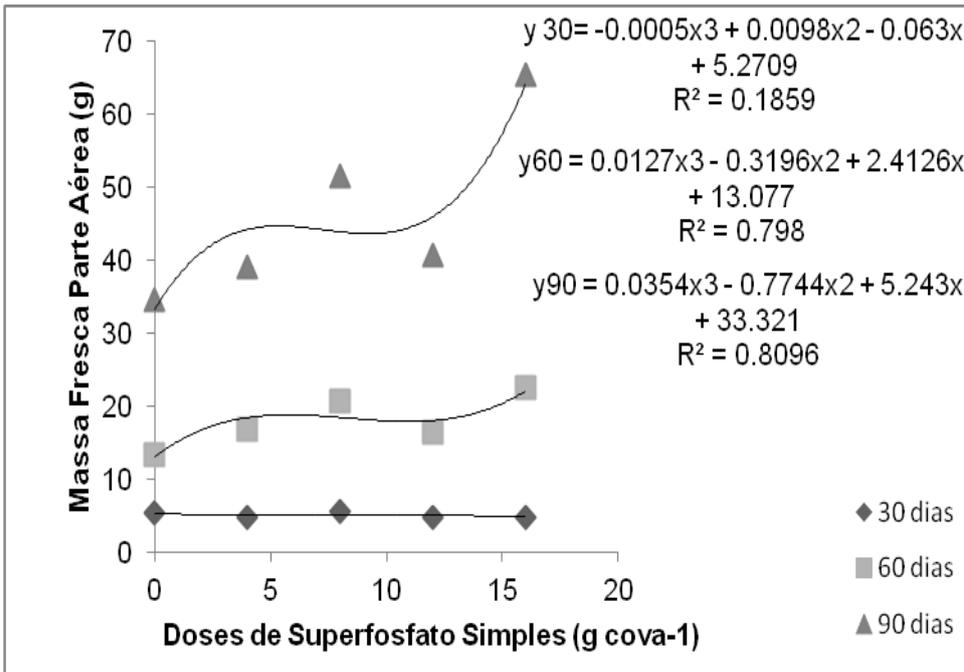
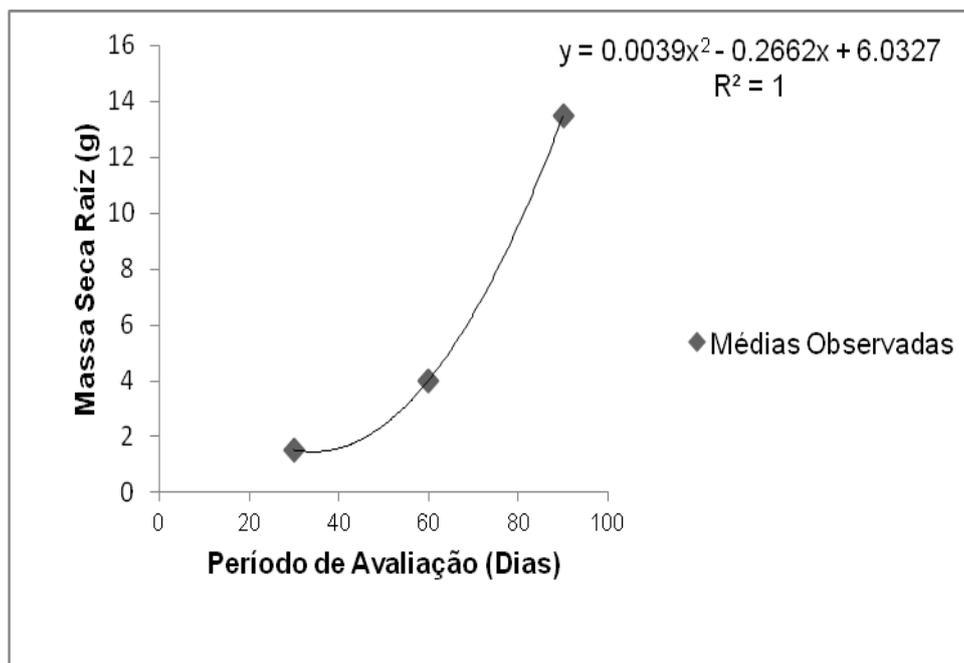


FIGURA7. Produção de matéria fresca da parte aérea do capim doses de superfosfato simples em função do período.

5.3 Produção Matéria Seca Raíz e Parte Aérea (MSR e MSPA)

Avaliando a produção de massa seca de raiz e parte aérea verificou-se nos resultados que a máxima produção ocorreu nos 34 e 28 dias para raiz e parte aérea no período de avaliação, seguindo o modelo de regressão quadrático como mostra a Figura 8.



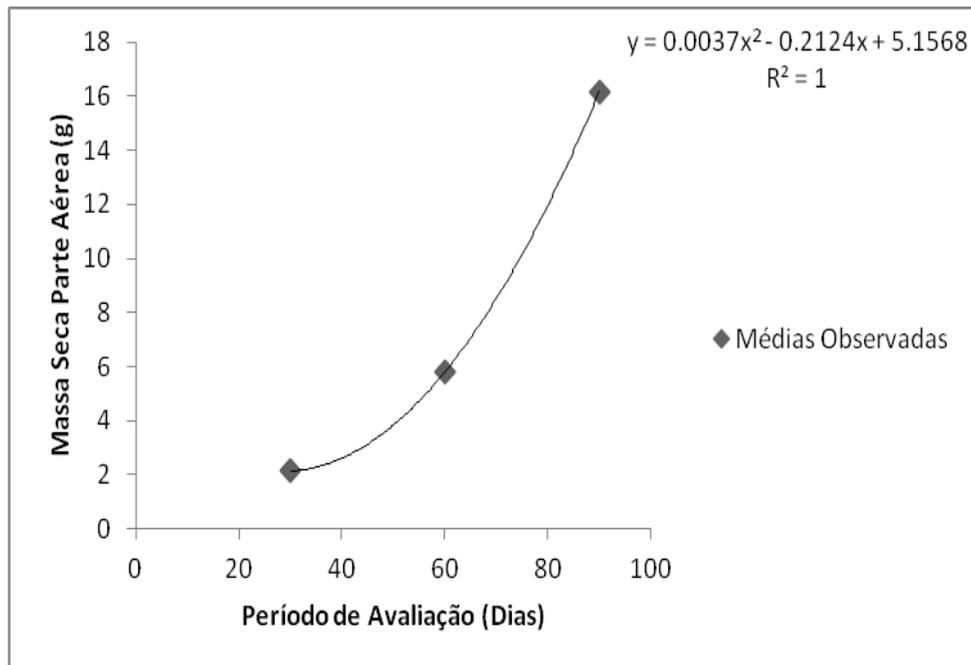


FIGURA 8. Produção de matéria seca da parte aérea (A) e das raízes (B) do capim período em função das doses.

O aumento da massa seca parte aérea do vetiver adubado com superfosfato simples está relacionada com as doses disponibilizadas e o efeito do pH do solo e aumento da saturação de bases. Segundo Franco (2004) a produção de matéria seca está relacionado com efeitos das doses de fosfato, melhorando o desenvolvimento da planta tanto da parte aérea como do sistema radicular.

De acordo com os resultados observados em massa seca parte aérea, a produção foi influenciada pela adubação de superfosfato, no qual o modelo da equação adotado foi o cúbico. Apartir dos 4 g cova⁻¹ foi verificado um aumento em matéria seca parte aérea, na dose 16 g cova⁻¹ esse aumento foi crescente (Figura 9). Segundo Ferreira *et al.* (2008) trabalhando com (*Panicum maximum* cv.) isto acontece devido ao rápido desenvolvimento do vegetal no período em estudo, com o aumento da produção em matéria seca da parte aérea em função das doses crescentes de fósforo.

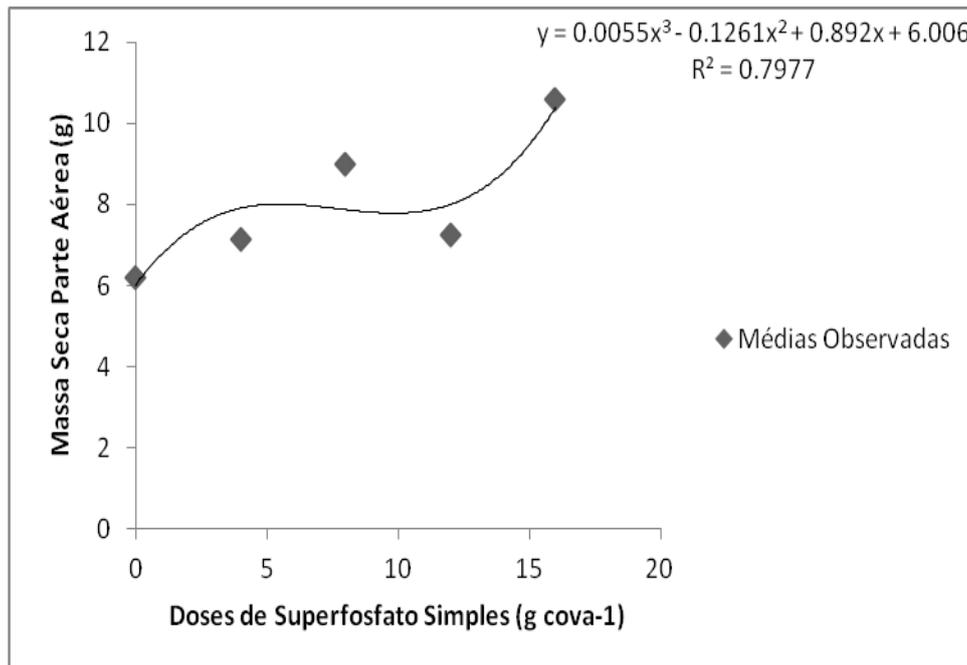


FIGURA 9. Produção de matéria seca da parte aérea do capim vetiver no período em função das doses.

A resposta observada ao superfosfato simples para o capim vetiver caracteriza que a quantidade de superfosfato estabelecida através do cálculo obtido pelo embasamento teórico de Sobral et al.(2007) para pastagens, é suficiente para atender as exigências para expressão do máximo potencial do vetiver.

5.4 Densidade de Raízes e Densidade do Comprimento de Raízes (DR e DCR)

Nos resultados de Densidade de Raízes e Densidade do Comprimento de Raízes foram identificadas diferenças em função das doses de fósforo e período de avaliação (Figura 10). Os modelos das equações de regressão foram lineares e quadráticos, para densidade de raiz o período máximo para o desenvolvimento foi o de 35 dias.

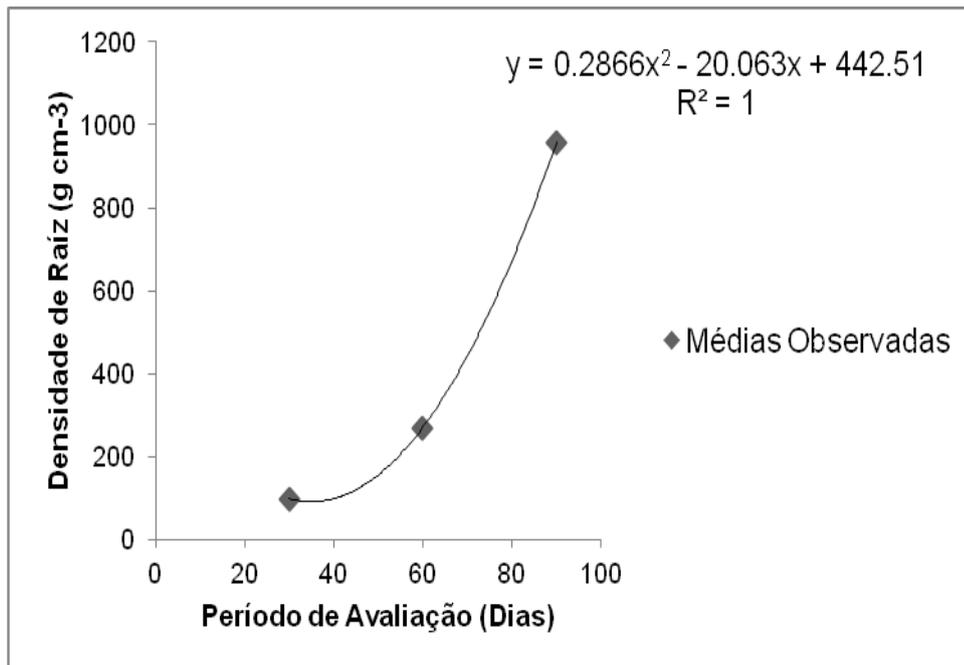


FIGURA 10. Produção de densidade de raiz do capim vetiver no período em função das doses.

A densidade de comprimento de raiz apresentou modelo linear para as doses 0, 4 e 8 g cova⁻¹, observou-se um aumento crescente em incremento na densidade de raiz com o passar do tempo do período de avaliação. As demais doses 12 e 16 g cova⁻¹ mostrou em seus resultados 12 e 16 g cova⁻¹ um modelo de regressão quadrática onde o período de desenvolvimento para estas doses ocorreram nos 27 e 35 dias, respectivamente (Figura 11).

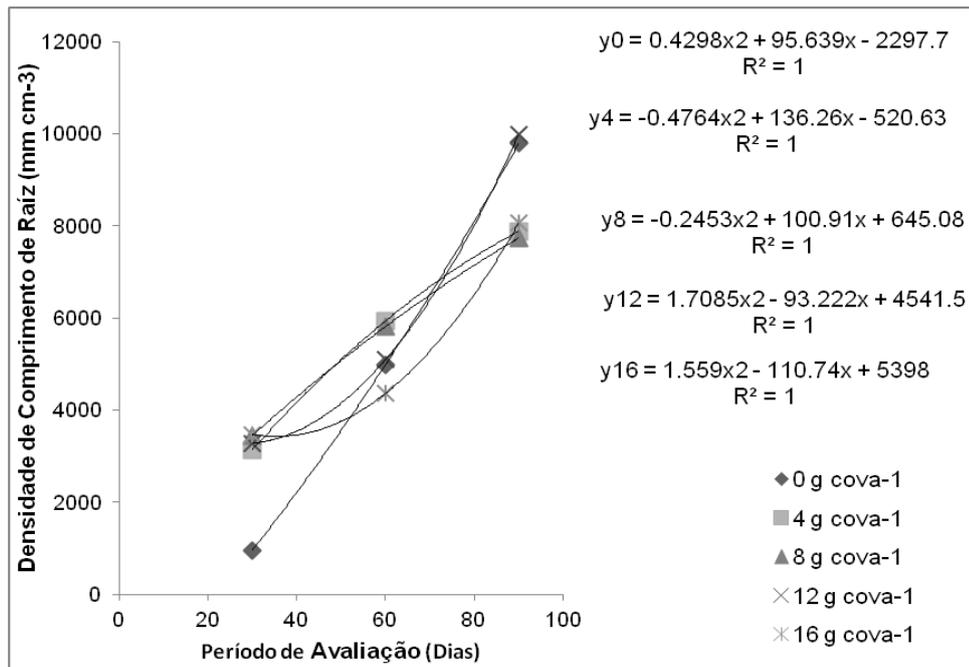


FIGURA 11. Produção de densidade de comprimento de raiz capim vetiver no doses em função dos períodos de avaliação.

Segundo Santos Junior (2004) vários fatores são requeridos para crescimento ocorra dentre estes temos luz, CO₂ e nutrientes. O incremento em qualquer um desses fatores variando da suficiência para eficiência promove taxas diferenciadas de crescimento e da produção.

A densidade de comprimento raiz, dentro de cada dose de superfosfato, variou significativamente ($P \leq 0.05$) em função do período de coleta de dados. Essa variação seguiu o modelo cúbico de regressão onde apresentaram média correlação nos 30 dias e alta correlação em 60 e 90 dias de avaliação. O comportamento aos 30 dias apresentou constante em incremento de densidade de comprimento de raiz, já no período 60 dias houve um aumento a partir da dose 4 g covas⁻¹ e depois uma redução nesse incremento com o aumento da dose de superfosfato simples. Para o período 90 dias hou vê uma redução na densidade de comprimento de raiz na dose 4 e 8 g covas⁻¹ depois um aumento na dose 12 g e novamente uma queda na dose 16 g covas⁻¹ em incorporação na densidade (Figura 12).

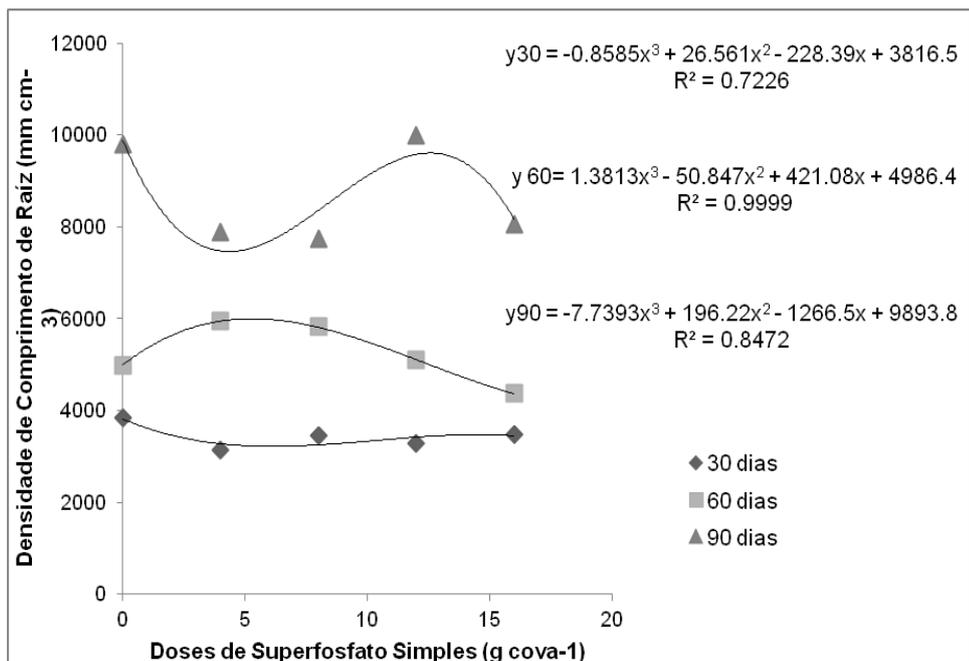


FIGURA 12. Produção de densidade de comprimento de raiz capim vetiver no períodos em função das doses.

As plantas que apresentaram maior densidade do comprimento de raízes possivelmente apresentarão maior resistência inicial à enxurradas e à deslizamentos de terra por permitir uma maior estruturação do solo em razão do aumento de aporte de carbono e maior concentração de ácidos fulvicos e huminas em solos cultivados com gramíneas, como relatado por Barreto et al. (2008). Além disso, também são capazes de promover uma maior absorção de água nos horizontes subsuperficiais do solo (STOKES et al., 2009), influenciando diretamente a estabilidade destas camadas e, conseqüentemente, na resistência das raízes à ruptura em momentos críticos, visto que as raízes resistirão aos deslizamentos de terra até o seu rompimento.

5.5 Número de Raízes e Superfície Externa de Raízes

Os parâmetros analisados apresentaram diferença estatística ($P \leq 0.05$) significativa para número de raízes e superfície externa de raízes, o modelo da regressão utilizado foi linear e quadrático. Para o número de raízes a dose 0 g cova⁻¹ e 12 g cova⁻¹ apresentaram os maiores períodos de desenvolvimento com 70 e 61 dias, seguindo-se com os menores períodos as doses 16, 4 e 8 g cova-1 com valores crescente respectivamente (Figura 13).

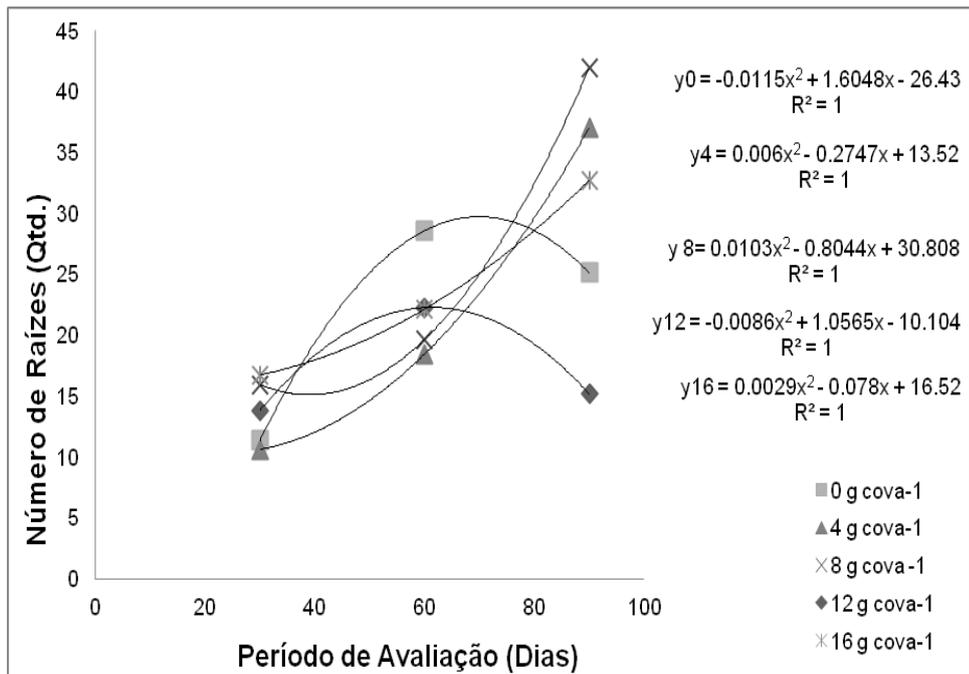


FIGURA 13. Produção de número de raiz do capim vetiver no períodos em função das doses.

Para a superfície externa as doses 4, 8 e 16 g.cova⁻¹ apresentaram incrementos em superfície externa com o aumento do período de desenvolvimento do capim vetiver. A dose 0 e 12 g.cova valores crescente em superfície externa (Figura 14).

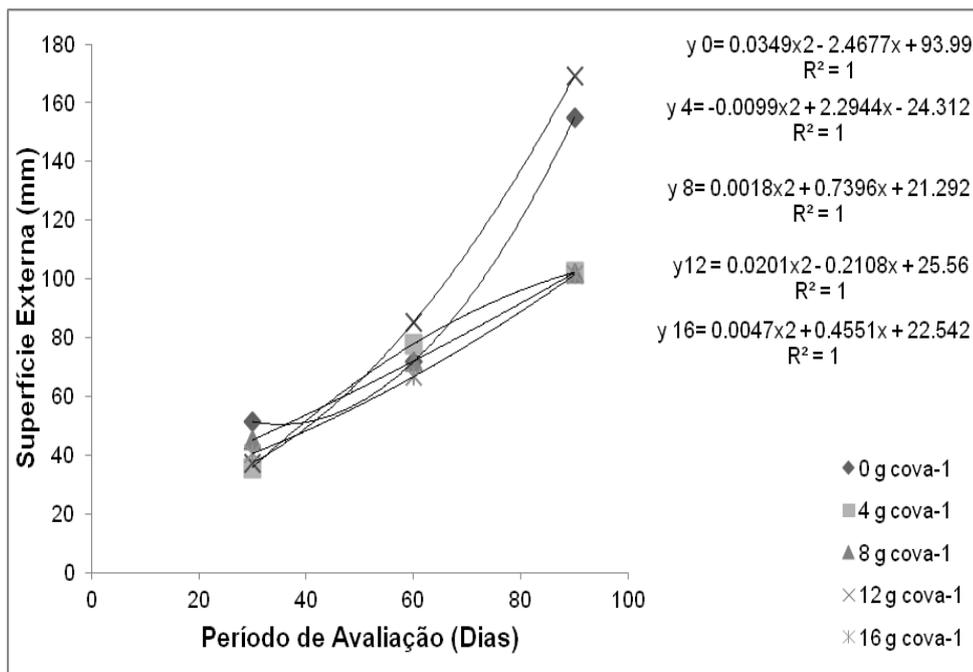


FIGURA 14. Produção de superfície externa capim vetiver no doses em função dos períodos de avaliação.

De acordo com VANCE; UHDE-STONE; ALLAN (2003) quando o suprimento de fósforo é pequeno chegando a seu limite crítico, as plantas desenvolvem mecanismos para a absorção desse nutriente essencial, como o crescimento radicular com mudanças em sua superfície externa e na distribuição. Com isso a planta remonta seu processo metabólicos reduzindo taxa de crescimento e modificações no carbono, translocando para as raízes (remobilização de fósforo).

Esse comportamento parece ocorrer em torno de 90 dias, quando os dados de superfície externa chegam ao seu máximo, diminuindo aos 30 e 60 dias. Esse resultado também pode ser explicado pela melhor formação do sistema radicular das mudas produzidas em locais com maior quantidade de nutrientes, com menor enovelamento e menor formação de radículas, ou seja, o sistema radicular apresentou menor enovelamento e maior formação de raízes.

O número de raiz e superfície externa dentro de cada dose e em função do período de avaliação apresentou efeito significativo ($P \leq 0.05$). Essa variável seguiu-se os modelos linear e cúbico de regressão. Esse atributo morfológico apresentou-se uma pequena redução e constante para o período 30 dias com o aumento das doses crescente de superfosfato simples, já no manteve-se também constante os valores de superfície

externa no período de 60 dias, houve uma redução em superfície externa a partir da dose 12 g cova⁻¹. No período 30 dias houve uma redução na dose 4 g cova⁻¹ depois um aumento na dose 8 g cova⁻¹ e redução na dose 16 g cova⁻¹ em incremento de superfície externa (Figura 15).

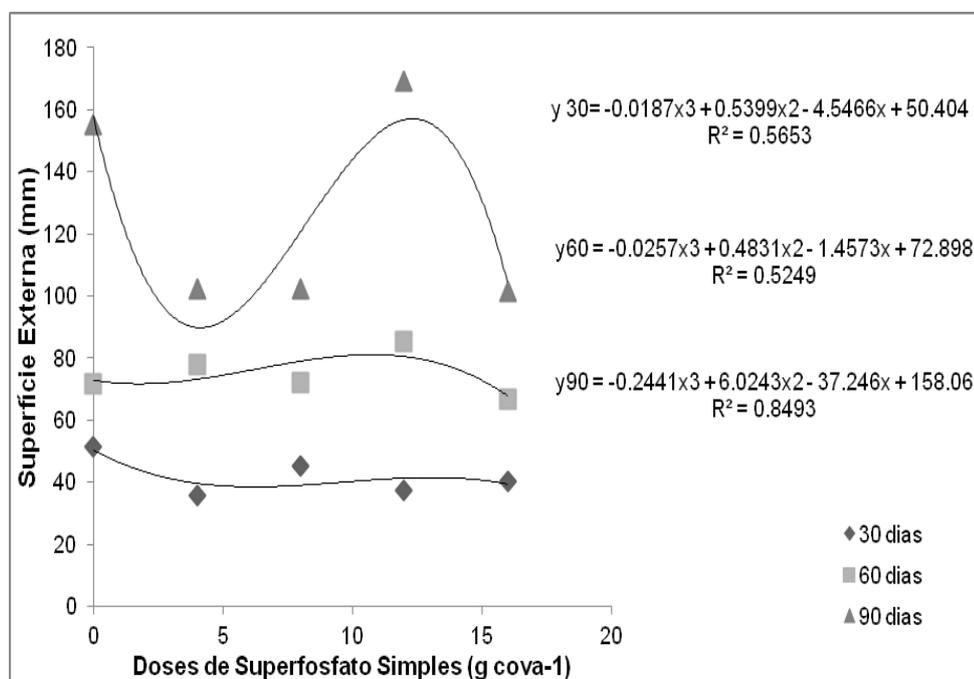


FIGURA 15. Produção de superfície externa do capim vetiver do período em função das doses.

Os achados de Gyssels et al., (2005) e Reubens et al., (2007), ressaltam que a superfície externa, sobretudo das raízes menores que 3 mm, é um parâmetro muito importante no controle de processos erosivos, pois quanto maior for a superfície externa, maior será a área de contato com o solo.

Segundo Mickovski e Van Beek (2009) e Truong e Loch (2004) as raízes de capim vetiver apresentam maior resistência à tração com a diminuição do diâmetro das mesmas. Entretanto, como a superfície externa de raízes é influenciada pelo número de raízes e pelos comprimentos e diâmetros das mesmas, com a diminuição do diâmetro das raízes poderá ocorrer um decréscimo na superfície externa, reduzindo sua área de contato com o solo. Assim, é desejável que o sistema radicular de uma muda de capim vetiver tenha grande quantidade de raízes finas (> 3mm) e diminuta a quantidade de raízes grossas (< 3mm).

Para o número de raiz o período 30 dias apresentou um aumento pequeno e constante com crescente aumento das doses de superfosfato simples. No período 60 dias houve uma redução em incremento de número de raízes com aumento das doses de superfosfato. Para os 90 dias de avaliação houve um aumento repentino na dose 4 g cova⁻¹ e após esta dose hou uma redução no número de raízes e apartir da dose 16 g cova⁻¹ houve uma aumento crescente nos valores de número de raízes (Figura 16).

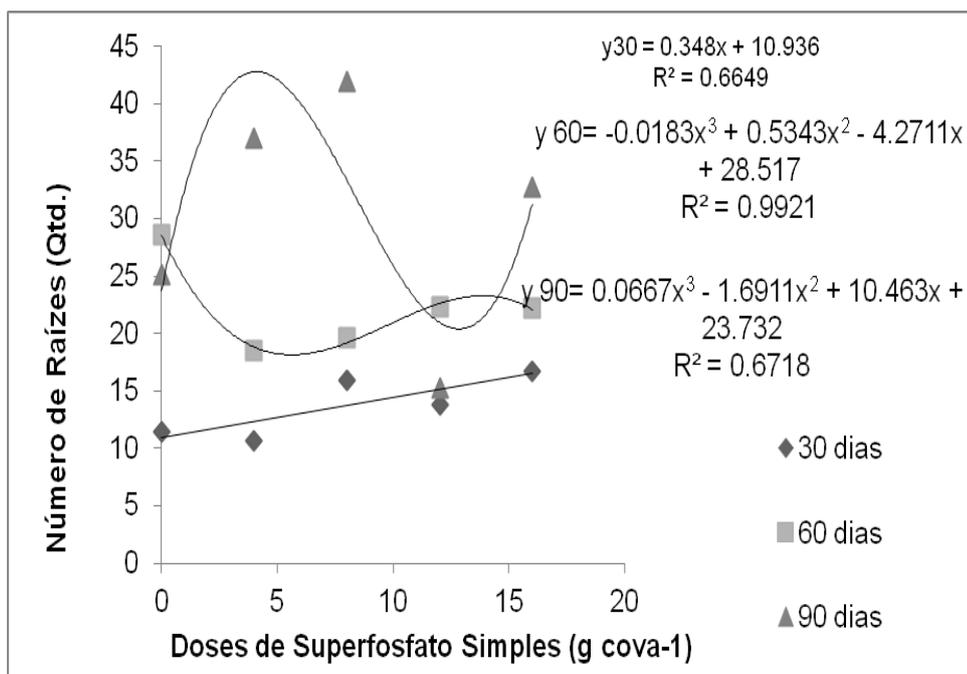


FIGURA 16. Produção de número de raízes do capim vetiver período em função das doses.

5.6 Comprimento parte aérea e raiz

Os valores da variável comprimento da parte aérea e raiz se ajustaram ao modelo de regressão linear e quadrático. Na variável comprimento da parte aérea apresentaram um aumento crescente e linear com o passar do tempo de avaliação (Figura 17).

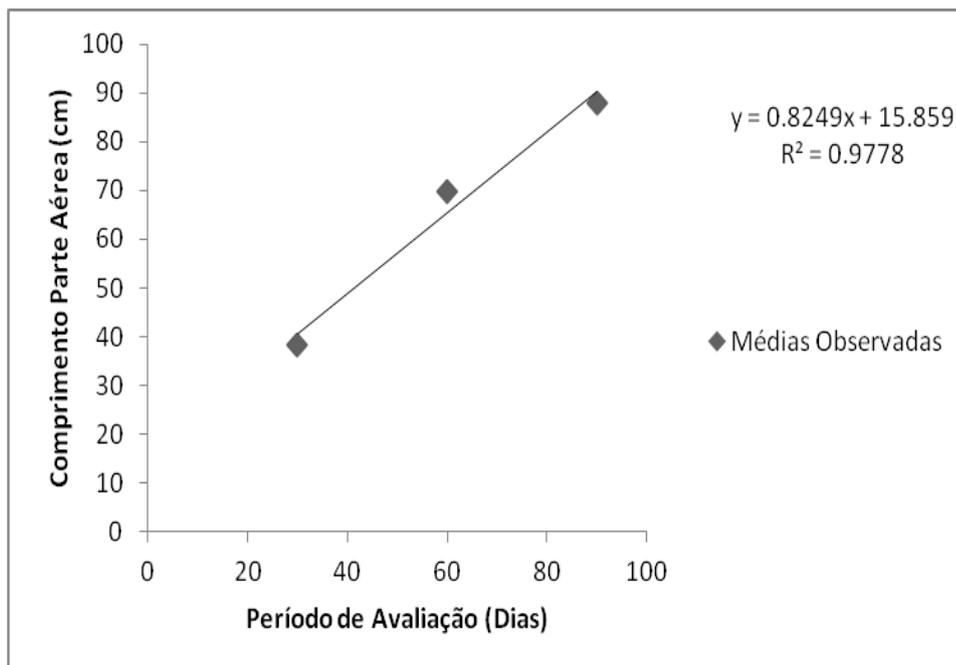


FIGURA 17. Produção de comprimento de raiz do capim vetiver no doses em função dos períodos de avaliação.

O comprimento total de raízes apresentou seu máximo desenvolvimento no período de 20 dias, apresentando um boa correlação entre o período de avaliação e o comprimento total de raízes (Figura 18).

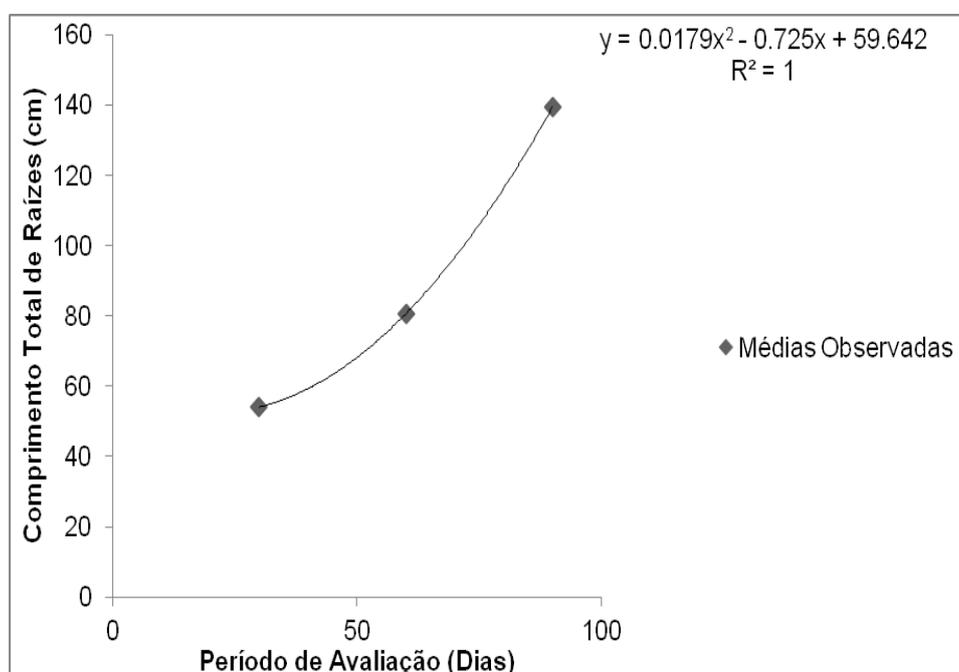


FIGURA 18. Produção comprimento total de raiz do capim vetiver no doses em função dos períodos de avaliação.

Segundo VANCE; UHDE-STONE; ALLAN (2003) que quanto maior o comprimento do sistema radicular, maior a área de superfície do mesmo melhorando assim a absorção do fósforo. O sistema radicular das plantas com sua distribuição e comprimento facilita a exploração do substrato em qual foi plantado.

6 Conclusões

A adubação fosfatada se mostrou eficiente em aumentar a produção de massa seca parte aérea, massa seca raiz, massa fresca aérea, massa fresca raiz, densidade de raiz, densidade de comprimento da raiz, número de raiz, superfície externa, comprimento parte aérea, comprimento raiz.

O período de 90 dias se mostrou representativo para a percepção do melhor desenvolvimento da parte aérea e raiz

Doses de fósforo maiores que 12 g.cova^{-1} não apresentaram vantagens significativas no desenvolvimento das plantas.

7 Referências Bibliográficas

ALMEIDA, J.C.R. de. **Combinação de doses de fósforo e magnésio na produção e nutrição de duas Braquiárias**. Piracicaba, 1998. 81f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

BARRETO, A. C.; FREIRE, M. B. G. S.; NACIF, P. G. S.; ARAÚJO, Q. R.; FREIRE, F. J.; INÁCIO, E. S. B. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1471-1478, 2008.

BANZATO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 3. ed. Jaboticabal: Funep, 1995. 247 p.

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**, Crawley, Australia, v. 324, n. 324, p. 31-42, 2009.

CASADO, A.P. B.; HOLANDA, F. S. R.; ARAÚJO FILHO, F. A. G.; YAGUIU, P. **Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco** (perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba - SE). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, nº 26, p. 231-239, 2002.

CHENG, H.; YANG, X.; LIU, A.; FU, H.; WAN, M. **A study on the performance and mechanism of soil reinforcement by herb root system**. In: Proceedings of the 3rd International Vetiver Conference, 2003. *Proceedings...* Guangzhou, 2003.

CHIERA, J.; THOMAS, J.; RUFTY, T. Leaf initiation and development in soybean under phosphorus stress. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 53, p. 473-481, 2002.

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

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento do São Francisco e Vale do Paraíba. Disponível em <http://www.codevasf.gov.br/osvales/vale-do-sao-francisco/identificacao>, acessado em 11 de maio de 2010.

DANNER, M. A.; CITADIN, I.; JUNIOR, A. A. F.; ASSMANN, A. P.; MAZARO, S. M.; SASSO, S. A. Z. Formação de mudas de jaboticabeira (*Plinia* sp.) em diferentes substratos e tamanhos de recipientes. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, n. 1, p. 179-182, 2007.

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.

DEFLOR – Defesa Florestal Ltda. **Catálogo de produtos e serviços de bioengenharia**. Disponível

www.deflor.com.br/portugues/pdf/especificacoes_tecnicas_biomantas.pdf, acessado em 20 de maio de 2011.

DOMINGUEZ-LERENA, S.; SIERRA, N. H.; MANZANO, I. C.; BUENO, L. O.; RUBIRA, J. L. P.; MEXAL, J. G. Container characteristics influence *Pinus pinea* seedling development in the nursery and field. **Forest Ecology and Management**, v. 221, p. 63-71, 2006.

DURLO, M. A. e SUTILI, F. J. **Bioengenharia: manejo biotécnico de cursos de água**. Porto Alegre, RS: EST Edições, 2005. 198 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar 4.3. 2003. Disponível em: <http://www.dex.ufla.br/danielff/sisvar>>. Acesso em 10 nov. 2011.

FERREIRA, E. M.; SANTOS, A. C. dos; ARAUJO, L. C. de and CUNHA, O. F. R. Características agrônômicas do *Panicum maximum* cv. "Mombaça" submetido a níveis crescentes de fósforo. **Ciência Rural**, vol.38, n.2, p. 484-491, 2008.

FRANCO, H. C. J. ; COUTINHO, Edson Luiz Mendes. Avaliação da eficiência agrônômica de fontes de fósforo utilizando diferentes métodos. **Científica**, v. 32, n. 1, p. 58-64, 2004.

GHERI, E.O.; CRUZ, M.C.P.; FERREIRA, M.E. et al. Nível crítico de fósforo para *Panicum maximum* Jacq. cv. Tanzânia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1809-1816, 2000.

GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. G.; XAVIER, A.; GARCIA, S. L. R. Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* produzidas em diferentes tamanhos de tubetes e fertilização N-P-K. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 113-127, 2003.

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. 32, p. 189-217, 2005.

HENGCHAOVANICH, D. **15 Years of bio engineering in the wet tropics: from A (*Acacia auriculiformis*) to V (*Vetiveria zizanioides*)**. In: First Asia-Pacific Conference on Ground and Water Bio-engineering, 1999. *Proceedings...* Manila, 1999.

HOLANDA, F. S. R. ; MENGEL, D. B. ; BERTONI, J. C. ; CARVALHO, J. G. ; PAULA, M. B. Aliação da sensibilidade de alguns parâmetros em um modelo de absorção de fósforo e potássio pela cultura do milho (*zea mays* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 23, n. 1, p. 24-30, 1999.

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, p. 570-575, 2008.

HOLANDA, F. S. R.; GOMES, L. G. N.; ROCHA, I. P. da; 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 solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 157-166, 2010.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/sim/sonabra/dspDadosCodigo.php?ODMwOTc=>, acessado em 11 de dezembro de 2011.

JOSÉ, A. C.; DAVIDE, A. C.; OLIVEIRA, S. L. de. Produção de mudas de aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi) para recuperação de áreas degradadas pela mineração de bauxita. **Cerne**, Lavras, MG, v. 11, n. 2, p. 187-196, 2005.

LELES, P. S. S.; CARNEIRO, J. G. A.; BARROSO, D. G.; MORGADO, I. F. Qualidade de mudas de *Eucalyptus* spp. produzidas em blocos prensados e em tubetes. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 24, n. 1, p.13-20, 2000.

MALAVASI, U. C.; MALAVASI, M. M. Efeito do volume do tubete no crescimento inicial de plântulas de *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Estud e *Jacaranda micranta* Cham. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 1, p.11-16, 2006.

MARENCO, R.A.; LOPES, N.F. **Fisiologia Vegetal: Fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**, Editora UFV. Viçosa, MG. 2005. 451pp.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MASON, P.A.; INGLEBY, K.; MUNRO, R.C.; WILSON, J.; IBRAHIM, K. Interactions of nitrogen and phosphorus on mycorrhizal development and shoot growth of *Eucalyptus globules* (Labill.) seedlings inoculated with two different ectomycorrhizal fungi. **Forest Ecology and Management**, v. 128, p. 259-268, 2000.

MELO, A.S.; AGUIAR NETO, A.O.; DANTAS NETO, J.; BRITO, M.E.B.; VIEGAS, P.R.A.; MAGALHÃES, L.T.G.; FERNANDES, P.D. Desenvolvimento vegetativo, rendimento da fruta e otimização do abacaxizeiro cv. Pérola em diferentes níveis de irrigação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n. 1, p.93-98, 2006.

MELO, S.P. ; Monteiro F.A. ; D. Manfredini . Silicate and phosphate combinations for marandu palisadegrass growing on an oxisol.. **Scientia Agricola**, v. 64, p. 275-281, 2007.

MENDONÇA, V.; ARAÚJO NETO, S. E. de; RAMOS, J. D.; PIO, R.; GONTIJO, T. C. A. Diferentes substratos e recipientes na formação de mudas de mamoeiro ‘Sunrise Solo’. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, n. 1, p.127-130, 2003.

MESQUITA, E.E.; PINTO, J.C.; FURTINI NETO, A.E. et al. Teores críticos de fósforo em três solos para o estabelecimento de capim-Mombaça, capim- Marandu e capim-Andropogon em vasos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, p.290-301, 2004.

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

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. 278, p.33-41, 2005.

MONTEIRO, Josita Soares ; Leite, M. B. ; WINK, Charlote ; Durlo, Miguel Antão . Influência do ângulo de plantio sobre a brotação e o enraizamento de estacas de *Phyllanthus sellowianus* (Klotzsch) Mull. Arg.. **Ciência Florestal**, v. 20, p. 523-532, 2010.

NICOLOSO, F. T.; FORTUNATO, R. P.; ZANCHETTI, F.; CASSOL, L. F.; EISINGER, S. F. Recipientes e substratos na produção de mudas de *Maytenus ilicifolia* e *Apuleia leiocarpa*. **Ciência Rural**, v.30, n. 6, p. 987-992, 2000.

NOVAES, A. B. de; CARNEIRO, J. G. A.; BARROSO, D. G. Desempenho de mudas de *Pinus taeda* produzidas em raiz nua e em dois tipos de recipientes, 24 meses após o plantio. **Revista Floresta**, v.31, p.62-71, 2001.

OLIVEIRA, T.N.; PAZ, L.G.; SANTOS, M.V.F. et al. Influência do fósforo e de diferentes regimes de corte na produtividade e no perfilhamento do capim de- raiz (*Chloris orthonoton* Doell). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33, p.60-67, 2004.

PHIEN, T.; TAM, T.T. Vetiver grass in hedgerow farming systems on sloping lands in Viet Nam. **National Institute for Soils and Fertilizers**, p.265-269, 2007.

PHILLIPS, C.; MARDEN, M. **Use of plants for ground bioengineering and erosion e sediment control in New Zealand**. In: Proceedings of “Soil e Water. Too good to lose”. Joint Annual Conference NSW Stormwater Industry Association and the Internatioanal Erosion Control Association, 2006, Parramatta. *Proceedings...* Parramatta, 2006.

QUEIROZ, J. A. L. de; JÚNIOR, N. J. M. Efeito do tamanho do recipiente sobre o desenvolvimento de mudas de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 23, n. 2, p. 460-462, 2001.

REICH, P.B.; OLEKSYN, J.; WRIGHT, I.J. Leaf phosphorus influences the photosynthesisnitrogen relation: a cross-biome analysis of 314 species. **Oecologia**, Marburg, v. 160, p. 207-212, 2009.

REUBENS, B.; POESEN, J.; DANJON, F.; GEUDENS, G.; MUYS, B. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. **Trees – Structure na Function**, v. 21, n. 34, p. 385-402, 2007.

RIBEIRO, M. C. C.; MORAIS, M. J. A. de; SOUSA, A. H.; LINHARES, P. C. F.; JÚNIOR, A. P. B. Produção de mudas de maracujá-amarelo com diferentes substratos. **Caatinga**, v. 18, n. 3, p. 155-158, 2005.

SAMÔR, O. J. M.; CARNEIRO, J. G. de; BARROSO, D. G.; LELES, P. S. S. Qualidade de mudas de angico e sesbânia, produzidas em diferentes recipientes e substratos. **Revista Árvore**, v. 26, n. 2, p. 209-215, 2002.

SANTOS JUNIOR, J. de D. G.s dos ; MONTEIRO, F. A. ; LAVRES JUNIOR, J. . Análise de crescimento do capim-marandu submetido a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia / Brazilian Journal of Animal Science**, v. 33, n. 6, p. 1985-1991, 2004.

SANTOS, C. B.; LONGHI, S. J.; HOPPE, J. M.; MOSCOVICH, F. A. Efeito do volume de tubetes e tipos de substratos na qualidade de mudas de *Cryptomeria japonica* (L.F.) D. Don. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 2, p. 1-15, 2000.

Sergipe. **Atlas digital sobre recursos hídricos**. Aracaju: Geoambiente, CD-ROM. 2004

SERRANO, L. A. L.; MARINHO, C. S.; BARROSO, D. G.; CARVALHO, A. J. C. de; Sistema de blocos prensados e doses de adubo de liberação lenta na formação de porta-enxerto cítrico. **Ciência Rural**, v. 36, n. 2, p. 441-447, 2006.

SOBRAL, L. F; VIÉGAS, P. R. A. ; SIQUEIRA, O. J. W. ; ANJOS, J. L.; BARRETTO, M. C. de V. ; GOMES, J. B. V. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes no Estado de Sergipe**. 1. ed. Aracaju: CPATC/EMBRAPA, 2007. v. 1. 251 p.

SODRÉ, G. A.; CORÁ, J. E.; JÚNIOR, J. O. S.. Caracterização física de substratos à base de serragem e recipientes para crescimento de mudas de cacauzeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, n. 2, p. 339-344, 2007.

SOUSA, R. S. ; PIRES, A. J. V. ; CARVALHO, G. G. P. de ; SILVA, F. F. da ; MAGALHÃES, A. F. ; VELOSO, C. M. . Composição química de capim-tanzânia adubado com nitrogênio e fósforo. **Revista Brasileira de Zootecnia / Brazilian Journal of Animal Science**, v. 39, p. 1200-1205, 2010.

STOKES, A.; ATGER, C.; BENGOUGH, A. G.; FOURCAUD, T.; SIDLE, R. C.; Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. **Plant and Soil**, v. 324, p. 1-30, 2009.

SUTILI, F. J.; DURLO, M. A.; BRESSAN, D. A. Potencial biotécnico do sarandi-branco (*Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg.) e vime (*Salix viminalis* L.) para revegetação de margens de cursos de água. **Ciência Florestal**, v.14, n.1, p.13-20, 2004.

TRUONG, P. Vetiver grass technology. In: MAFFEI, M. **Vetiveria the Genus Vetiveria**. New York: Taylor e Francis, 2002.

TRUONG, P.N.V.; LOCH, R. **Vetiver System for erosion and sediment control**. In: 13^a International Soil Conservation Organisation Conference, 2004, Brisbane. *Proceedings...* Brisbane, 2004.

VALLONE, H. S.; GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; CUNHA, R. L.; CARVALHO, G. R.; DIAS, F. P. Efeito de recipientes e substratos utilizados na produção de mudas de cafeeiro no desenvolvimento inicial em casa de vegetação, sob estresse hídrico. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 320-328, 2010b.

VALLONE, H. S.; GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; SOUZA, C. A. S.; CUNHA, R. L. da; DIAS, F. P. Diferentes recipientes e substratos na produção de mudas de cafeeiros. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 1, p. 55-60, 2010a.

VANCE, C.P.; UHDE-STONE, C.; ALLEN, D.L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, v. 157, p. 423-447, 2003.