

MARIA LUCIA SOLERA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MODELOS ESTRUTURAIS DE
BIOENGENHARIA DE SOLOS PARA REVEGETAR TALUDE DE PILHA DE
ESTÉRIL NA MINERAÇÃO A CÉU ABERTO**

Sorocaba
2018

MARIA LUCIA SOLERA**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MODELOS ESTRUTURAIS DE
BIOENGENHARIA DE SOLOS PARA REVEGETAR TALUDE DE PILHA DE
ESTÉRIL NA MINERAÇÃO A CÉU ABERTO**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutora em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, na Área de Concentração, Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Admilson Irio Ribeiro

Sorocaba

2018

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Unesp
Instituto de Ciência e Tecnologia – Câmpus de Sorocaba

Solera, Maria Lucia.

Desenvolvimento e avaliação de modelos estruturais de bioengenharia de solos para revegetar talude de pilha de estéril na mineração a céu aberto / Maria Lucia Solera, 2018.

97 f.: il.

Orientador: Admilson Irio Ribeiro.

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Ciência e Tecnologia (Câmpus de Sorocaba), 2018.

1. Bioengenharia. 2. Solos. 3. Degradação ambiental. 4. Mineração a céu aberto. I. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Ciência e Tecnologia (Câmpus de Sorocaba). II. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Desenvolvimento e avaliação de modelos estruturais de bioengenharia de solos para revegetar talude de pilha estéril na mineração a céu aberto.


AUTORA: MARIA LUCIA SOLERA

ORIENTADOR: ADMILSON IRIO RIBEIRO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIAS AMBIENTAIS, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ADMILSON IRIO RIBEIRO
Engenharia Ambiental / UNESP - ICT Sorocaba




Prof. Dr. GERSON ARAÚJO DE MEDEIROS
Engenharia Ambiental / UNESP - ICT Sorocaba



Prof. Dr. IVANDO SEVERINO DINIZ
Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia/UNESP/Sorocaba



Prof. Dr. ANGEL PONTIN GARCIA
Engenharia Agrícola / FEAGRI



Prof. Dr. AMARILIS LUCIA CASTELI FIGUEIREDO GALLARDO
Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental / Escola Politécnica da USP

Sorocaba, 09 de março de 2018

Ao meu pai Antonio Solera (in memorian)
À minha mãe Maria Helena de Oliveira Solera
À minha irmã Maria Cristina Solera

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade da vida e de aprendizado.

Ao universo, que mesmo nos momentos em que tudo parece estar perdido, conspirou a meu favor. Aos Anjos, assim designados por mim às pessoas que surgiram com palavras de incentivo.

À minha mãe Maria Helena e irmã e amiga Maria Cristina (Cris). Amo vocês.

Ao Instituto e Pesquisas Tecnológicas (IPT), pelo apoio.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba e a todos os seus colaboradores.

Ao Prof. Admilson Irio Riberio por ter me recebido com muito carinho como sua orientanda, por sua parceria, incentivo, compreensão e paciência.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – Fapesp pelo suporte financeiro ao projeto de pesquisa “Recuperação de áreas degradadas pela mineração associando técnicas de bioengenharia de solos com a geração e manutenção do serviços ambientais” no qual este projeto de pesquisa foi amparado.

À Vale fertilizantes, unidade Cajati (SP), pelo suporte técnico e operacional, em especial aos profissionais Henrique, Jamilson e Gabriela.

Aos colegas da Seção de Sustentabilidade de Recursos Florestais do IPT: Ana Paula, Aline, Mariana, Caroline, Paula Yelo e Marcio Nahuz (*in memoriam*), à secretária Stephanie e também às colegas Cátia, Aná e Elvira.

Ao Centro de Tecnologia de Recursos Florestais do IPT na pessoa de sua diretora Ligia Ferrari Torella di Romagnano.

Aos colegas Ana Maria, Álvaro, Benedito (Toca), Caio, Maria Cristina (Cris), Priscila, Omar e Sofia do Laboratório de Recursos Hídricos e Avaliação Geoambiental e à colega Lucia Dozzi do Laboratório de Geotecnia.

A Edna Baptista Gubitoso pelo apoio incondicional nas pesquisas e revisão das referências bibliográficas.

Às amigas Amarilis e Alessandra pelas palavras de incentivo e apoio em momentos difíceis. Obrigada pelos minutos de descontração e das boas risadas nas pausas para o cafezinho.

Aos amigos do Grupo Hera, gratidão eterna.

Aos colegas Aroldo e Mirna pelo auxílio na elaboração dos desenhos que ilustram esta tese

Às minhas amigas de longa jornada: Maria Josefa (Jô), Débora (Dedé); Verinha, Celinha (*in memoriam*) e Mirna, sempre na torcida dizendo “isso também passa”.

Agradecimentos a todos os colegas do IPT que direta ou indiretamente me apoiaram nesta jornada.

Vozes do Espírito (Chico Xavier)

Livro: Aulas da Vida (Carlos Augusto Abranches – 1981)

Deus é meu Pai.

A Natureza é minha Mãe.

O Universo é meu Caminho.

A Eternidade é meu Reino.

A Imortalidade é minha Vida.

A Mente é meu Lar.

O Coração é meu Templo.

A verdade é meu Culto.

O Amor é minha Lei.

A Forma em si é minha Manifestação.

A Consciência é meu Guia.

A Paz é meu Abrigo.

A Experiência é minha Escola.

O Obstáculo é minha Lição.

A Dificuldade é meu Estímulo.

A Alegria é meu Cântico.

A Dor é meu Aviso.

A Luz é minha Realização.

O trabalho é minha Benção.

O Amigo é meu Companheiro.

O Adversário é meu Instrutor.

O Próximo é meu irmão.

A Luta é minha Oportunidade.

O Passado é minha Advertência.

O Presente é minha Realidade.

O Futuro é minha Promessa.

O Equilíbrio é minha Atitude.

A Ordem é minha Senha.

A Beleza é meu Ideal.

A Perfeição é meu Destino.

SOLERA, M. L. **Desenvolvimento e avaliação de modelos estruturais de bioengenharia de solos para revegetar talude de pilha de estéril na mineração a céu aberto.** 2018. 97 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. 2018.

RESUMO

A mineração representa um importante setor na economia promovendo diversos benefícios econômicos e sociais ao país. Ainda que apresente impactos positivos, os cenários de degradação originados pela atividade minerária causam impactos negativos ao meio ambiente, dificultando a recuperação da área degradada. Esta pesquisa discute a aplicabilidade da bioengenharia de solos como estratégia promissora para recuperar um talude de pilha de estéril. Esse talude está constituído por materiais de diferentes granulometrias, alta declividade e elevado índice de vazios, características físicas que podem afetar o desenvolvimento ou mesmo a recolonização da vegetação nativa por processos naturais de sucessão. Três modelos estruturais de bioengenharia de solos denominados de guirlanda, colmeia e retentor foram confeccionados para reter mistura de solo-substrato/sementes de *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrina* e *Cajanus cajan* como adubos verdes visando à produção de matéria orgânica e promover as condições necessárias para posterior revegetação do talude. Os resultados obtidos com aplicação dos índices desenvolvidos para avaliar os modelos indicam que a guirlanda apresentou melhor resultado, destacando-se a baixa dificuldade de instalação do modelo no talude, a baixa dificuldade de preenchimento do solo-substrato/sementes no modelo e o alto desenvolvimento da adubação verde. O segundo melhor desempenho foi alcançado pelo modelo retentor seguido pelo modelo colmeia com o pior desempenho. Na análise dos bioindicadores ambientais do solo, a guirlanda apresentou melhor resultado na produção da matéria orgânica, em número de morfoespécies e em número de indivíduos da fauna edáfica, seguindo pelos modelos retentor e colmeia. Os critérios preestabelecidos especificamente para avaliar esses modelos indicam potencial de aplicabilidade em futuros projetos de pesquisas para recuperar situações similares de degradação em áreas de mineração a céu aberto.

Palavras-Chave: Bioengenharia de Solos. Mineração. Áreas Degradadas. Talude de Pilha de Estéril.

SOLERA, M. L. **Development and assessment of soil bioengineering structural models for revegetated waste dump slope in open pit mining.** 2018. 97 f. Thesis (PhD in Environmental Sciences) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. 2018.

ABSTRACT

Mining represents an important sector in the economy promoting many economic and social benefits to the country. Although this represents positive impacts, the degradation scenarios originated by the mining activity cause negative impacts to the environment, which difficult the recovery of the degraded area. This research discusses the applicability of soil bioengineering as a promising strategy for recovering a slope of a waste dump. This slope consists of materials of different granulometries, high slope and high void ratio, physical characteristics that can hinder the development or even the recolonization of native vegetation by natural succession processes. Three soil bioengineering structural models, named as guirlanda, colmeia and retentor were made to retain a mix of soil-substrate and seeds of *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrina* and *Cajanus cajan* as green manures for the production of organic matter and to promote the necessary conditions for future revegetation of the slope. The results obtained with application of the indices developed to assess the models indicate that guirlanda presented the best results, with highlights for the low difficulty in installing the model on the slope, the low difficulty of filling the model with the mix of soil-substrate and seeds and the high development of green manure. The second best performance was achieved by retentor model followed by the worst performing colmeia model. In the analysis of soil environmental bioindicators, guirlanda presented better results in the production of organic matter, in number of morphospecies and in number of individuals of the edaphic fauna, followed by the models retentor and colmeia. The specifically pre-established criteria to assess these models indicate the potential applicability in future research projects to recover similar situations of degradation in open pit mining areas.

Keywords: Soil Bioengineering. Mining. Land Degradation. Waste Dump Slope

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático dos objetivos da recuperação de áreas degradadas.....	20
Figura 2 – Ramos de vegetação para reparar margens de rio e diques (China 28 a.C.).....	27
Figura 3 – Ramos de vegetação para reparar margem de rio e diques (China séc. XX).....	27
Figura 4 – Corte e colheita de estacas de vegetação (Europa séc. XX).....	28
Figura 5 – Exemplos de intervenções com técnicas de bioengenharia de solos.....	30
Figura 6 – Margem de rio estabilizada com barragens vegetativas.....	31
Figura 7 – Combinação de técnicas para restaurar taludes marginais.....	31
Figura 8 – Combinação de técnicas para reparar cicatrizes de deslizamento de terra.....	32
Figura 9 – Combinação de técnicas nas ravinas erodidas no Sul da França.....	33
Figura 10 – Detalhes das diferentes técnicas utilizadas no extremo sul da Itália.....	33
Figura 11 – Aspecto geral da área antes e após intervenções.....	33
Figura 12 – Vista geral do talude Ponteio após intervenções.....	34
Figura 13 – Parede <i>Krainer</i> instalada na margem do Arroio Guarda-mor (RS).....	35
Figura 14 – Associação de técnicas aplicadas no talude marginal do Baixo São Francisco.....	35
Figura 15 – Lei do nível mínimo de energia em intervenções de bioengenharia de solos.....	37
Figura 16 – Processo Industrial do Complexo Mineroquímico de Cajati, SP.....	39
Figura 17 – Localização do Complexo Mineroquímico Vale Fertilizantes-Unidade Cajati, SP.....	40
Figura 18 – Talude da pilha de estéril no Complexo Mineroquímico de Cajati, SP.....	41
Figura 19 – Aspecto geral do talude da pilha de estéril antes da intervenção.....	41
Figura 20 – Formações vegetais na região da sub-bacia do rio Jacupiranga.....	43
Figura 21 – Classificação climática de Köppen (1928).....	44
Figura 22 – Tipos de clima no Estado de São Paulo e no município de Cajati, SP.....	45
Figura 23 – Colocação de solo-substrato no talude experimental.....	48
Figura 24 – Simulação da precipitação no talude experimental.....	48
Figura 25 – Croquis e protótipos dos modelos estruturais de bioengenharia de solos.....	50
Figura 26 – Teste experimental em talude construído com os protótipos.....	51
Figura 27 – Aspecto geral dos protótipos em talude construído.....	52
Figura 28 – Dimensionamento, espaçamento e posicionamento dos modelos.....	53
Figura 29 – Processo de confecção do modelo estrutural colmeia.....	55
Figura 30 – Processo de confecção do modelo estrutural guirlanda.....	56
Figura 31 – Dimensões das sacarias de café para o modelo estrutural retentor.....	57
Figura 32 – Regularização da superfície do talude com areia calcária.....	58

Figura 33 – Delimitação dos setores: observar a ocorrência de capim-napier	59
Figura 34 – Homogeneização do material de preenchimento dos modelos estruturais.	60
Figura 35 – Duto condutor de solo	61
Figura 36 – Processo de instalação do modelo estrutural colmeia	62
Figura 37 – Modelo estrutural colmeia instalado e preenchido com solo-substrato	63
Figura 38 – Processo de instalação do modelo estrutural retentor	64
Figura 39 – Aspecto geral do talude após instalação do modelo estrutural retentor	64
Figura 40 – Processo de instalação do modelo estrutural guirlanda.....	65
Figura 41 – Detalhe do modelo guirlanda instalado no talude	65
Figura 42 – Prenchimento do modelo estrutural guirlanda com solo-substrato/sementes	66
Figura 43 – Aspecto geral do talude com os modelos estruturais instalados	66
Figura 44 – Vista geral e em detalhe do desenvolvimento da adubação verde	67
Figura 45 – Esquema dos critérios utilizados no índice de desempenho	68
Figura 46 – Coleta de amostras de solo-substrato nos modelos estruturais	70
Figura 47 – Indivíduos da fauna edáfica	71
Figura 48 – Gráfico radar do desempenho dos modelos estruturais de bioengenharia de solos.....	74
Figura 49 – Matéria orgânica do solo (g/dm ³) dos modelos estruturais	76
Figura 50 – Número de morfoespécie e de indivíduos da fauna edáfica.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios de desempenho dos modelos estruturais de bioengenharia de solos	73
Quadro 1 – Ilustração, descrição e aplicação de algumas técnicas/métodos de bioengenharia de solos.....	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Hipótese da pesquisa	17
1.2	Estrutura da pesquisa	17
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral.....	18
2.1.1	Objetivos específicos.....	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	Mineração: degradação e recuperação.....	19
3.2	Bioengenharia de solos	26
3.2.1	Histórico e definição.....	26
3.2.2	Aplicações da bioengenharia de solos	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	Área de estudo, localização e acesso.....	39
4.2	Área experimental	40
4.3	Aspectos ambientais gerais da região	42
4.3.1	Cobertura vegetal.....	42
4.3.2	Clima	44
4.3.3	Geologia	45
4.3.4	Pedologia	46
4.3.5	Geomorfologia.....	46
4.3.6	Hidrografia.....	47
4.4	Teste de solo-retenção no talude da pilha de estéril	47
4.5	Concepção dos modelos estruturais	49
4.6	Confecção dos modelos estruturais finais.....	55
4.6.1	Modelo estrutural colmeia	55
4.6.2	Modelo estrutural guirlanda.....	55
4.6.3	Modelo estrutural retentor	56
4.7	Instalação dos modelos estruturais	57
4.7.1	Preparação da área experimental	57
4.7.2	Homogeneização do solo-substrato/sementes	59
4.7.3	Instalação do modelo estrutural colmeia	62
4.7.4	Instalação do modelo estrutural retentor	63
4.7.5	Instalação do modelo estrutural guirlanda.....	64
4.8	Avaliação dos modelos estruturais.....	67

4.8.1	Índice de desempenho dos modelos estruturais.....	67
4.8.2	Indicadores ambientais do solo	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1	Índice de desempenho dos modelos estruturais	72
5.2	Indicadores ambientais do solo	75
6	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE A	88

1 INTRODUÇÃO

Na atividade minerária, os processos tecnológicos associados à extração do minério envolvem a movimentação de grandes volumes de materiais. Para se atingir o minério que se encontra no subsolo, a camada superior denominada de estéril é removida e descartada sob a forma de pilhas próximas a área da mina (FORNASARI FILHO et al., 1981; PILLON; MIURA; ALBA, 2010; BAO et al., 2017).

Esses processos causam alterações na paisagem, modificando seu equilíbrio, resultando no desenvolvimento de novos ecossistemas (SILVA et al., 2010; DONTALA; REDDY; VADDE, 2015; DE QUADROS et al., 2016). No entanto, os produtos gerados na mineração são recursos necessários para atender às necessidades da população, principalmente os relacionados à alimentação, saúde, moradia e vestuário.

Na exploração dos recursos naturais por meio da mineração a céu aberto, as alterações da superfície manifestam-se por meio do aspecto estético, nos elementos visuais da linha, da forma, da textura, da complexidade e da cor que compõe a paisagem, muito bem marcantes no cenário afetado. Como consequência, o processo de mineração proporciona uma desfiguração do terreno e uma completa alteração da paisagem e dessa forma acaba por comprometer o uso futuro dos recursos ambientais da área explorada. Assim, recuperar uma área degradada pela atividade minerária constitui-se na obrigação das empresas mineradoras, a partir da elaboração do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (Prad) que prevê medidas de revegetação, com vistas a estabelecer ou restabelecer a cobertura vegetal.

Desse modo, na adoção dessas medidas, muitas vezes não se observa coerência entre as medidas praticadas e aquelas preconizadas no Prad (ALMEIDA; SÁNCHEZ, 2005), visando ao rápido recobrimento vegetal, ao controle da erosão e ao cumprimento da legislação (DIAS; ASSIS, 2011) ou mesmo para minimizar o impacto visual (MECHI; SANCHES, 2010). Entretanto, dependendo das características da área que se pretende recuperar, a vegetação, sozinha, não consegue se estabelecer, havendo necessidade de outros elementos para que isso possa ocorrer.

Notadamente, em taludes de pilha de estéril de áreas mineradas, a recuperação por meio da revegetação sugere grandes dificuldades em razão da heterogeneidade do material depositado na pilha e ao elevado índices de vazios. Assim, no processo de recuperação desses taludes, o uso da adubação verde utilizando espécies leguminosas com base na sua periodicidade e na racionalização de sua aplicação, a longo e médio prazo, pode trazer imensuráveis benefícios ao solo (RIBEIRO, 2005).

Ressalta-se que em projetos de recuperação, se faz necessário conhecer os métodos e técnicas a serem aplicados com vistas a criar condições necessárias para a recuperação desses taludes. Desse modo, considera-se que cenários de degradação decorrentes da atividade minerária possa ser recuperado utilizando técnicas diferenciadas das usualmente praticadas e preconizadas nos Prads.

Assim, a literatura nos traz alternativas técnicas de recuperação em diferentes contextos de degradação, passíveis de serem aplicadas em áreas degradadas pós-mineração. Nesta perspectiva encontra-se a bioengenharia de solos, contextualizada como um subdomínio da engenharia civil, com os mesmos objetivos e fundamentos técnicos, aliados à percepção ecológica por meio de soluções construtivas criativas na medida em que faz uso de materiais vivos.

Considerada como uma tecnologia, a bioengenharia de solos emprega o uso de materiais naturais, vivos ou mortos, isolados ou conjugados com materiais inertes, que está atenta aos processos naturais do meio, na proposição de ações estabilizadoras e, na medida do possível, regeneradoras no alcance do equilíbrio físico, biológico e estético.

Nessa perspectiva, o objetivo desta pesquisa foi a concepção e confecção de modelos estruturais, apoiados nos princípios da bioengenharia de solos, para reter solo e utilizar técnicas de adubação verde, fonte de matéria orgânica, como primeira etapa no processo para recuperar áreas degradadas de mineração. Assim, adotou-se o talude da pilha de estéril localizado no Complexo Minerquímico da Vale Fertilizantes, Unidade Cajati, estado de São Paulo.

Resultante da exploração de rocha fosfática (apatita), o talude está caracterizado por possuir diferentes granulometrias e elevada declividade que podem influenciar no desenvolvimento ou recolonização da vegetação nativa por meio de processos naturais de sucessão, uma vez que os finos tendem a passar pelos vazios promovidos pelo embricamento de blocos de maiores dimensões na ocasião das precipitações, dificultando a retenção de umidade.

Nos complexos minerários onde os depósitos de estéreis possuem granulometrias próximas as texturas encontradas em processos pedogenéticos, a inserção da vegetação torna-se facilitada uma vez que essas granulometrias tendem a uma condição mais próxima da natural (RIBEIRO et al., 2014). Do contrário, os depósitos de bota-fora com matacões e poucos finos tendem a não fixar uma vegetação vicejante, visto que a alta permeabilidade impediria a retenção de umidade local dificultando a recolonização por espécies vegetais.

O tema recuperação de áreas degradadas pela mineração utilizando técnicas de bioengenharia de solos ainda é incipiente. A ausência de estudos mais consistentes sobre o uso dessas técnicas para recuperar talude de pilha de estéril consiste de um desafio para o meio científico.

1.1 Hipótese da pesquisa

Com base nos fundamentos apresentados, esta pesquisa delineou a hipótese de que modelos estruturais de bioengenharia de solos tem aptidão para reter o solo e auxiliar a posterior revegetação de taludes de pilha de estéril na mineração a céu aberto.

Esta hipótese parte do entendimento de que a bioengenharia de solos, inicialmente, teve seu uso para controlar enchentes após chuvas torrenciais. Hoje, com ampla aplicabilidade em diversos contextos de degradação, resultantes de ações naturais ou humanas, pode ser uma alternativa promissora para solucionar casos de degradação decorrentes da atividade minerária.

1.2 Estrutura da pesquisa

O **Capítulo Primeiro**, por meio da **Introdução**, buscou esclarecer o tema desta pesquisa sob o ponto de vista de sua abordagem e a hipótese que a motivou.

Os **Objetivos**, subdivididos em geral e específicos que nortearam esta pesquisa estão no **Capítulo Segundo**.

No **Terceiro Capítulo** está o **Referencial Teórico**, relacionado aos temas que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa.

No **Quarto Capítulo** estão **Materiais e Métodos** que mostram a natureza e a descrição do método adotado.

Os **Resultados** obtidos e as **Discussões** estão descritos no **Quinto Capítulo** de forma organizada referente ao desenvolvimento e avaliação dos modelos estruturais de bioengenharia de solos.

O **Sexto** e último **Capítulo** tece as **Conclusões** desta pesquisa no que tange a hipótese e aos objetivos pretendidos.

Na sequência estão as **Referências** que embasaram a realização desta pesquisa e o **Apêndice A** ilustrando algumas técnicas de bioengenharia de solos.

2 OBJETIVOS

De acordo com o contexto apresentado, os objetivos foram subdivididos em geral e específicos de modo a direcionar o desenvolvimento desta pesquisa.

2.1 Objetivo geral

Concepção e avaliação de modelos estruturais de bioengenharia de solos para reter o solo em talude de pilha de estéril na mineração a céu aberto.

2.1.1 Objetivos específicos

- a) dimensionar, confeccionar e instalar modelos estruturais de bioengenharia de solos em talude de pilha de estéril; e
- b) avaliar os modelos estruturais de bioengenharia de solos utilizando índice de desempenho e indicadores ambientais do solo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Mineração: degradação e recuperação

O solo é um dos recursos naturais de equilíbrio mais instável de que se tem conhecimento. Sua desestabilização tem início a partir das alterações físicas, químicas e biológicas a partir da remoção da cobertura vegetal protetora do solo e das mudanças do uso do solo ocasionadas por atividades como agropecuária, obras de infraestrutura e mineração.

Na mineração, o solo é entendido como o detrito que cobre as rochas que é retirado para se acessar o mineral que se encontra no subsolo (GOEDERT; CORRÊA, 2004). Assim, faz-se necessária a remoção da camada superior denominada de estéril, cujo descarte é sob a forma de pilhas de bota-fora próximas a área da mina (FORNASARI FILHO et al., 1981; PILLON; MIURA; ALBA, 2010).

Todo esse processo causa alterações na paisagem, modificando seu equilíbrio e resultando no desenvolvimento de novos ecossistemas (SILVA et al., 2010; DONTALA; REDDY; VADDE, 2015; DE QUADROS et al., 2016). Essas alterações, de origem humana, são vistas como um impacto negativo sobre o meio ambiente, tendo a degradação ambiental como resultado (SÁNCHEZ, 2008).

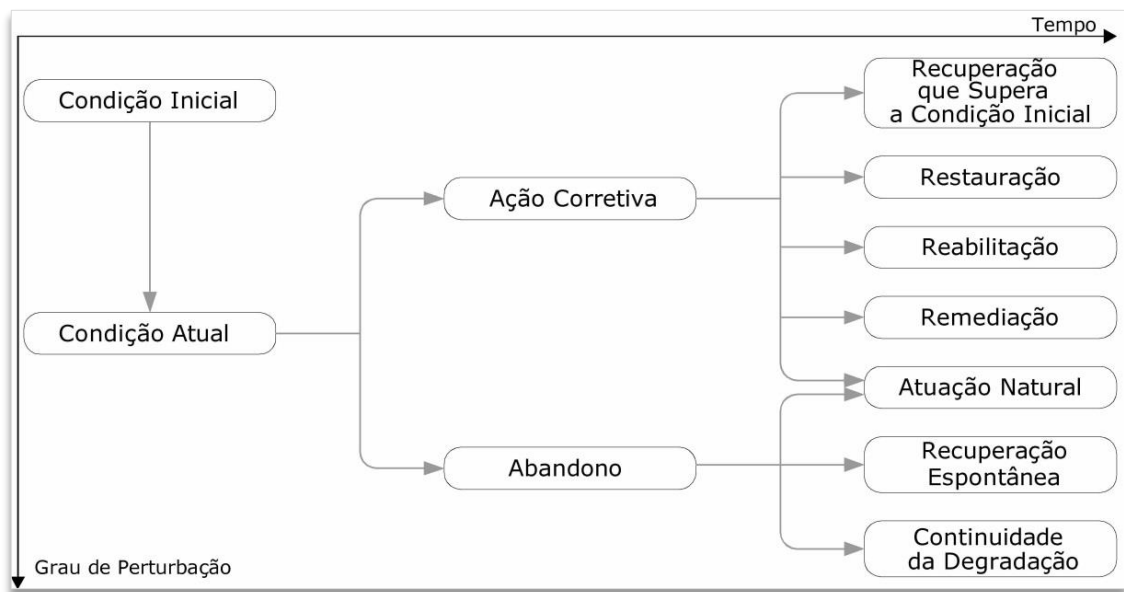
A esses impactos negativos atribui-se a supressão da vegetação onde ocorrem situações em que o solo superficial de maior fertilidade é removido e o solo remanescente fica exposto aos processos erosivos, resultando no carreamento de sedimentos para os corpos d'água do entorno, acarretando outros impactos danosos ao equilíbrio dos ecossistemas. Sobre ao meio antrópico, além do desconforto ambiental, tem-se o risco à saúde humana e alterações da paisagem (MECHI; SANCHES, 2010).

Entretanto, os impactos negativos mais significativos remanescem da etapa de pós-mineração favorecendo a ocupação desordenada, as cavas remanescentes; parcialmente ou totalmente inundadas, sujeitas a deposição de resíduos de forma inadequada, dando origem à contaminação do solo e das águas superficiais ou subterrâneas e como consequência, expõe risco a saúde da população do entorno (MECHI; SANCHES, 2010).

Ainda segundo os autores, no estado de São Paulo, grande parte dos municípios possui algum tipo de atividade mineradora em operação, onde o problema está na ausência de planejamento por parte dos poderes públicos e na falta de investimentos por parte dos empreendedores no planejamento das operações de lavra, beneficiamento e recuperação ambiental.

De acordo com Sánchez (2008), o conhecimento da condição de perturbação do meio e a escala temporal indicarão para uma área que passa pelo estado de degradação que demandará em grande parte das vezes de uma intervenção planejada para que se inicie o processo de recuperação. Na Figura 1, enquanto o eixo vertical representa de forma qualitativa o grau de perturbação do meio, o eixo horizontal mostra a escala temporal da recuperação da área degradada.

Figura 1 – Diagrama esquemático dos objetivos da recuperação de áreas degradadas.



Fonte: Modificada de Sánchez (2008).

A recuperação da área degradada consiste de uma obrigatoriedade por parte do empreendedor, disciplinada pela Constituição Federal de 1988, artigo 225, § 2, que determina de forma específica a recuperação das áreas degradadas pela extração mineral.

Em atendimento a esse dispositivo constitucional, foi instituído o Decreto Federal nº 97.632, de 10 de abril de 1989. Conforme § único e artigo 3º desse decreto, a recuperação “[...] deverá ter por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano pré-estabelecido para o uso do solo, visando à obtenção de uma estabilidade do meio ambiente” (BRASIL, 1989).

O decreto também exige que todos os empreendimentos do setor mineral em operação no país, apresentem um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (Prad) que deve prever medidas de revegetação com vistas a estabelecer ou restabelecer a cobertura vegetal. Porém, muitas vezes não se observa coerência entre as medidas praticadas e aquelas preconizadas nesse plano (MECHI; SANCHES, 2010; ALMEIDA; SÁNCHEZ, 2005) ou mesmo realizada

de maneira a atenuar a significância dos impactos causados e gerar um ganho ambiental representativo para a área e adjacências.

Assim, na recuperação de áreas degradadas pela atividade minerária, revegetar é uma medida consagrada e praticada em minas de médio e grande porte, localizadas principalmente em zonas rurais que podem diferir das minas situadas próximas aos centros urbanos, exigindo um planejamento mais bem detalhado e integrado em função da demanda do uso do solo da cidade (BITAR, 1997).

Em países como China e Índia, a revegetação é uma prática muito utilizada principalmente para recuperar áreas utilizadas na exploração do carvão a partir do plantio de diferentes espécies, após preparo do solo para receber as plantas (MUKHOPADHYAY; MAITI; MASTO, 2013; SRIVASTAVA; RAM; MASTO, 2014; ZHAO et al.; 2013; ZHANG, et al.; 2015).

As áreas degradadas pela exploração do carvão são pobres em matéria orgânica, nutrientes para o crescimento das plantas e atividade microbiana, além de favorecer a erosão e a poluição da água e do ar (SRIVASTAVA; RAM; MASTO, 2014). Essas áreas ocasionam grandes perturbações antropogênicas, conduzindo de forma drástica a degradação do solo, reduzindo a biomassa, riqueza e diversidade microbiana do solo (STUMPF, PAULETTO; PINTO, 2016; DE QUADROS et al., 2016; AGUS et al., 2016).

O estabelecimento da cobertura vegetal por meio de práticas de revegetação visa atenuar os efeitos da atividade de exploração do carvão sobre a paisagem, além da questão da reconstrução do solo, pois, a maior parte das áreas possuem solos com propriedades físicas e químicas desfavoráveis (ZHAO et al.; 2013). A revegetação dessas áreas melhora as características físico-químicas da área, a atividade fotossintética da área foliar, reduz a erosão do solo e o escoamento da água superficial, sendo uma chave para a restauração de ecossistemas (SRIVASTAVA; RAM; MASTO, 2014; ZHANG, et al.; 2015). Além disso, pode atuar como um componente fitoestabilizador, combinando espécies tolerantes a solos extremamente ácidos de áreas mineradas (YANG, et al., 2016).

Assim, recuperar uma área pós-mineração consiste de grandes desafios, pois situações extremamente adversas encontradas nos substratos ou solos da atividade minerária podem afetar o desenvolvimento ou recolonização da vegetação nativa por meio de processos naturais de sucessão, havendo a necessidade da correção desses fatores limitantes na recuperação da área degradada.

Essa correção pode ser realizada com a técnica de adubação verde, prática agrícola milenar que, com base na sua periodicidade e na racionalização de sua aplicação, a longo e

médio prazo, pode trazer imensuráveis benefícios ao solo (RIBEIRO, 2005). Esses benefícios estão relacionados ao uso de diferentes espécies de plantas, preferencialmente as leguminosas, que apresentam caráter multifuncional, uma vez que associa aspectos da conservação do solo e manutenção da fertilidade como consequência da adubação verde (NOGUEIRA et al, 2012).

A adubação verde ou adubos verdes destaca-se como uma alternativa na busca pela sustentabilidade dos solos agrícolas com a adição de matéria orgânica no solo. O nível de matéria orgânica do solo é um dos principais fatores que condicionam a produtividade do solo e o equilíbrio do sistema. Proveniente de resíduos tanto de animais quanto vegetais em diferentes estágios de decomposição, melhora as condições físicas e químicas do solo e adiciona importantes propriedades físico-químicas como a capacidade de troca de cátions (ALCÂNTARA et al., 2000; MAIA; PARRON, 2015; NASCIMENTO et al., 2003; RONQUIM, 2010).

A perda da matéria orgânica do solo resulta na perda da fertilidade do solo e essa perda acarreta sérios problemas na estrutura do solo, na disponibilidade de água e na atividade biológica. Além disso, prejudica o suprimento do enxofre, fósforo e nitrogênio às plantas, consequentemente a produtividade do sistema. Esse processo se torna mais intenso em áreas de alta declividade, principalmente onde há grandes movimentações de terra como barragens, rodovias, mineração etc., com a remoção do horizonte superficial (FRANCO et al., 1992).

Desse modo, os adubos verdes, além de fixar nitrogênio direto da atmosfera, carbono e maximizar a ciclagem de nutrientes, recuperam solos de baixa fertilidade, atenuam a variação térmica do solo, favorecem a atividade biológica do solo. Eles apresentam elevado potencial de produção de fitomassa e maior ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares tolerantes à acidez e à baixa disponibilidade de nutrientes, contribuem com a biodisponibilidade de nutrientes e promovem a estruturação de agregados do solo, dando início ao processo de sucessão natural (ALCÂNTARA et al., 2000; BOLDT-BURISCH et al., 2015; CALDEIRA et al., 2003; CHAER, et al., 2011; COLODETE; DOBBSS; RAMOS, 2014; NOGUEIRA et al., 2012; NUSSBAUMER; COLE; OFFLER, 2016; RASHID et al., 2016; RIBEIRO, 2005; VERGANI; GRAF, 2016).

Além disso, a adubação verde tem aptidão para realizar a fixação biológica de nitrogênio (FBN) de forma eficiente e assim, reduzir a necessidade de adubação com o nitrogênio sintético. A fixação de nitrogênio pode ser feita por bactérias, algumas de vida livre e outras que vivem em associações simbióticas nas raízes das plantas. Nessa associação simbiótica, as bactérias fornecem a quantidade necessária de nitrogênio enquanto as plantas agem como fonte de energia, sendo esta uma interação fundamental para o desenvolvimento e

manutenção da comunidade vegetal em áreas degradadas (PERIN et al., 2004; BRANCALION; GANDOLFI; RODRIGUES, 2009).

Ao utilizar adubação verde, o teor de matéria orgânica no ambiente aumenta propiciando o surgimento de organismos da fauna edáfica que utilizam a matéria orgânica como fonte de alimento. Assim, o uso de bioindicadores ou indicadores microbiológicos nas avaliações da qualidade do solo, respondem diretamente pela atividade do solo no processo de gênese, decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, formação da matéria orgânica e biorremediação de áreas contaminadas por poluentes e agrotóxicos. Além disso, o uso de elementos vivos do ambiente (os bioindicadores), como elementos chave, são uma ferramenta para avaliar as transformações do meio e seus efeitos (CORREIA, 2002; MENDES; SOUSA; REIS JUNIOR, 2017).

A fauna edáfica ou fauna o solo é um bioindicador que contribui para a regulação da biodiversidade nos ecossistemas, podendo destacar dois processos ecossistêmicos influenciados pela fauna que é a bioturbação e a decomposição (BROWN et al., 2015). Ela exerce uma importante função na avaliação da qualidade do solo, principalmente na agregação do solo de áreas degradadas pela atividade agrícola, como também pela atividade minerária.

Assim, entende-se que uma recuperação bem sucedida não depende somente dos métodos de lavra ou das características da área a ser recuperada. A escolha correta das espécies, as fontes de propágulos, polinizadores e dispersores de sementes e seus efeitos benéficos sobre o solo é que irão definir sua capacidade de melhorar o solo da área que está sendo recuperada (CHAER, et al., 2011; MUKHOPADHYAY; MAITI; MASTO, 2013).

Seja qual for a causa da degradação, o processo de recuperação envolve a recomposição do ambiente a partir do conhecimento das características do substrato da área pós-mineração quanto aos atributos físicos, químicos e biológicos. A restauração do ambiente original se inicia melhorando a qualidade do substrato com a recomposição da cobertura vegetal, com vistas a auxiliar a natureza no processo de recuperação que é complexo e oneroso e demanda um longo tempo (GOEDERT; CORRÊA, 2004).

A não percepção da importância que um planejamento estratégico poder trazer às empresas de mineração após finalização das atividades de exploração ou preparação dos planos de recuperação ou de fechamento após definido o plano de lavra, fica limitada à revegetação. Desse modo, é possível adotar medidas preventivas e mitigatórias dos impactos durante a fase de operação além de medidas de recuperação durante a atividade produtiva (NERI; SÁNCHEZ, 2012).

Ainda assim, a natureza e a extensão do dano ambiental a ser reparado, causado pela atividade minerária, dependem de diversos fatores tais como: o tipo de mineral extraído, processos tecnológicos de extração do minério, beneficiamento do minério, entre outros (EGGERT, 1994). No entanto, a relação entre a área degradada pela atividade minerária e a sua recuperação está no princípio básico de seu reuso, bem como da preservação do uso futuro da área (LEINFELDER; IRAMINA; ESTON, 2015) e não somente pelo que determina a lei.

Dessa forma, a elaboração do Prad, bem como sua prática, deve ser do mesmo modo responsável e seus resultados avaliados de forma periódica. O uso de indicadores e a comparação entre o que se espera de uma recuperação e o alcançado são ferramentas importantes para avaliar os resultados da área que está em processo de recuperação ou que já está recuperada, tendo como requisito básico para seu sucesso o conhecimento, a organização, os recursos humanos e financeiros (SÁNCHEZ, 2010).

A recuperação ambiental de uma área indica o emprego de técnicas de manejo a fim de tornar o ambiente degradado em condições para um novo uso produtivo e sustentável. Assim, como variáveis na recuperação ambiental, tem-se a restauração, a reabilitação e a remediação.

A restauração é entendida como o retorno das condições ao seu estado original, anterior à degradação, é o ato de restaurar (BRADSHAW, 1996; SÁNCHEZ, 2008); a reabilitação seria uma nova forma de uso adaptada ao ambiente reabilitado com características diferentes, anterior à degradação (BRADSHAW, 1996; SÁNCHEZ, 2008), esperando o retorno ao estado original, não significando voltar ao estado original como se estivesse sido restaurado (BRADSHAW, 1996) e a remediação é a aplicação de técnicas ou o conjunto de técnicas em área contaminada com vistas à remoção ou atenuação do contaminante que significa o ato de reparar (BRADSHAW, 1996).

Ainda sobre a remediação, cabe ressaltar que a atenuação natural é uma forma de remediação que ocorre por processos naturais, a exemplo da biodegradação de moléculas orgânicas, onde não há intervenção direta na área contaminada. A atenuação natural é uma forma de regeneração autorizada somente em áreas contaminadas, acompanhadas de um programa de monitoramento (SÁNCHEZ, 2008).

Comumente, as práticas de recuperação em áreas degradadas pela atividade minerária se restringem a aplicação de uma fina camada de solo, visando tão somente o desenvolvimento de espécies herbáceas rasteiras, não propiciando maiores ganhos socioambientais em relação às áreas reabilitadas com cobertura florestal e seus usos diretos e indiretos (SKALSKI JUNIOR; 2010). De modo geral, é importante considerar o suporte da pesquisa com vistas a validar as atividades de campo no que tange à disposição dos materiais,

ao desenvolvimento da vegetação, a recuperação do equilíbrio físico-químico e biológico, à proteção do ambiente, a adequação de possíveis passivos ambientais e ao destino a ser dado às áreas recuperadas (PILLON; MIURA; ALBA, 2010).

Quando se trata de taludes de pilhas de estéril, com elevada declividade, exposição de rochas de tamanhos variados, ausência de finos e baixos teores de matéria orgânica, o processo de recuperação natural por meio da sucessão natural ou por meio de técnicas de plantio, pode não acontecer, exigindo medidas mais estruturalmente naturais visando o desenvolvimento da cobertura vegetal.

Nesse universo, a bioengenharia de solos está contextualizada como uma alternativa tecnológica sustentável que adota princípios mais naturais com o uso de materiais locais combinando o uso de elementos naturais (vegetação), vivos ou mortos, formando sistemas vivos. É uma tecnologia que se destaca por apresentar melhor custo benefício e resultados positivos quanto aos aspectos ecológicos, econômicos e paisagísticos que se mostram viáveis na recuperação de áreas degradadas, diminuindo os impactos ambientais.

A bioengenharia de solos é uma releitura de antigas técnicas, utilizadas em um momento em que o desenvolvimento científico era inexistente e já se faziam presentes às necessidades criadas pelo homem e para o homem de melhor apropriação do meio ambiente e controle de processos degradantes do meio ambiente, de acordo com os materiais e as tecnologias existentes na época.

3.2 Bioengenharia de solos

3.2.1 Histórico e definição

Diversas referências nominais são atribuídas para o termo bioengenharia de solos, tais como: “Engenharia dos Sistemas Ecológicos”, “Engenharia da Paisagem”, “Engenharia Ecológica”, “Engenharia Biofísica”, “Engenharia Natural”, “Engenharia Biotécnica”; “Engenharia Verde” e “Engenharia Naturalística”.

Para esta pesquisa foi adotado o termo bioengenharia de solos. Sua origem remonta aos antigos povos da Ásia e Europa para reparar margens de rios e diques e data de mais de 2000 a.C. (Figura 2). No século XVI, as técnicas de bioengenharia de solos eram usadas e codificadas por toda Europa, desde os Alpes ao Mar Báltico e a oeste nas Ilhas Britânicas. Uma das primeiras fontes de relatos escritos sobre a utilização dessas técnicas foi uma publicação de Woltmann, datada de 1791 (STILES, 1991 apud LEWIS, 2000).

Na China, principalmente, as técnicas de bioengenharia de solos também tinham seu uso para reparar margens fluviais e diques utilizando plantas vivas na formação de feixes vivos para controlar enchentes após chuvas torrenciais (LEWIS, 2000, STOKES et al., 2010) conforme ilustra a Figura 3.

Técnicas similares voltaram a ter sua utilização pelos chineses no início do século XX (Figura 4), sendo utilizada pelos europeus, especialmente pela Alemanha por mais de 150 anos (FINNEY, 1993 apud LEWIS, 2000), enquanto que nos Estados Unidos seu emprego data dos anos 20 e 30 (FRANTI, 2013). Hoje, a bioengenharia de solos está consolidada na Áustria, Alemanha, Suíça, Norte da Itália, Espanha e Portugal, América do Norte e China, enquanto que no Brasil, pesquisas acerca de sua aplicação são recentes. Isso se justifica pela ausência de um histórico de pesquisas, a exemplo dos países europeus e Estados Unidos que receberam incentivos governamentais por meio da criação de instituições para investigações e aplicações da técnica ao longo do século XIX e XX.

Figura 2 – Ramos de vegetação para reparar margens de rio e diques (China 28 a.C.).



Fonte: Finney (1993 apud LEWIS, 2000, p. 2).

Figura 3 – Ramos de vegetação para reparar margem de rio e diques (China séc. XX).



Fonte: Finney (1993 apud LEWIS, 2000, p. 3).

Figura 4 – Corte e colheita de estacas de vegetação (Europa séc. XX).



Fonte: Finney (1993 apud LEWIS, 2000, p. 3).

A bioengenharia de solos é um subdomínio da engenharia civil com os mesmos objetivos e fundamentos técnicos, associado à percepção ecológica por meio de soluções construtivas criativas, uma vez que faz uso de materiais vivos (SCHIECHTL, 1980).

Como tecnologia, a bioengenharia de solos utiliza práticas da engenharia, associadas a princípios ecológicos integrados, enquanto que a ecoengenharia é uma estratégia ecológica e econômica, de longo prazo, na gestão de áreas relacionadas às alterações naturais ou causadas pelo homem. São áreas inseridas na engenharia ecológica, definidas como a concepção de ecossistemas sustentáveis que integram a sociedade humana com o ambiente natural, com benefício para ambos (STOKES et al.; 2014).

As técnicas ou métodos de estabilização de solos e sedimentos inseridos na bioengenharia de solos priorizam as conexões biológicas e as interações ambientais resultantes, permitindo o uso de matéria-prima vegetal que existe no entorno com eficiência técnica comprovada (HOLANDA; ROCHA; OLIVEIRA, 2008). Tem como premissa minimizar o grau de artificialidade em suas intervenções (FERNANDES; FREITAS, 2011), privilegiando a vegetação como material estrutural, além de utilizar materiais inertes naturais como pedras e madeira, este último, por meio de sua decomposição, irá criar condições para que a vegetação se reestabeleça na área degradada (MOSCATELLI et al., 2009).

De modo geral, a bioengenharia de solos preconiza o uso de materiais naturais vivos, isolados ou combinados com materiais inertes formando sistemas vivos, onde as espécies

vegetais utilizadas são arrumadas em modelos construtivos diversos, combinando função estrutural com função ecológica para recuperar ambientes em contextos distintos de degradação (EVETTE et al., 2009; FERNANDES; FREITAS, 2011; GRAY; SOTIR, 1996; SUTILI, 2007).

3.2.2 Aplicações da bioengenharia de solos

O uso da vegetação tem sido praticado por um longo tempo para reduzir os impactos decorrentes da ação da água sobre as margens fluviais, áreas costeiras e dunas de areia (EVETTE et al., 2009). Por meio de seu sistema radicular, a vegetação pode aumentar a coesão do solo em áreas de montanhas erodidas pela ação da água, como também melhorar a estabilidade de taludes, influenciando no processo hidrológico que determina as condições de estabilidade e modificar diretamente as propriedades mecânicas do solo (BURYLO; HUDEK; REY, 2011; CAPILLERI; MOTTA; RACITI, 2016).

Igualmente no caso da recuperação da área degradada pela atividade minerária, as medidas adotadas também se concentram no uso da vegetação. Em áreas pós-mineradas, os casos onde a erosão nas encostas indica ser uma ameaça, faz-se necessário que a cobertura vegetal se estabeleça rapidamente para prover os serviços ecossistêmicos básicos dentro do menor espaço de tempo, considerando o potencial natural da área (BAASCH; KIRMER; TISCHEW, 2012). Assim, a tarefa de se recuperar uma área degradada deve ser incorporada às rotinas operacionais e administrativas de uma mina (NERI; SÁNCHEZ, 2012).

Ao longo do tempo, as diversas soluções tem-se apresentado com resultados positivos, fazendo com que essas soluções sejam disseminadas, aplicadas ou adaptadas a cada situação, configurando-se em boas práticas (NERI; SÁNCHEZ, 2012). Nesse contexto, o uso de técnicas da bioengenharia de solos pode ser incorporado às boas práticas como alternativa de recuperação de áreas degradadas pela atividade minerária.

Amplamente difundidas no exterior, principalmente pelos europeus, as técnicas de bioengenharia de solos são reconhecidas como importante ferramenta para estabilizar e/ou recompor ambientes em diversos contextos de degradação como encostas e ambientes fluviais, com ganhos ecológicos, estéticos e econômicos, desde que corretamente empregadas (EUBANKS; MEADOWS, [2002]). Essas técnicas são vistas como alternativas aos métodos da engenharia tradicional e utilizadas para estabilizar margens de rios, principalmente quando instáveis, necessitando de medidas de alta resistência que vão além da hidrossemeadura (LI; EDDLEMAN, 2002).

No geral, as técnicas de bioengenharia de solos são aplicadas para proteger, restaurar, controlar ou estabilizar situações envolvendo desde a estabilização de taludes de corte e aterro até margens de rios, porém, não possuem aptidão para todas as situações, necessitando, por vezes, da engenharia convencional, isolada ou conjugada com técnicas da bioengenharia de solos.

Cabe ressaltar que nas obras de bioengenharia de solos, as técnicas utilizadas, vão desde intervenções simples como: *live fascines* (Figura 5A) e *live staking* (Figura 5B), até as intervenções mais complexas como *live cribwal* (Figura 5C) e *live slope grating* (Figura 5D) (DURLO; SUTILI, 2005; EUBANKS; MEADOWS, [2002]; FERNANDES; FREITAS, 2011; GRAY; SOTIR, 1996; GREENWAY; RELLA; MILLER, 2012).

Figura 5 – Exemplos de intervenções com técnicas de bioengenharia de solos.



Fonte: Fernandes; Freitas (2011, p. 72, 74); Souza (2017, slides 49, 50).

Legenda: (A) *live fascines*; (B) *live staking*; (C) *live cribwal*; (D) *live slope grating*.

As técnicas de bioengenharia de solos possuem aplicabilidade na estabilização de margens fluviais e taludes naturais ou construídos (DURLO; SUTILI, 2005) comprometidas por alguma ação, seja natural ou antrópica. No entanto, quando se trata de recuperar uma área degradada pela atividade minerária, depara-se com a ausência de dados compilados e as

restrições de áreas estudadas não permitem sua ampla aplicação considerando a gama de contextos de degradação de áreas mineradas.

Muito praticadas tanto no Continente Asiático quanto na Europa, as técnicas de bioengenharia de solos têm sido reconhecidas como importante ferramenta para estabilizar e/ou recompor encostas, margens fluviais, córregos, barragens e áreas degradadas em geral.

No Nepal, na Hariwan Village, barragens vegetativas, empregando o uso estacas de bambu, pedras e areia (Figura 6) foram construídas para estabilizar margem de rio intermitente e minimizar o risco de inundação no pé da cordilheira Siwaliks (DHITAL; TANG, 2015). As técnicas conhecidas por *live stakes*, *live fascines*, *brush layer*, *vegetated geo-grids* e *geo-gabions* foram utilizadas em Shangai, na China (Figura 7) para restaurar rios canalizados em decorrência da rápida expansão urbana, ameaçando a integridade dos ecossistemas ciliares semi-natural, associando medidas de estabilização em áreas com inclinação ou perda de solo (LI; ZHANG; ZHANG, 2006).

Figura 6 – Margem de rio estabilizada com barragens vegetativas.



Fonte: Dhital e Tang (2015, p. 460).

Figura 7 – Combinação de técnicas para restaurar taludes marginais.



Fonte: Li, Zhang e Zhang (2006, p. 310).

Também na China, as técnicas conhecidas por *branchpacking*, *brushlayers*, *live cribwalls* e *bender fences*, foram combinadas e utilizadas para reparar cicatrizes de deslizamentos de terra (Figura 8) decorrente do desmatamento, más práticas agrícolas e exploração dos recursos naturais em encostas íngremes. Tais medidas foram adotadas para minimizar a possibilidade de deslizamentos mais significativos e possíveis risco de segurança pública, bem como para evitar medidas de recuperação mais onerosas no futuro (STOKES et al., 2010).

Figura 8 – Combinação de técnicas para reparar cicatrizes de deslizamento de terra.



Fonte: Stokes et al. (2010, p. 251).

A bioengenharia de solos também teve seu uso em uma bacia hidrográfica localizada nos Alpes do sul da França onde o clima no mediterrâneo caracteriza-se por verões quentes e intensas chuvas, produzindo grande quantidade de sedimentos na saída das bacias, ocasionando problemas significativos à sua jusante, tanto socioeconômicos quanto ecológicos. A combinação de *brush layers* com *brush mats* sobre *wooden sills*, no conjunto de ravinas erodidas, teve como objetivo avaliar a capacidade do desenvolvimento vegetativo e a retenção desses sedimentos (Figuras 9A e 9B) (REY; BURYLO, 2014; STOKES, et al., 2014).

No extremo sul da Itália, na ilha de Lampedusa, foi realizado um dos primeiros trabalhos de restauração combinando técnicas da bioengenharia de solos e biologia da conservação para restauração, com vistas a reduzir o fluxo de água superficial e conter a erosão de uma encosta íngreme sobre a praia (LA MANTIA et al.; 2012). As Figuras 10 e 11 mostram, respectivamente, alguns detalhes das técnicas de bioengenharia de solos e o aspecto geral da área antes de após dois anos das intervenções.

Figura 9 – Combinação de técnicas nas ravinas erodidas no Sul da França.



Fonte: Stokes, et al. (2014, p. 11).

Légenda: (A) ravinas erodidas pela água; (B) *brush layers* com *brush mats* sobre *wooden sills*.

Figura 10 – Detalhes das diferentes técnicas utilizadas no extremo sul da Itália.

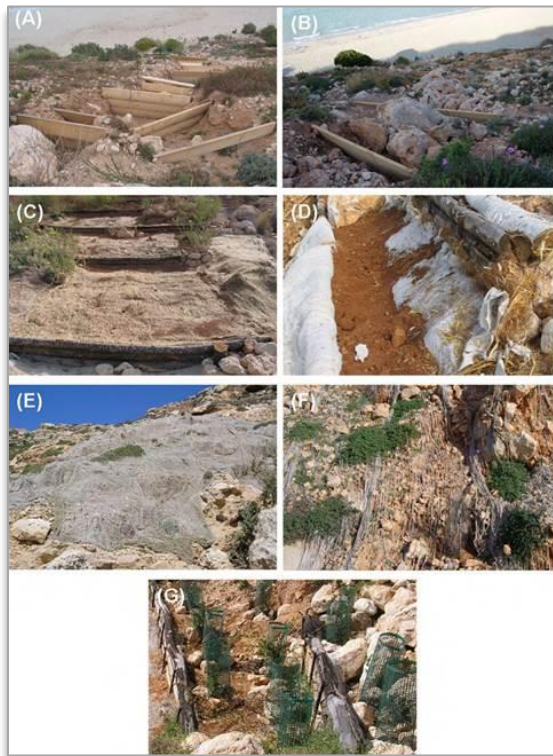
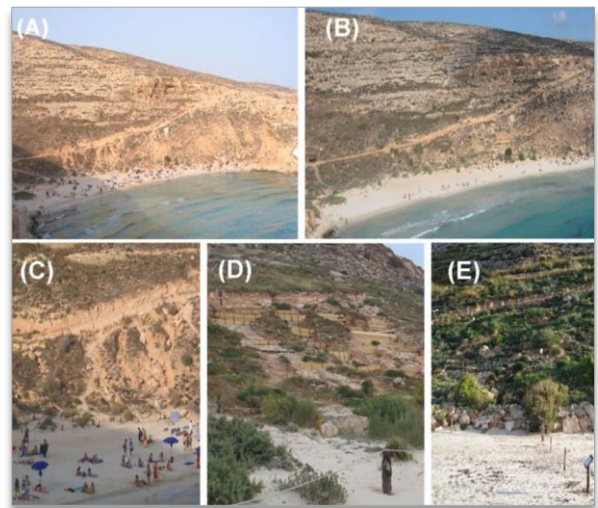


Figura 11 – Aspecto geral da área antes e após intervenções.



Fonte: La Mantia et al. (2012, p. 299-300).

Estes são apenas alguns exemplos da empregabilidade de técnicas ou combinação de técnicas da bioengenharia de solos como medidas alternativas da engenharia tradicional, utilizadas tanto na Europa como na China como meio mais natural para minimizar áreas alteradas por processos naturais ou humanos.

Esta pesquisa também mostra alguns exemplos da aplicabilidade de técnicas da bioengenharia de solos no Brasil, sozinhas ou combinadas com a engenharia tradicional para solucionar situações de degradação decorrente da ação natural ou induzida por atividade humana.

Assim, destaca-se o uso da técnica de solo grampeado e sementes para revegetar a superfície do talude Ponteio (Figura 12), localizado em Belo Horizonte, visando prevenir falhas induzidas pelas chuvas e promover uma aparência mais natural (GALVÃO, et al., 2010).

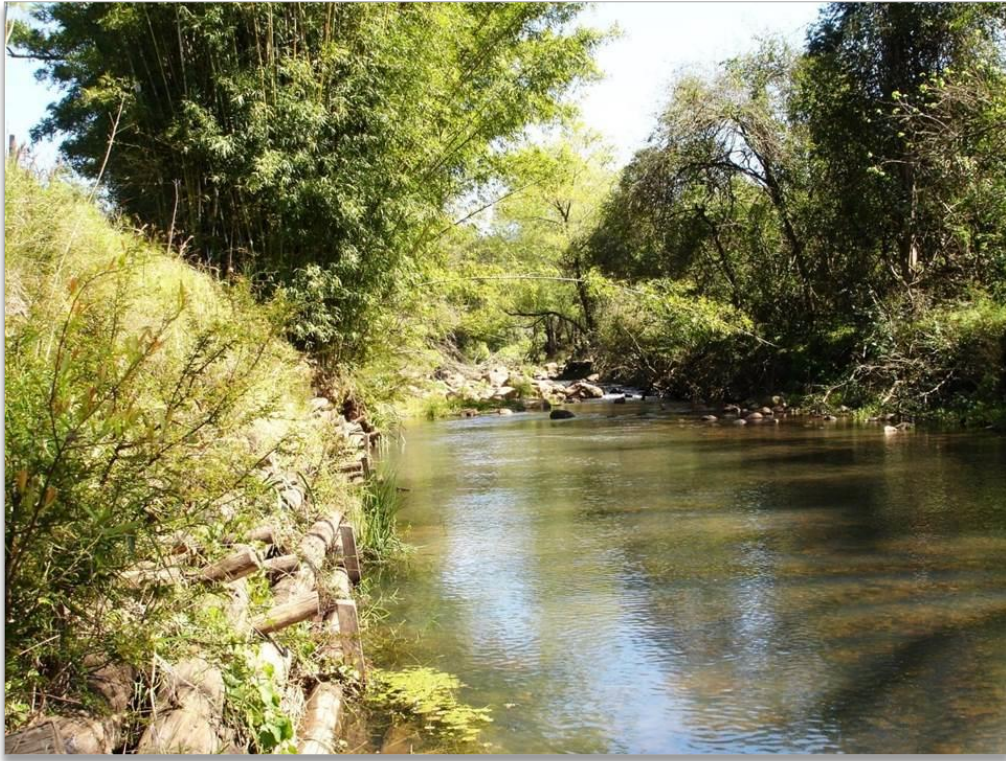
Figura 12 – Vista geral do talude Ponteio após intervenções.



Fonte: Galvão et al. (2010, p. 47).

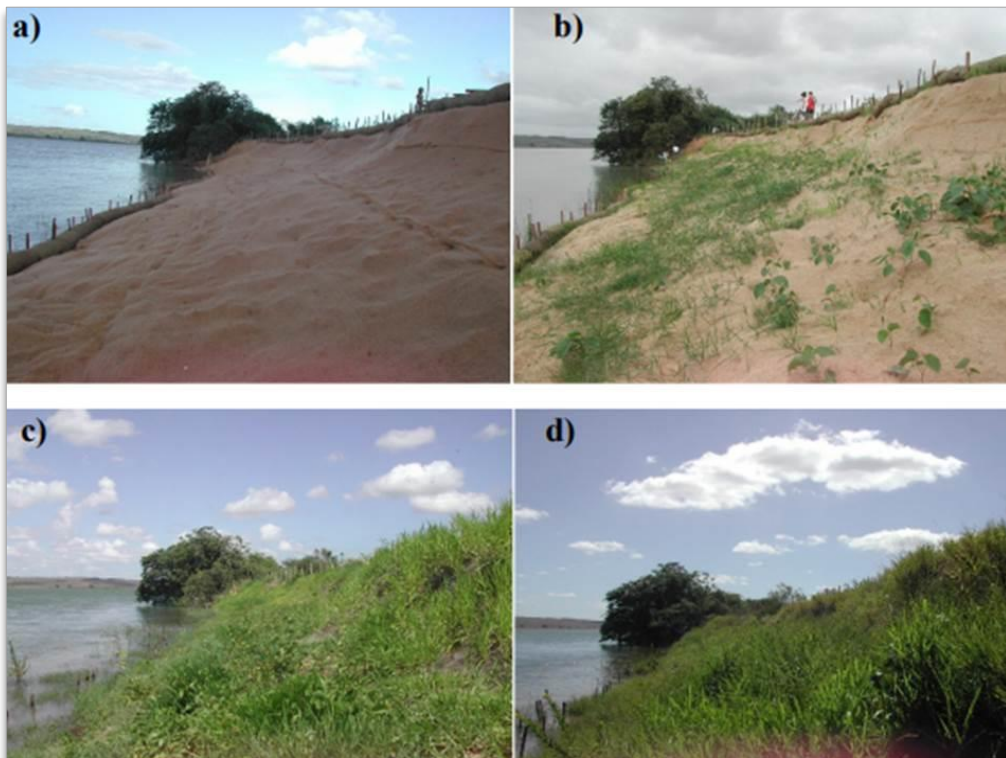
Destaca-se também a construção de uma parede, denominada de parede *Krainer* (Figura 13), utilizando material vegetativo, troncos de árvores e madeira de eucalipto para solucionar problemas de instabilidade da margem do Arroio Guarda-mor, resultantes da ação da água no município do Faxinal do Soturno (RS) (DURLO; SUTILI, 2005). Outro exemplo está na associação do tecido vegetal, retentor de sedimentos e gramíneas (Figura 14), empregadas nos taludes marginais do Baixo São Francisco (SE), com o objetivo de estabilizar os processos erosivos das margens e promover a recuperação da vegetação ciliar (GOMES, 2005; HOLANDA; ROCHA; OLIVEIRA, 2008).

Figura 13 – Parede *Krainer* instalada na margem do Arroio Guarda-mor (RS).



Fonte: imagens cedidas por F. J. Sutili.

Figura 14 – Associação de técnicas aplicadas no talude marginal do Baixo São Francisco.



Fonte: Gomes (2005, p. 93).

Legenda: (a) instalação do biotêxtil e retentores de sedimentos; (b) 30 dias após instalação; (c) 60 dias após instalação e (d) 90 dias após a instalação.

Conforme o contexto envolvendo técnicas da bioengenharia de solos, a vegetação atua como um componente estrutural por meio da arquitetura de seu sistema radicular. De acordo com Gray e Sortir (1996), as plantas possuem funções estabilizadoras, benefícios estruturais que elas proporcionam ao meio ambiente tais como: **interceptação** – as folhas e resíduos das plantas absorvem a energia da chuva impedindo o deslocamento do solo pelo impacto das gotas de chuva (efeito *splash*); **contenção**: o sistema radicular possui fisicamente as partículas de solo, enquanto as partes acima da superfície filtram os sedimentos do escoamento superficial; **retardamento**: os caules e as folhagens aumentam a rugosidade da superfície, diminuindo a velocidade do escoamento superficial; **infiltração**: as plantas e seus resíduos ajudam a manter a porosidade e a permeabilidade do solo, atrasando ou mesmo impedindo o início do escoamento superficial.

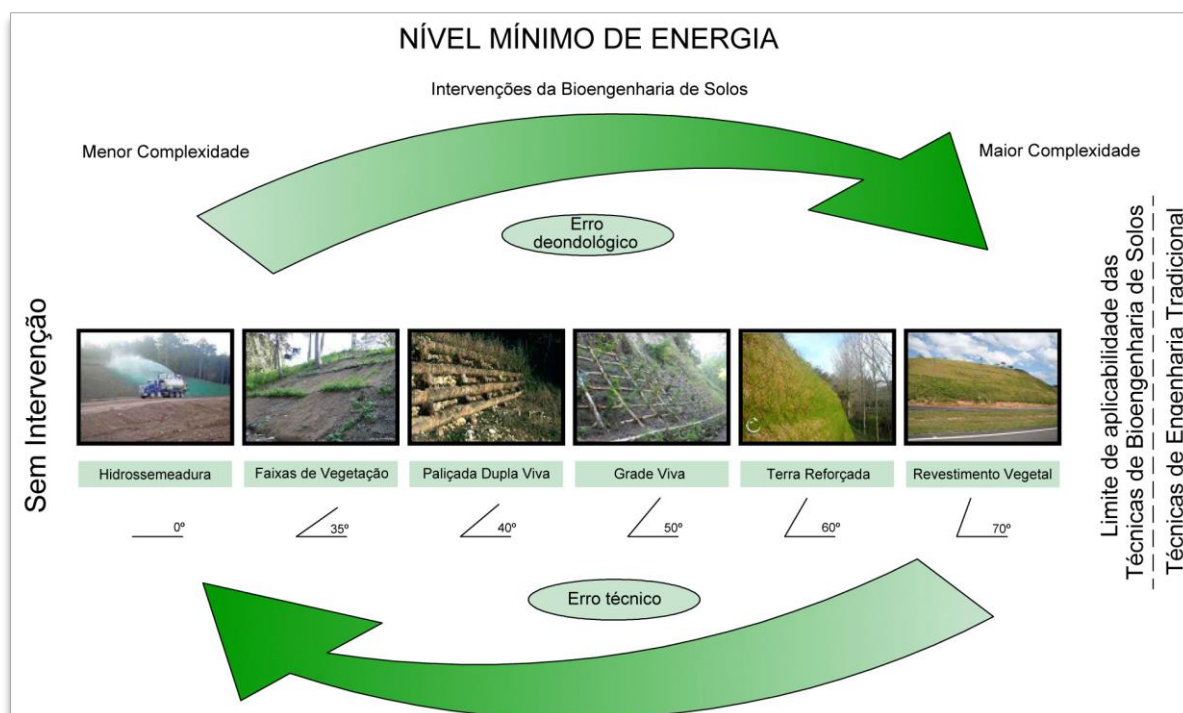
No entanto, há que se considerar que a bioengenharia de solos também possui limitações, quando empregada na estabilização de margens de rios (LI; EDDLEMAN, 2002), principalmente as relacionadas ao período de dormência das sementes, disponibilidade de espécies adaptadas às condições locais, disponibilidade de mão de obra especializada; cujo treinamento se faz necessário devido a não familiaridade com os métodos construtivos (GRAY; SOTIR, 1996; FRANTI, 2013).

Acrescenta-se ainda a essas limitações o entendimento de uma série de fatores ambientais que irão condicionar o seu emprego, como também utilizar o mínimo de tecnologia necessária para solução de um problema em obras de bioengenharia de solos. Assim, o uso mínimo de energia adotando os princípios de deontologia está relacionado aos critérios que devem ser adotados quanto de intervenções utilizando técnicas de bioengenharia de solos.

De acordo com a Figura 15, o erro deontológico se configura de intervenções complexas em áreas altamente estáveis, onde a adoção de técnicas menos complexas, mais econômicas e compatíveis com o meio ambiente pode ser suficiente para o problema que se pretende resolver. O erro técnico está em subdimensionar intervenções para consolidar talude de alta declividade em relação ao problema real que se pretende resolver (CORNELINI; FERRARI, 2008; VENTI et al., 2003).

Esses erros podem acontecer em decorrência da inaptidão de se avaliar os limites das técnicas de bioengenharias de solos ou engenharia naturalística (CORNELINI; FERRARI, 2008). Ou seja, o uso mínimo de tecnologia necessária para a solução do problema pode evitar os erros técnicos e éticos nas intervenções da bioengenharia de solos com o mínimo impacto possível.

Figura 15 – Lei do nível mínimo de energia em intervenções de bioengenharia de solos.



Fonte: Modificada de Cornellini e Ferrari (2008) e Venti et al. (2003).

Nas obras de bioengenharia de solos deve ser considerada a utilização de tecnologias, por menor que sejam na solução dos problemas. Ainda que consideradas obras de relativa simplicidade, são obras de engenharia, devendo respeitar os conceitos da engenharia convencional, bem como uma série de outros fatores condicionados à execução da obra, como clima, geologia, solo, hidrografia e vegetação.

Nos dias de hoje, o discurso vinculado à inovação mostra que a bioengenharia de solos em uma sociedade mecanizada e tecnológica, como já mencionado, é uma releitura de técnicas remotas criadas em um momento específico decorrente da inexistência de um desenvolvimento científico. Isso mostra que já se faziam presentes as necessidades criadas pelo homem e para o homem de melhor apropriação do meio ambiente e controle de processos de degradação do meio ambiente, conforme os materiais e as tecnologias disponíveis na época.

Cabem aqui ressalvas que, ao se promover o uso de técnicas da bioengenharia de solos, devem ser consideradas também as vantagens técnicas, econômicas, sociais, culturais e ambientais. Destaca-se como vantagens o menor requerimento de máquinas, utilização de materiais naturais e locais, melhor relação custo-benefício, compatibilidade ambiental no contexto de menor perturbação durante a execução das obras de bioengenharia de solos,

execução em locais de difícil acesso ou inacessíveis para máquinas, podendo se constituir na única alternativa viável para a execução dessas obras (COUTO et al., 2010).

De qualquer forma, embora sejam técnicas que apresentem resultados positivos quanto aos aspectos ecológicos, econômicos e paisagísticos em alguns contextos de degradação, a exemplo de ambientes fluviais deteriorados pela ocupação humana, pesquisas consistentes do uso dessa tecnologia em área mineradas ainda são incipientes.

Dessa forma, conforme exemplificado, existe uma diversidade de técnicas inseridas no campo da bioengenharia de solos, aplicadas nos mais diversos contextos de perturbação, degradação ou alterações dos ambientes. Algumas dessas técnicas foram compiladas e inseridas no APÊNDICE A desta pesquisa contendo ilustrações, breve descrição e campo de aplicação.

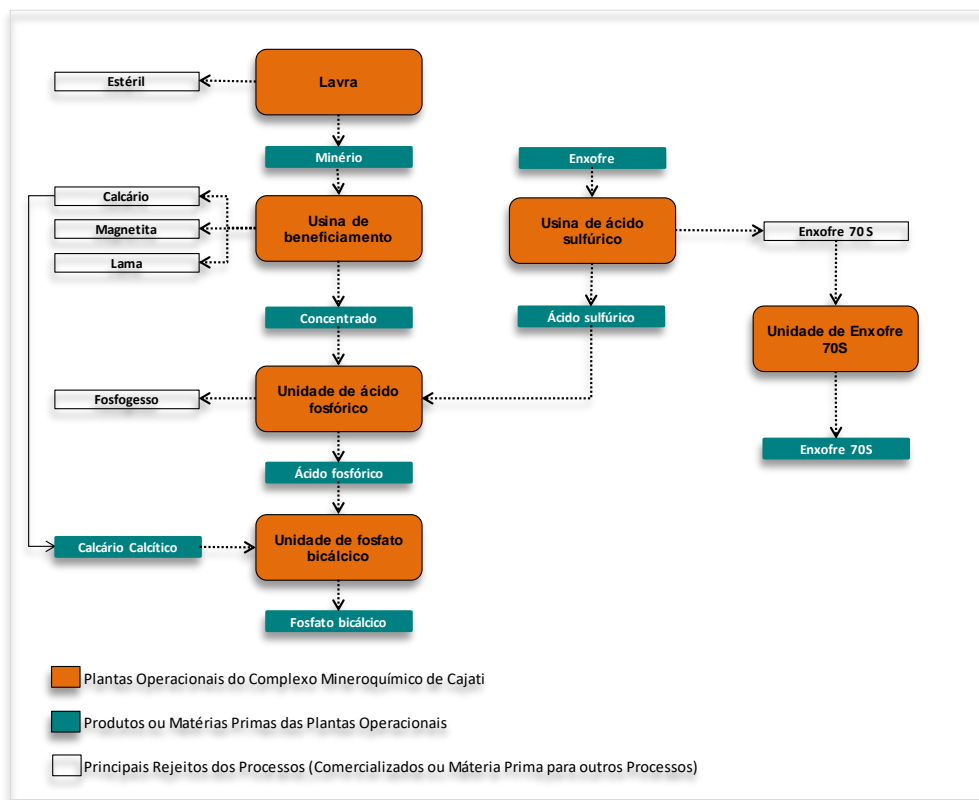
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo, localização e acesso

A condução dos estudos se deu no maior complexo industrial do Vale do Ribeira, o Complexo Minerquímico da Vale Fertilizantes, em Cajati, no estado de São Paulo. As atividades de lavra no complexo tiveram seu início em 1938 quando da criação da Serrana S.A Mineração, pioneira na exploração de rocha fosfática (apatita) como importante matéria-prima para produção de fertilizantes quanto para nutrição animal (PROMINER PROJETOS LTDA., 2009).

O Complexo Minerquímico de Cajati (SP) compõe o complexo industrial integrado desde o início dos anos 80 produzindo rocha fosfática (apatita), calcário para cimento e calcário agrícola, como também os ácidos sulfúrico e fosfórico e o fosfato bicálcio, este último destinado ao mercado de nutrição animal (MARTINHO, 2014; PROMINER PROJETOS LTDA., 2009). A Figura 16 mostra as unidades operacionais do Complexo Minerquímico de Cajati, seus produtos ou matéria prima das plantas operacionais e os principais rejeitos gerados dos processos.

Figura 16 – Processo Industrial do Complexo Minerquímico de Cajati, SP.



Fonte: Vale Fertilizantes (2016).¹

¹ Figura gentilmente cedida pela Vale Fertilizantes.

A Mina Vale Cajati está situada na região central do município de Cajati, ao norte de sua área urbanizada, no Vale do Ribeira, região sul do Estado de São Paulo (Figura 17), compreendendo as coordenadas de $24^{\circ}41'00''/24^{\circ}43'00''\text{S}$ e $48^{\circ}07'00''/48^{\circ}09'00''\text{W}$. O acesso à área se dá pela Regis Bittencourt (BR-116), Km 488,5 e por uma estrada municipal que liga Cajati a Itapeuna, sendo essas as principais vias de acesso a partir da capital paulista.

Figura 17 – Localização do Complexo Minerquímico Vale Fertilizantes-Unidade Cajati, SP.



Fonte: elaborada pela autora.

4.2 Área experimental

Para a escolha da área de experimental foram identificados alguns critérios de seleção, a saber: contexto da paisagem (entorno 1 km – florestal), disposição da empresa em colaborar com a pesquisa (alta), segurança e proteção do experimento (alta), dificuldade para implantar o experimento (alta) e ausência de relatos na literatura acerca da aplicação da bioengenharia de solos em talude de pilha de estéril (sim). Esses critérios, considerados relevantes, foram classificados com escala relativa qualitativa a semi-quantitativa e foram analisados a partir de informações obtidas em campo de modo a orientar a escolha da área.

Além desses critérios de seleção que nortearam a escolha da área experimental, adotou-se como premissa que a área deveria apresentar condições adequadas para a finalidade do experimento, ou seja, condições favoráveis para o desenvolvimento e instalação dos modelos estruturais de bioengenharia de solos.

Assim, a área do talude da pilha de estéril, denominado de talude do bota-fora oeste, em razão de sua localização na área da Vale Fertilizantes (Figura 18), formado por fragmentos do estéril da lavra, de tamanhos que variam de milimétricos a métricos (Figura 19), foi selecionada para a realização desta pesquisa. O talude tem área de 35 ha, altura máxima de 80 m, bancadas

que variam entre 10 e 20 m de altura e duas faces, sendo uma com 76 m de extensão e outra com 106 m e inclinação superior a 45°. Entretanto, para efeito desta pesquisa, utilizou-se somente uma face do talude da pilha de estéril com 16,70 m de altura e 50 m de extensão.

Figura 18 – Talude da pilha de estéril no Complexo Minerquímico de Cajati, SP.



Fonte: Modificado de Google Earth, versão 7.3.0 (data da imagem: 03/05/2013).

Figura 19 – Aspecto geral do talude da pilha de estéril antes da intervenção.



Fonte: acervo IPT (Nov./2014).

Cabe ressaltar que a vegetação existente na face do talude da pilha de estéril (Figura 19), predominando nas porções onde ocorrem os fragmentos mais finos, deve-se à ocorrência do processo de propagação vegetacional. Esse processo, conforme informações obtidas localmente teve seu início com a introdução de capim-napier (*Pennisetum purpureum*) quando do uso da técnica de semeadura em poções inativas distante da área de estudo.

4.3 Aspectos ambientais gerais da região

4.3.1 Cobertura vegetal

O município de Cajati encontra-se na sub-bacia do rio Jacupiranga (sub-bacia 11) que integra a Unidade de Recursos Hídricos – UGRHI 11 da Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira do Iguape e Litoral Sul, abrangendo quase que a área total dos municípios de Cajati e Jacupiranga e a área parcial dos municípios de Registro, Eldorado e Pariquera-Açu.

Em termos fitogeográficos, o município de Cajati (SP) está inserido no domínio da Mata Atlântica, representada localmente pela Floresta Ombrófila Densa que substituiu o termo Floresta Pluvial Tropical. A característica ombrotérmica dessa floresta está ligada a fatores climáticos tropicais de temperaturas elevadas, com médias de 25°C e com alta precipitação pluviométrica bem distribuída durante o ano, de 0 a 60 dias secos, sem período biologicamente seco. A Floresta Ombrófila Densa está caracterizada por fanerófitos que são subformas de vida, bem numerosas, representadas pelos arbustos ou árvores, trepadeiras lenhosas, representadas pelos cipós e lianas e epífitas em abundância, diferenciando das outras classes de formações (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2012).

Em função de gradientes altitudinais, a Floresta Ombrófila Densa, assim como sua vegetação secundária, está dividida em quatro categorias: Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas, Floresta Ombrófila Densa Submontana, Floresta Ombrófila Densa Montana e Floresta Ombrófila Densa Alto-Montana. A Figura 20 mostra a região da sub-bacia do rio Jacupiranga, encontram-se as formações da Floresta Ombrófila Densa Montana com maior incidência nas encostas do município de Cajati (SP); a Densa Submontana, no município de Jacupiranga e a Densa de Terras Baixas, nos municípios de Pariquera-Açu e Registro (KRONKA et al., 2007).

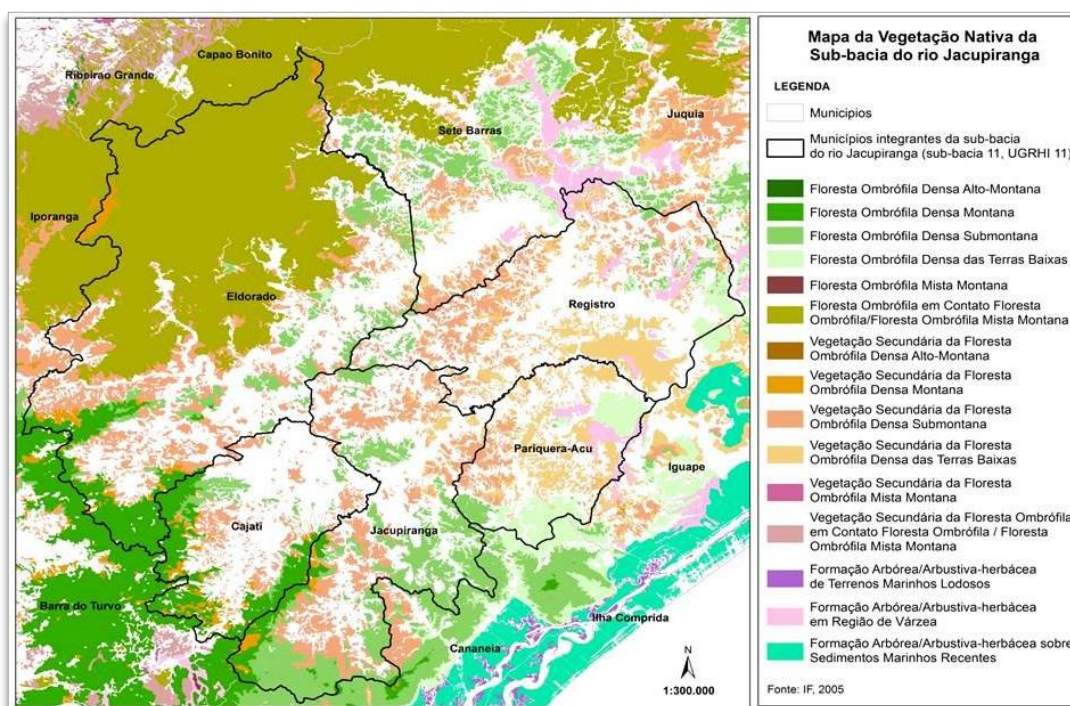
No geral, a sub-bacia do rio Jacupiranga comporta uma variedade de formações vegetais a despeito de apresentar em seu entorno diferentes usos do solo como agricultura e pecuária, além da exploração mineral de diversas substâncias minerais (CUNHA, 2010).

Quanto à cobertura vegetal do município de Cajati (SP), este possui uma área de 455 km². Desse total, 41,9%, ou seja, 190 km² estão compostos por remanescentes da vegetação

natural. Dos fragmentos de vegetação natural identificados no município, 28 tem área entre 50 ha e 100 ha e apenas 13 fragmentos tem área superior a 200 ha (KRONKA et al., 2005).

Em termos de conservação da biodiversidade, o Vale do Ribeira é uma região que está caracterizada como uma das mais importantes do Estado de São Paulo por abrigar uma rica biodiversidade e possuir o maior contínuo remanescente de Mata Atlântica do país (KRONKA et al., 2007).

Figura 20 – Formações vegetais na região da sub-bacia do rio Jacupiranga.



Fonte: Elaborada a partir de dados do Kronka et al. (2005).

Nos limites da propriedade da área de estudo, os fragmentos existentes de Floresta Atlântica que se apresentam em melhor estágio de preservação estão localizados na porção oeste, com uma área contínua superior a 450 ha. A vegetação nativa que recobre a área apresenta-se bastante heterogênea, com características fisionômicas peculiares, podendo ser classificada como secundária em estágio de regeneração variando de inicial a médio. Essa situação pode ser entendida pelo histórico de degradação da área e por fatores que condicionaram o desenvolvimento e estabelecimento da vegetação como os relacionados à drenagem local, condição topográfica, características químicas limitantes do solo, entre outros (PROMINER PROJETOS LTDA., 2009).

4.3.2 Clima

Os Sistemas de Classificação Climática (SCC) definem os climas de diferentes regiões com base nas variáveis: temperatura, umidade e chuva. O sistema notadamente mais bem utilizado na atualidade é o sistema proposto por Köppen e Geiger (1928) modificado para o Brasil por Setzer (1966) para inserção do tipo climático Am (Figura 21), partiu do entendimento de que a vegetação natural é a melhor expressão do clima de uma região.

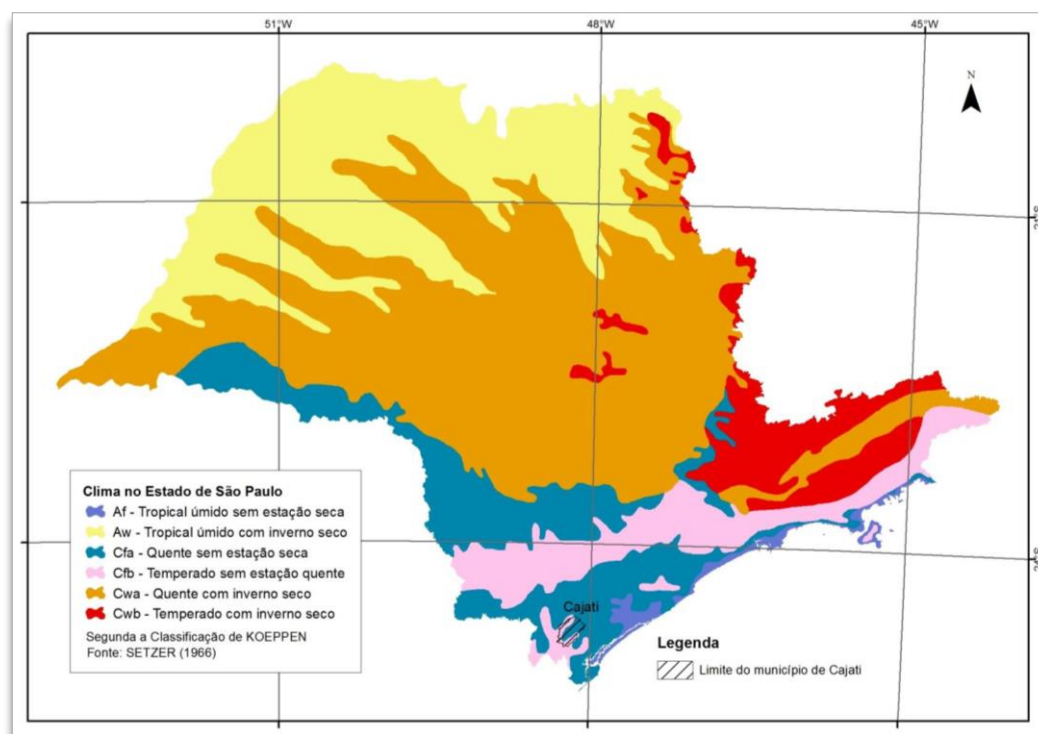
O estado de São Paulo, por suas características fisiográficas, relevo, posição geográfica e influência de diversas massas de ar, apresenta diversidade quanto aos tipos climáticos. No sistema de classificação modificado por Setzer (1966), o estado de São Paulo abriga as classificações: Af (tropical sem estação seca), Aw (tropical com inverno), Am (tropical com chuvas excessivas e inverno seco), Cwa (quente com inverno seco), Cwb (temperado com inverno seco), Cfa (quente sem estação seca) e Cfb (temperado sem estação seca), conforme mostra a Figura 22.

Figura 21 – Classificação climática de Köppen (1928).

Temperatura Média Normal		Total de chuva do mês mais sêco (Pms)	Total de Chuva Anual (P)	Descrição do Tipo de Clima segundo Köppen (Climas Úmidos)		Símbolo	
do mês mais frio	do mês mais quente						
≥ 18°C	≥ 22°C	≥ 60mm		TROPICAL	sem estação seca	Af	
		< 60 mm	< 2.500 - 27, 27 Pms		Inverno	Aw	
			≥ 2.500 - 27, 27 Pms	TROPICAL com chuvas excessivas		Am	
< 18°C	< 22°C	< 30 mm		SUBTROPICAL	seco	Quente	Cwa
						Temperado	Cwb
	≥ 22°C	≥ 30 mm			Quente	sem estação seca	Cfa
					Temperado	Cfb	

Fonte: modificada de Köppen (1928) e Setzer (1966).

Figura 22 – Tipos de clima no Estado de São Paulo e no município de Cajati, SP.



Fonte: modificada de Köppen (1928) e Setzer (1966).

Seguindo a classificação modificada por Setzer (1966), em um contexto mais amplo, o município de Cajati se encontra nas faixas de climas dos tipos Cfa e Cfb, classificados como subtropical, onde: **Cfa** – quente sem estação seca, com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e do mês mais quente igual ou superior a 22°C; chuvas superiores ou iguais a 30 mm e **Cfb** – temperado sem estação quente, com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e do mês mais quente inferior a 22°C; e chuvas superiores ou iguais a 30 mm.

4.3.3 Geologia

O município de Cajati situa-se na província denominada Mantiqueira, integrante da unidade geológica denominada de Escudo Atlântico que junto com as unidades Escudo das Guianas e Escudo Brasil Central compõe a Plataforma Sul-Americana. O substrato desse domínio geológico está constituído principalmente por rochas granito-gnáissicas e granulíticas de idade arqueana, comumente associadas a rochas sucessivamente geradas e afetadas por eventos termotectônicos policíclicos (PROMINER PROJETOS LTDA, 2009).

De acordo com a Prominer Projetos Ltda. (2009), após alterações ocorridas na crosta, diversas intrusões alcalinas se formaram com caracteres nitidamente intrusivos e

predominância de rochas alcalinas, destacando-se piroxenitos, jacupiranguitos, peridotitos, ijolitos, melteigido, fenito, dunito, carbonatito, entre outros menos expressivos.

4.3.4 Pedologia

Em escala regional, na caracterização pedológica da mina de Cajati foi registrada a ocorrência de três tipos de solos conforme estudos realizados pela Geoconsultoria (2003), a saber:

- a) Argissolo Vermelho Amarelo: solos com horizonte B textural, profundos, bem drenados, argilosos e com mediana fertilidade aparente natural, desenvolvidos nas áreas de relevo de morros, ondulado e fortemente ondulado;
- b) Solos Hidromórficos e Aluviais: solos desenvolvidos nas planícies aluviais, com condições físico-químicas variadas e formados de sedimentos diversos sob influência do lençol freático; e
- c) Solos Litólicos: solos pouco desenvolvidos e rasos, que apresentam horizonte A ausente sobre rochas ou saprólitos. Ocorrem em áreas restritas de relevo mais acidentado.

No entanto, os estudos realizados pela Prominer Projetos Ltda. (2009) mostram que os solos comumente exibem baixa a média fragilidade. Estes solos são suscetíveis aos processos erosivos e as altas fragilidades e concentram-se nas planícies localizadas ao longo da rede de drenagem, porquanto se trata de solos hidromórficos e pouco desenvolvidos.

4.3.5 Geomorfologia

Na área predominam relevos representados por morros de topos achatados e extensos, vertentes com perfis retilíneos a convexos. A drenagem neste tipo de relevo de morros achatados está representada por pequenos afluentes da margem esquerda do rio Jacupiranguinha, localizados entre os rios Bananal e Turvo, com densidade média, padrão sub-paralelo e com pequenos vales fechados (GEOCONSULTORIA, 2003).

Quanto às planícies aluviais estas ocorrem na forma de relevos de terrenos baixos e mais ou menos planos formando depósitos aluviais originados da deposição de materiais detríticos e depósitos aluviais junto às margens dos rios Jacupiranguinha, Bananal e Turvo (GEOCONSULTORIA, 2003).

4.3.6 Hidrografia

A área de estudo está entre os rios Jacupiranguinha e Turvo, tributários do rio Jacupiranga, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape que junto com o Complexo Estuário Lagunar de Iguape, Cananéia e Paranaguá, compõem a área do Vale do Ribeira, com área aproximada de 2.830.666 ha, sendo 1.119.133 ha no Estado Paraná e 1.711.533 ha no Estado de São Paulo (GEOCONSULTORIA, 2003; PROMINER PROJETOS LTDA., 2009).

O rio Ribeira de Iguape possui cerca de 470 km de extensão e drena parte dos Estados do Paraná e São Paulo. Em suas cabeceiras, no Paraná, o rio recebe a denominação de Ribeira e este drena terrenos cristalinos com regime essencialmente torrencial e vários trechos encachoeirados. Em seu médio e baixo curso, após transpor a divisa interestadual, próximo à escarpa da Serra de Paranapiacaba, o rio passa a ser denominado de Ribeira de Iguape e neste trecho, após vencer a escarpa de falha, drena vasta planície onde se espraia com um canal tipicamente meândrico até atingir sua foz na barra do Ribeira (GEOCONSULTORIA, 2003; PROMINER PROJETOS LTDA, 2009).

4.4 Teste de solo-retenção no talude da pilha de estéril

O conhecimento das técnicas de bioengenharia de solos descritas na literatura e as aplicações observadas em campo apontam uma ausência de técnicas específicas e compatíveis com as condições locais para recuperar taludes de pilha de estéril. Em complexos minerários onde o solo perde seus horizontes ficando na condição de saprolito ou rocha, formam-se os bota-foras com matações e poucos finos podendo interferir na revegetação local (RIBEIRO et al., 2014).

Assim, frente à heterogeneidade do material existente no talude da pilha de estéril e ao elevado índices de vazios, com vistas a auxiliar na escolha de modelos de recuperação com técnicas de bioengenharia de solos, foi realizado um teste experimental de solo-retenção em uma das faces do talude, com área de 172,8 m². Foram colocados aproximadamente 120 m³ de solo-substrato, por um período de duas horas sobre os blocos procedentes da Vale

Fertilizantes (Figura 23) e simulação da precipitação com 7.500 litros de água, por um período de 15 minutos, equivalente a uma chuva de 40 mm (Figura 24), de modo a observar a perda de finos (RIBEIRO, 2014).

Figura 23 – Colocação de solo-substrato no talude experimental.



Fonte: acervo IPT (Maio/2014).

Figura 24 – Simulação da precipitação no talude experimental.



Fonte: acervo IPT (Maio/2014)

A realização do teste experimental de solo-retenção forneceu informações adicionais às adquiridas com a prototipação dos modelos estruturais a partir da adaptação de técnicas já existentes, praticadas e consolidadas em contextos diversos de degradação. Os resultados do teste experimental apresentados em Ribeiro et al. (2014) indicaram optar por técnicas com função de promover a retenção do solo e utilizar adubos verdes para viabilizar a introdução de vegetação.

Assim, os diversos aspectos do talude da pilha de estéril foram considerados para fazer os protótipos dos modelos estruturais, principalmente a ausência de finos que não propicia a regeneração espontânea, não oferece condições de plantio de mudas, como também não permite a realização da semeadura direta.

Diante disso, os protótipos foram confeccionados com materiais naturais, tendo em vista a melhor relação custo-benefício e com a função de reter o solo com sementes de leguminosas visando à adubação verde e propiciar as condições necessárias para a revegetação da área. Como premissa, os protótipos dos modelos estruturais deveriam manter-se fixos ao talude, sem o risco de descolamento, considerando a alta declividade do talude da pilha de estéril. Os modelos também deveriam ser flexíveis e leves para facilitar a instalação. Assim, optou-se por utilizar materiais construtivos a base de fibras vegetais, considerando também a degradabilidade desses materiais e sua incorporação ao ambiente.

4.5 Concepção dos modelos estruturais

A prototipação dos três modelos estruturais foi realizada a partir de técnicas de bioengenharia de solos observadas de alguma experiência em projetos de recuperação de áreas em diversos contextos de degradação (SOLERA et al., 2014), bem como de técnicas descritas na literatura. Assim, os protótipos foram concebidos e confeccionados com a principal função de reter o solo em sua parte interna.

A partir de um primeiro esboço, os protótipos dos modelos estruturais foram confeccionados com tecido de juta, recebendo a denominação de guirlanda, colmeia e retentor ou solo-retentor. Assim, conforme mostra a Figura 25A, o modelo estrutural guirlanda ficou com 1,0 m de diâmetro externo e 0,6 m de diâmetro interno; o modelo estrutural colmeia com 1,5 m de comprimento e 0,5 m de largura (Figura 25B) e o modelo estrutural retentor com 1,3 m de comprimento e 0,35 m de largura (Figura 25C).

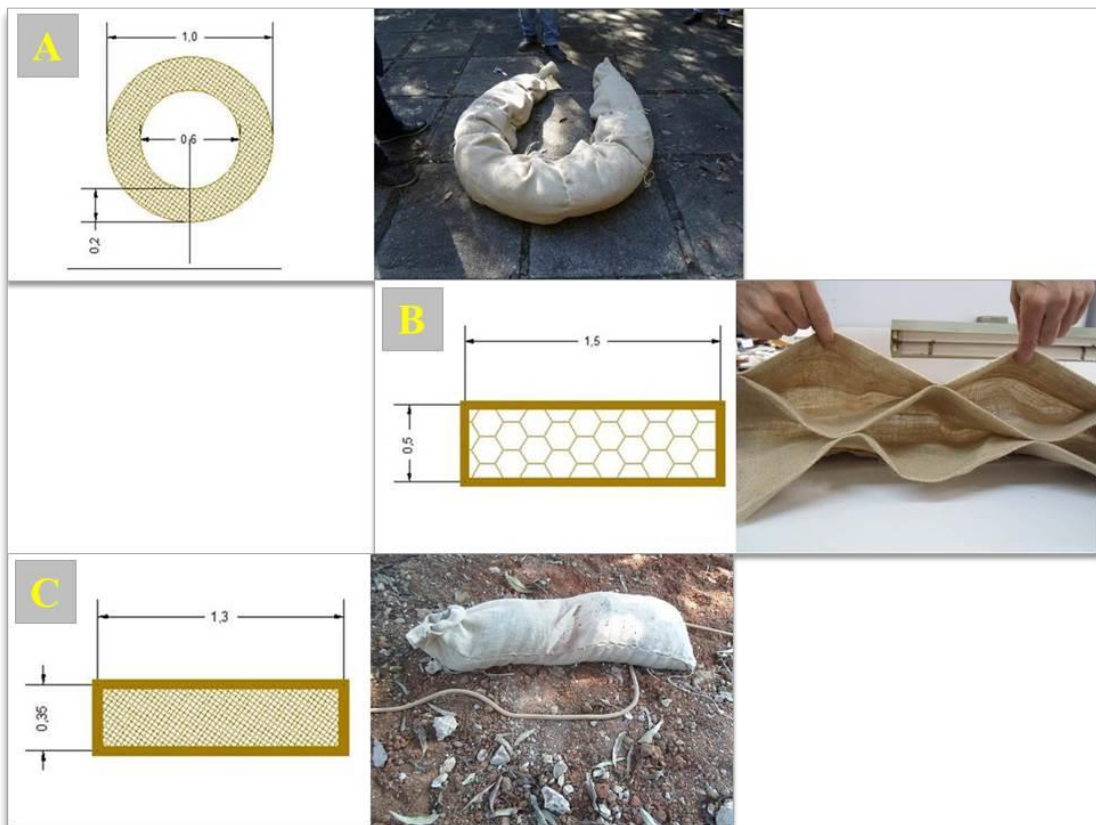
Esses modelos foram submetidos a um teste experimental em junho de 2014, em talude construído de aproximadamente 40 m², altura de 8 m, largura de 5 m e inclinação de

23º, no câmpus do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) (Figura 26). De forma a obter uma inclinação e configuração mais uniformes, o talude passou por uma conformação geométrica para poder realizar o teste experimental.

Quanto ao material vegetativo utilizado, sementes de aroeira pimenteira (*Schinus terebinthifolia*) foram lançadas na porção interna da guirlanda que já estava preenchida com solo e cobertas por uma fina camada desse mesmo solo. Para conferir o aspecto circular ao modelo guirlanda foi utilizada a serapilheira como material orgânico.

Para os modelos estruturais colmeia e retentor, utilizaram-se sementes de braquiária (*Brachiaria decumbens*) e mucuna-preta (*Mucuna aterrima*) depois de homogeneizadas com o solo residual.

Figura 25 – Croquis e protótipos dos modelos estruturais de bioengenharia de solos.



Fonte: acervo IPT

Legenda: A) croqui e modelo estrutural guirlanda; B) croqui e modelo estrutural colmeia; C) croqui e modelo estrutural retentor.

Figura 26 – Teste experimental em talude construído com os protótipos dos modelos.



Fonte: acervo IPT (Jun./2014)

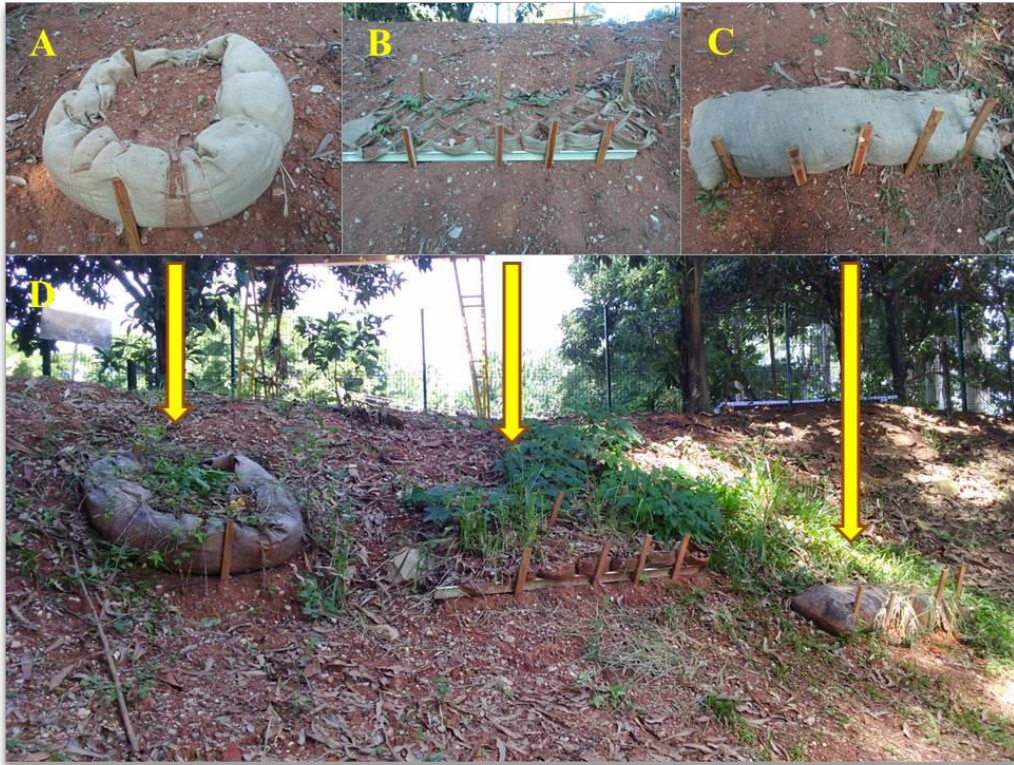
Legenda: A) vista geral dos modelos; B) detalhe dos modelos.

O teste em talude construído foi realizado com os objetivos de auxiliar:

- a) na avaliação da configuração da prototipação dos modelos em relação ao potencial de reter o solo em sua porção interna;
- b) na verificação da estabilidade dos modelos estruturais no talude;
- c) no dimensionamento dos modelos para a o mais próximo da realidade da área experimental;
- d) na estimativa da quantidade dos materiais construtivos e volume útil de solo-substrato para preenchimento de cada modelo estrutural;
- e) as condições de montagem e instalação na área experimental;
- f) na avaliação do desempenho estrutural frente à ação do tempo e das condições ambientais locais;
- g) na avaliação da capacidade do modelo estrutural em reter o solo-substrato/sementes;
- h) na avaliação do potencial da estrutura em oferecer condições para germinação das sementes; e
- i) na avaliação do desenvolvimento das plântulas.

As Figuras 27A, 27B, 28C e 27D ilustram o desenvolvimento da adubação verde, 30 e 140 dias após instalação dos protótipos dos modelos estruturais.

Figura 27 – Aspecto geral dos protótipos depois de instalados em talude construído.



Fonte: acervo IPT

Legenda – A) protótipo guirlanda – 30 dias após instalação; B) protótipo colmeia – 30 dias após instalação; C) protótipo retentor – 30 dias após instalação; D) vista geral dos protótipos dos modelos estruturais após 240 dias de instalação.

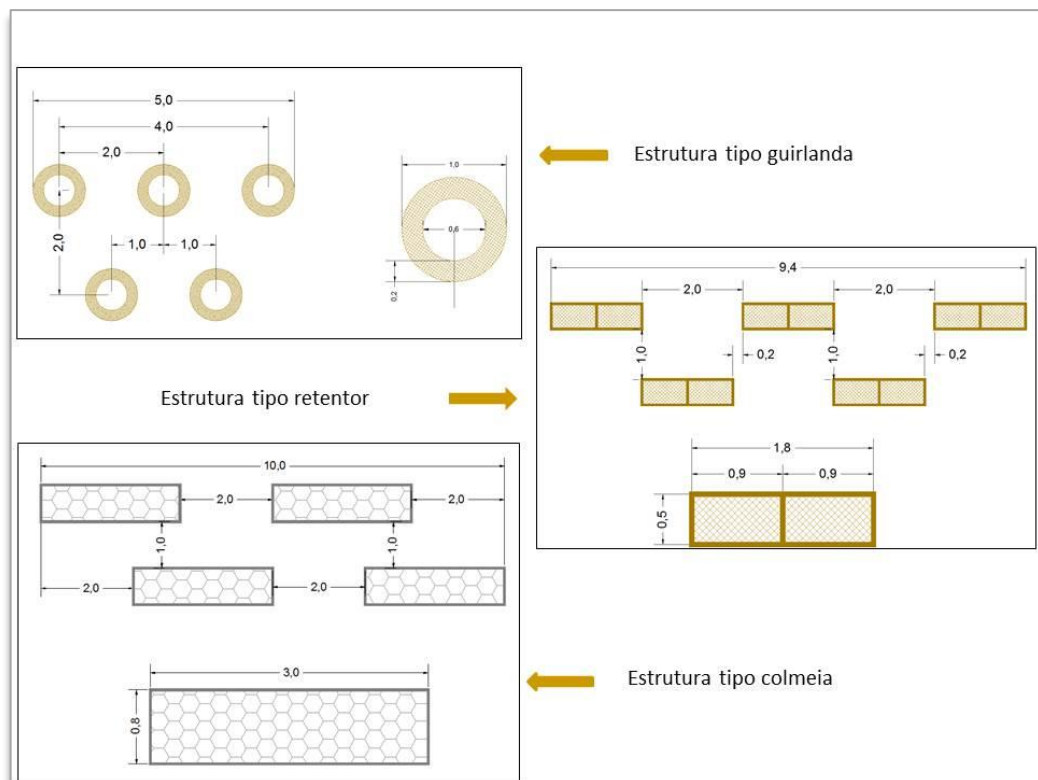
As observações realizadas nestes dois períodos, 30 e 240 dias, após a instalação dos modelos estruturais guirlanda, colmeia e retentor no talude experimental do IPT, mostraram que houve retenção do solo na porção interna de cada uma deles e que os mesmos se mantiveram fixados ao talude.

Nesse mesmo período, não foi observada a germinação das sementes de *Schinus terebinthifolia* no modelo estrutural guirlanda. No entanto, para os modelos estruturais, retentor e colmeia, que receberam as mesmas espécies de sementes (*Brachiaria decumbens* e *Mucuna aterrima*), houve uma resposta positiva quanto à germinação e desenvolvimento das plântulas de ambas as espécies. Após 30 dias, somente a *Mucuna aterrima* do modelo colmeia continuou a se desenvolver formando uma cobertura vegetal. Quanto à manifestação de outras espécies vegetais observadas no talude experimental (Figura 27) pressupõe-se que são decorrentes da dispersão natural de sementes de espécies existentes no entorno do talude.

O objetivo do teste experimental no talude do IPT foi o de conferir a retenção do solo na porção interna dos protótipos dos modelos estruturais e propiciar as condições necessárias para a revegetação utilizando adubação verde. No entanto não foi realizada coleta de dados para avaliar o desempenho da germinação das sementes. Assim, atribuiu-se como causas da baixa geminação ou ausência da geminação das sementes a combinação de possíveis fatores, quais sejam: tipo de material de preenchimento (solo residual), qualidade/tipo das sementes, não correção do solo e época da semeadura (junho/2014) que foi um período sem chuvas.

Os resultados preliminares do teste experimental no talude construído do IPT e do teste de solo-retenção no talude da pilha de estéril da Vale Fertilizantes, mostraram a necessidade de se realizar algumas modificações nas dimensões dos modelos estruturais. Assim, o dimensionamento final dos modelos estruturais para adequar ao talude com altura 16,70 m e inclinação superior a 45° está ilustrado na Figura 28 que mostra as dimensões, os espaçamentos e posicionamento de cada um dos modelos estruturais a ser instalado no talude da pilha de estéril.

Figura 28 – Dimensionamento, espaçamento e posicionamento dos modelos.



Fonte: elaborada pela autora.

A utilização da tela/tecido de juta P-9100 S/F – Fibra têxtil vegetal (*Corchorus capsulari*) foi mantida como principal material construtivo para os modelos estruturais guirlanda e colmeia, atribuindo-lhes leveza e flexibilidade, além de ser mais bem incorporada ao meio devido a sua biodegradabilidade. Quanto ao modelo estrutural retentor, o tecido de juta utilizado inicialmente para a confecção do modelo foi substituído por sacarias de café.

Os modelos estruturais colmeia, guirlanda e retentor foram projetados para receber uma espessura mínima de 0,28 m², 0,062 m² e 0,16 m², respectivamente, de solo-substrato/sementes das leguminosas *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrina* e *Cajanus cajan* em sua porção interna. Assim, a combinação do solo-substrato/sementes com os modelos estruturais consistiu da primeira etapa de recuperação, visando promover condições para fixação e produção vegetal em área onde área inapropriada para plantio de arbóreas, bem como o desenvolvimento natural da vegetação.

A seleção dessas espécies foi realizada com base em experiências comprovadas para auxiliar na recuperação de áreas degradadas, cujas principais características de cada uma das espécies estão detalhadas a seguir (RIBEIRO, 2005; MATEUS; WUTKE, 2006).

- *Crotalaria juncea* - crotalária: leguminosa anual de verão, porte ereto, altura entre 2,0 a 3,0 m, arbustiva, rápido crescimento inicial e produção de fitomassa seca entre 10 a 15 t ha⁻¹. Para essa cultura, a fixação de nitrogênio está em torno de 150 a 165 kg/ha/ano.
- *Cajanus cajan* – feijão-guandu: leguminosa semi-perene de verão, porte arbustivo ereto, sistema radicular vigoroso e bem desenvolvido em profundidade, desenvolvimento inicial lento, altura entre 2,0 a 3,0 m, resistente a seca, bom desenvolvimento em temperaturas elevadas. Possui potencial produtivo de fitomassa seca de 5 a 9 t ha⁻¹ e fixação de nitrogênio entre 41 até 280 kg/ha/ano.
- *Mucuna aterrina* – mucuna-preta: leguminosa anual de verão, hábito trepador, arbustivo ereto e altura entre 0,5 a 1,0 m. Apresenta desenvolvimento vigoroso e acentuada rusticidade. É uma leguminosa adaptada às condições de deficiência hídricas e temperaturas altas, produzindo fitomassa vegetal seca entre 7 a 8 t ha⁻¹ e fixando nitrogênio entre 120 a 157 kg/ha/ano.

4.6 Confeção dos modelos estruturais finais

4.6.1 Modelo estrutural colmeia

O protótipo do modelo estrutural colmeia surgiu a partir da arquitetura das colmeias das abelhas e das geocélulas empregadas em obras de engenharia geotécnica. Para obter a forma final projetada para o modelo colmeia foram necessários cortes, dobras e grampeamentos, utilizando 10 m de tecido de juta com 1 (um) m de largura, ficando o modelo final com 3,0 m de comprimento, 0,8 m de largura e 0,30 m de altura de célula.

Cada uma das 18 unidades do modelo colmeia tinha 34 células e foram confeccionadas as no Laboratório de Recursos Hídricos e Avaliação Geoambiental do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). No processo de confecção das 18 unidades desse modelo (Figura 29) utilizaram-se 180 metros de tecido de juta.

Figura 29 – Processo de confecção do modelo estrutural colmeia.



Fonte: acervo IPT (Out./2014).

4.6.2 Modelo estrutural guirlanda

Para a confecção das 40 unidades do modelo estrutural guirlanda, utilizaram-se 132 m de tecido de juta, 1.200 m de fio de sisal e 172 kg de palha de junco seca, resíduo da fabricação de artefatos. Todo o processo de confecção do modelo estrutural guirlanda (Figura 30) foi realizado no município de Registro (SP) em espaço destinado a confecção de artefatos.

Para dar a forma a cada uma das unidades do modelo estrutural guirlanda, foram necessários 3,30 m de tecido de juta, com 1 (um) m de largura e 4,3 kg de palha de junco seca

como material de preenchimento interno e dar a forma circular e 30 m de fio de sisal para unir as extremidades. Cada unidade ficou com 1,0 m de diâmetro externo, 0,6 m de diâmetro interno e 0,2 m de altura.

Figura 30 – Processo de confecção do modelo estrutural guirlanda.



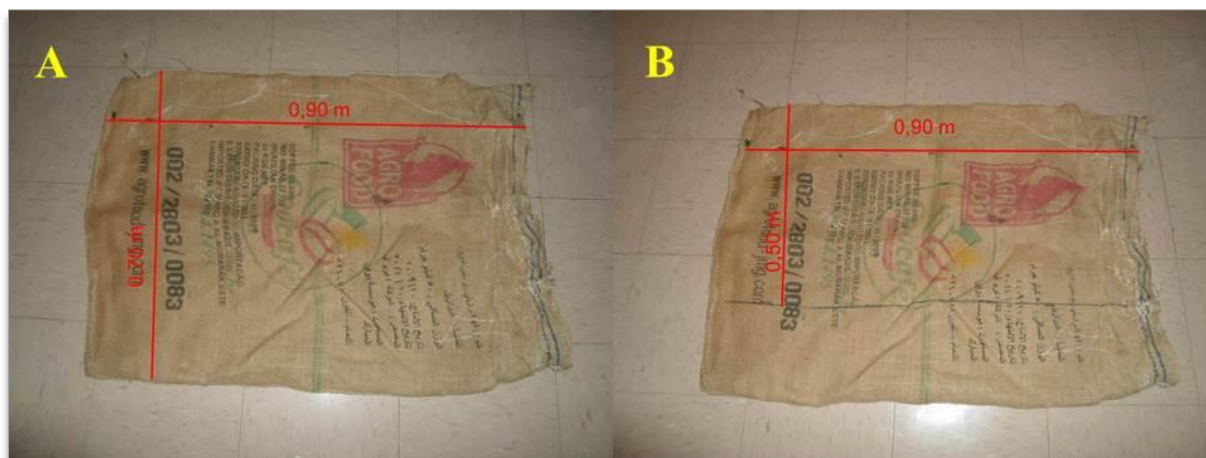
Fonte: acervo IPT (2014).

4.6.3 Modelo estrutural retentor

Para o modelo estrutural retentor, diferente dos modelos estruturais guirlanda e colmeia que foram confeccionados com tecido de juta, deu-se preferência ao reuso das sacarias de café, cuja matéria prima principal é também a juta. O modelo foi concebido a partir de técnicas já existentes utilizadas para preencher ravinas (solo ensacado), reduzir a velocidade da água em áreas inclinadas por meio de murundus em linhas de solo ensacado.

Originalmente, as sacarias de café apresentavam dimensões de 0,70 m de largura e 0,90 m de comprimento. No entanto, houve uma pequena modificação nas suas dimensões originais para que o modelo e a partir da união de duas sacarias de café de 0,90 m, fechadas com fio de sisal, ficasse com 1,80 m de comprimento e 0,50 m de largura, conforme mostra as Figuras 31A e 31B.

Figura 31 – Dimensões das sacarias de café para o modelo retentor.



Fonte: acervo IPT (2014).

Legenda: A) dimensões originais (0,90 m x 0,70 m); B) dimensões adotadas (0,90 m x 0,50 m).

4.7 Instalação dos modelos estruturais

4.7.1 Preparação da área experimental

Previamente à etapa de instalação dos modelos estruturais, em novembro de 2014, 600 m³ de areia calcária, material remanescente do processo produtivo da mineração (rejeito) da Vale Fertilizantes (Figura 32A), foram lançados, por um período aproximado de duas horas, sobre o talude da pilha de estéril em área de 668 m² (Figura 32B), contíguo ao talude onde foi realizado o teste experimental da solo-retenção e simulação da precipitação.

Cabe ressaltar que a areia calcária apresenta-se como um material com potencial de ser utilizado como matéria prima para fazer argamassas de revestimentos em substituição a areia, agregado utilizado na construção civil (GARAY; COSTA; MATTANA JUNIOR, 2011; PELIZER; PONTIERI; MORAES, 2007).

O aproveitamento da areia calcária para recompor o talude agregou valores quanto à melhoria das condições da área. Sendo um material corretivo da acidez do solo (RONQUIM, 2010), a areia calcária eleva a saturação por bases (SORATTO; CRUSCIO, 2008 apud PAULETTI et al, 2014) e diminui a toxicidade do Al (ZAMBROSI et al., 2007 apud PAULETTI et al., 2014), além de reduzir a área de disposição deste tipo de resíduo.

O objetivo foi o de regularizar a superfície do talude e promover o acesso mais seguro para a instalação das estruturas, bem como proporcionar certo preenchimento dos vazios existentes no talude.

Figura 32 – Regularização da superfície do talude com areia calcária.



Fonte: Vale Fertilizante (Nov./2014).²

Legenda: A) área de armazenamento da areia calcária; B) superfície do talude com área calcária.

Em abril de 2015, cinco meses após o lançamento da areia calcária, foi realizado o processo de delimitação do talude que demandou aproximadamente duas horas de atividade.

Na crista do talude, estacas de madeira foram fixadas a uma distância de 10 m e barbantes foram amarrados à essas estacas e estirados até a base do talude para delimitação de quatro setores. Para delimitar as cinco áreas de cada um dos setores para posterior posicionamento das unidades dos modelos estruturais no talude, estacas foram fixadas na crista do talude a cada 2 m, amarradas com barbante e também estiradas até a base do talude.

Dos quatro setores delimitados no talude, somente três seções foram utilizadas no experimento, um para cada modelo estrutural de bioengenharia de solos: colmeia, retentor e guirlanda. A Figura 33 ilustra a delimitação dos setores e a ocorrência do processo natural de propagação do capim-napier (*Pennisetum purpureum*).

² Imagem gentilmente cedida pela Vale Fertilizantes

Figura 33 – Delimitação dos setores: observar a ocorrência de capim-napier.



Fonte: acervo IPT (Abr./2015).

4.7.2 Homogeneização do solo-substrato/sementes

Em se tratando de recuperar um talude de pilha de estéril, com deficiência de matéria orgânica e de nutrientes, além da heterogeneidade granulométrica do material, a primeira etapa do processo de recuperação iniciou-se com a aplicação da técnica de adubação verde, como fonte de matéria orgânica utilizando um coquetel de sementes das leguminosas *Cajanus cajan* (feijão-guandu), *Crotalaria juncea* (crotalária) e *Mucuna aterrina* (mucuna-preta). Essas sementes, junto com o solo-substrato e adubo químico na formulação NPK 10:10:10 foram homogeneizadas (Figura 34) visando o preenchimento dos modelos estruturais.

Figura 34 – Homogeneização do material de preenchimento dos modelos estruturais.



Fonte: acervo IPT (Abr./2015). Imagem aérea capturada por veículo aéreo não tripulado (VANT).

As sementes de leguminosas utilizadas como adubos verdes são espécies consideradas melhoradoras das condições do solo, com grande capacidade de produção de fitomassa e maior ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares. Essas espécies tem a função de estabilizar agregados do solo e possuir capacidade de promover a melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo, tendo como premissa o uso consorciado entre gramíneas e sementes leguminosas ou somente as sementes de leguminosas (NOGUEIRA et al., 2012; PADOVAN; SILVA, 2014).

Cabe mencionar a importância da quantidade de raízes produzidas e a sua distribuição nas diferentes camadas do solo que além de melhorar sua textura, aumentam a capacidade de reter as águas pluviais por meio dos canalículos deixados com a decomposição e promover a translocação dos minerais das camadas mais profundas às camadas superficiais (SCARANARI; INFORZATO, 1952). Desse modo, a aplicação da técnica de adubação verde se faz necessária para criar as condições para posterior revegetação.

Após as etapas de preparação do talude e da homogeneização do material de preenchimento (solo-substrato/sementes), procedeu-se à instalação dos modelos estruturais, ressaltando que os critérios adotados para seleção e escolha da área de estudo foram

determinantes, sobretudo aqueles relacionados à disposição da empresa em colaborar com o estudo, segurança e proteção do experimento.

Convém destacar algumas limitações e dificuldades, no âmbito do projeto, referente instalação e monitoramento, quais sejam: a própria natureza do projeto, acessibilidade a área experimental, citando aqui altura e inclinação do talude, existência de blocos de tamanhos variados e o fator clima.

Assim, fez-se necessária à realização de treinamento (*ambientação*) na sede da Vale Fertilizantes, treinamento de direção defensiva/preventiva para conduzir veículos automotores até a área experimental e treinamento de trabalho em altura (Curso NR 35). Este último essencial à realização do monitoramento.

Na etapa de instalação dos modelos estruturais, procurou-se realizar a instalação de acordo com o croqui que mostra os espaçamentos e posicionamento dos modelos no talude. A instalação foi realizada de forma diferenciada, pois levou em consideração a configuração dos modelos e as características do talude. Considerou-se também a quantidade de estacas necessárias à fixação dos modelos ao talude sem o risco de seu deslocamento.

O preenchimento dos modelos estruturais também ocorreu de forma diferenciada. Os modelos guirlanda e colmeia foram preenchidos com a mistura solo-substrato/sementes utilizando um duto condutor de solo (Figura 35) disposto sobre a face do talude. O duto condutor de solo é um equipamento composto por partes encaixáveis, adaptado de dutos coletores de entulho, utilizado em obras da construção civil. A ancoragem do duto condutor se deu pelo próprio peso e fixação da corrente em uma barra de ferro engastada na crista do talude. Quanto ao modelo estrutural retentor, este teve seu preenchimento com o solo-substrato com o auxílio de uma pá de pedreiro, ainda na crista do talude.

Figura 35 – Duto condutor de solo.



4.7.3 Instalação do modelo estrutural colmeia

As 12 unidades do modelo colmeia, utilizando técnica de rapel, foram instaladas em área de aproximadamente 167 m². Sua instalação, que demandou aproximadamente duas horas e meia, teve início a partir da base do talude até sua crista (Figura 36). Para cada uma das 12 unidades, oito estacas de madeira de pinus, nas dimensões 60 cm x 2,5 cm x 2,0 cm, foram cravadas para melhor fixação ao talude.

Conforme as unidades foram sendo posicionadas no talude, o duto condutor de solo composto por partes encaixáveis também acompanhava o posicionamento das unidades. Assim que posicionado, o solo-substrato com sementes, já homogeneizados, era lançado por meio da base alargada do duto e conduzindo para preenchimento das células (Figura 37). O tecido de juta utilizado na confecção do modelo colmeia conferiu leveza, facilitando seu transporte até o talude. No entanto, as dimensões projetadas para esse modelo, além das características do talude, dificultaram o processo de instalação e posicionamento no talude, conforme planejamento, realizado por um profissional indicado pela Vale Fertilizantes.

Figura 36 – Processo de instalação do modelo estrutural colmeia.



Fonte: acervo IPT (Abr./2015).

Figura 37 – Modelo estrutural colmeia instalado e preenchido com solo-substrato



Fonte: acervo IPT (Abr./2015).

4.7.4 Instalação do modelo estrutural retentor

A área utilizada para instalação do modelo estrutural retentor também foi 167 m². Diferente do modelo estrutural colmeia, o processo de instalação do modelo retentor ocorreu após seu preenchimento com solo-substrato/sementes utilizando pá de pedreiro e demandou aproximadamente duas horas.

Utilizando uma corda, as 15 unidades do modelo, com 1,80 m de comprimento e 0,50 m de largura, foram lançadas no talude a partir de sua crista e posicionadas no talude, utilizando também a técnica de rapel. Para fixar as unidades do modelo foi necessário o cravamento de quatro a seis estacas de madeira para fixar cada unidade ao talude. O processo de instalação do modelo retentor no talude e o aspecto geral do talude com todas as unidades implantadas estão ilustrados, respectivamente, nas Figuras 38 e 39.

Figura 38 – Processo de instalação do modelo estrutural retentor.



Fonte: acervo IPT (Abr./2015).

Figura 39 – Aspecto geral do talude após instalação do modelo estrutural retentor.



Fonte: acervo IPT (Abr./2015).

4.7.5 Instalação do modelo estrutural guirlanda

O procedimento para instalar o modelo guirlanda foi mesmo utilizado no modelo, colmeia, ou seja, da base do talude até sua crista utilizando também a técnica de rapel. As 32 unidades desse modelo foram instaladas em área de 167 m², demandando aproximadamente, uma hora e meia.

O uso do tecido de juta e a palha de junco também conferiu leveza ao modelo guirlanda facilitando seu posicionamento no talude. Para fixar cada uma das unidades foram utilizadas três estacas de madeira, sendo duas estacas cravadas externamente ao modelo e uma interna. As Figuras 40 e 41 mostram, respectivamente, o processo de instalação e detalhe do modelo guirlanda instalado no talude.

Figura 40 – Processo de instalação do modelo estrutural guirlanda.



Fonte: acervo IPT (Abr./2015).

Figura 41 – Detalhe do modelo guirlanda instalado no talude.



Fonte: acervo IPT (Abr./2015).

Legenda: A) detalhe do posicionamento do modelo; B) Detalhe do estaqueamento do modelo.

Finalizado o processo de instalação, o preenchimento com solo-substrato/sementes na parte interna de cada uma das 32 das unidades foi realizado utilizando também o duto condutor de solo que foi direcionado até o local onde estava posicionada cada uma das unidades do modelo (Figuras 42).

Figura 42 – Preenchimento do modelo estrutural guirlanda com solo-substrato/sementes.



Fonte: acervo IPT (Abr./2015).

Após o preenchimento completo dos modelos estruturais colmeia e guirlanda com solo-substrato/sementes foi realizada a semeadura a lanço com as mesmas espécies de leguminosas utilizadas na homogeneização. Para o modelo estrutural retentor, que é um modelo fechado, foram feitas fissuras nas sacarias de café para introduzir as sementes. Esse processo foi realizado com vistas a maximizar a adubação verde.

As Figuras 43A, 43B e 43C mostram o talude da pilha de estéril como os modelos estruturais colmeia, retentor e guirlanda instalados e preenchidos com solo-substrato/sementes e as Figuras 44A e 44B, mostram respectivamente, o aspecto geral da área experimental após modelos instalados e detalhe do desenvolvimento da adubação verde após dez meses.

Figura 43 – Aspecto geral do talude com os modelos estruturais instalados.



Fonte: Modificada pela autora sob a imagem aérea capturada por veículo aéreo não tripulado (VANT).
 Legenda: A) modelo estrutural colmeia; B) modelo estrutural retentor; C) modelo estrutural guirlanda.

Figura 44 – Vista geral e em detalhe do desenvolvimento da adubação verde.



Fonte: Modificada pela autora sob a imagem aérea capturada por veículo aéreo não tripulado (VANT).

Legenda: A) aspecto geral da adubação verde na área experimental.

B) detalhe do desenvolvimento da adubação verde: I) colmeia; II) retentor; II) guirlanda.

4.8 Avaliação dos modelos estruturais

A avaliação dos modelos estruturais de bioengenharia de solos foi iniciada em agosto de 2015, quatro meses depois de instalados no talude da pilha de estéril. Nas campanhas de monitoramento realizadas durante um período de 15 meses foram utilizados critérios de avaliação pré-estabelecidos, onde foram calculados por meio de equações o índice dos critérios e o índice dos modelos estruturais de bioengenharia de solos.

Além do índice de desempenho, amostras de solo-substrato foram coletadas dos de unidades dos modelos estruturais para análise dos indicadores ambientais do solo tais como matéria orgânica do solo e fauna edáfica, considerando a importância desses indicadores na avaliação desses modelos para revegetar uma área cujas condições mínimas necessárias para o desenvolvimento da vegetação são ausentes, sobretudo quando apresenta limitações físico-químicas do substrato ou mesmo da realização de uma adubação.

4.8.1 Índice de desempenho dos modelos estruturais

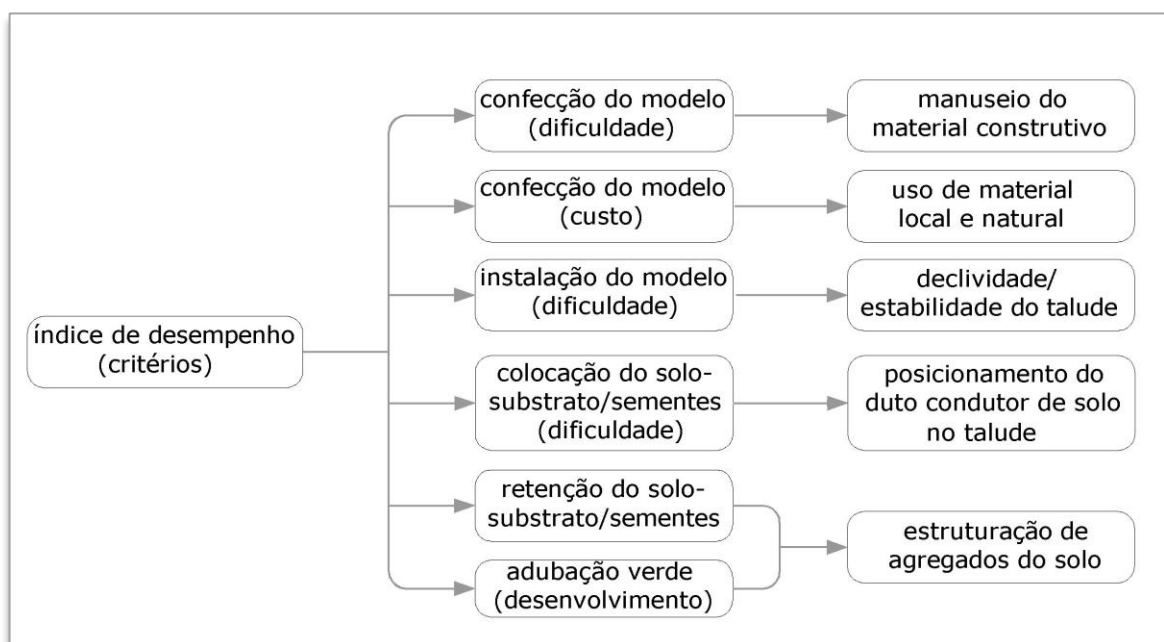
Na avaliação de desempenho dos modelos estruturais foram utilizados critérios pré-estabelecidos e específicos a partir da experiência com o desenvolvimento pesquisa, da percepção, de situações observadas em quatro campanhas de monitoramento, de imagens fotográficas e capturadas por veículo aéreo não tripulado (VANT) durante um período de 15 meses após a instalação dos modelos estruturais. Os critérios analisados foram: 1 = confecção do modelo (dificuldade); 2 = confecção do modelo (custo); 3 = instalação do modelo (dificuldade); 4 = colocação do solo-substrato/sementes (dificuldade); 5 = retenção do solo-substrato/sementes e 6 = adubação verde (desenvolvimento).

Os critérios de retenção do solo-substrato/sementes e de adubação verde (desenvolvimento) estão relacionados à estruturação de agregados do solo que ocorre por meio do sistema radicular das plantas com vistas a favorecer a sucessão natural (COLODETE; DOBBSS; RAMOS, 2014; NOGUEIRA et al., 2012; ROSA et al., 2015; STUMPF; PAULETTO; PINTO, 2016).

O critério confecção do modelo (custo) está relacionado ao uso de material local e natural, inserido no conceito de bioengenharia de solos que confere menor custo se comparado às técnicas tradicionais da engenharia (LI; EDDLEMAN, 2002; LI; ZHANG; ZHANG, 2006; PINTO, 2009). Além disso, foram considerados os materiais residuais utilizados na confecção dos modelos estruturais. Para o critério instalação do modelo (dificuldade), a declividade é um fator que influencia na estabilidade de um talude na instalação de uma técnica de bioengenharia de solos (BISCHETTI et al., 2010).

Já os critérios confecção do modelo (dificuldade) e colocação do solo-substrato/sementes (dificuldade), estes foram selecionados a partir da experiência obtida com o desenvolvimento pesquisa e estão relacionados, respectivamente, ao manuseio do material construtivo que deu origem aos modelos colmeia e guirlanda e posicionamento do duto condutor de solo no talude para preenchimento desses modelos (colmeia e guirlanda) com solo-substrato/sementes. A Figura 45 mostra uma representação simplificada dos critérios utilizados no índice de desempenho dos modelos estruturais e suas relações com a pesquisa.

Figura 45 – Esquema dos critérios utilizados no índice de desempenho.



Fonte: elaborada pela autora.

Na atribuição da pontuação para os seis critérios pré-estabelecidos, visando avaliar o desempenho dos modelos, os escores foram definidos assumindo que o maior valor representa o melhor desempenho e o menor valor representa desempenho ruim (ALVES; BASTOS, 2011). A esses escores foram atribuídos valores correspondentes a números inteiros, ou seja: 0 (baixo desempenho), 1 (médio desempenho) e 2 (bom desempenho) para cada critério relacionado aos modelos estruturais de bioengenharia de solos, onde foram obtidos dois índices de desempenho: o Índice de Desempenho dos Critérios (I_C) e o Índice de Desempenho dos Modelos Estruturais (I_{ME}) utilizando-se as Equações (1) e (2):

$$I_C = \frac{E_c}{E_{max_c}} \quad \text{Equação (1)}$$

$$I_{ME} = \frac{1}{N} \sum I_C \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

I_C = Índice de Desempenho dos Critérios;

I_{ME} = Índice de Desempenho dos Modelos Estruturais;

N = Número de Critérios;

E_c = Escore do c-ésimo Critério ($c = 1$ a 6);

E_{max_c} = Escore máximo do c-ésimo;

C = c-ésimo critério ($c = 1$ a 6), onde 1 = confecção (dificuldade), 2 = confecção (custo), 3 = instalação (dificuldade), 4 = colocação do solo-substrato (dificuldade), 5 = retenção do solo-substrato e 6 = adubação verde (desenvolvimento).

Os valores obtidos com a aplicação da Equação (1) mostram o desempenho de cada modelo estrutural – colmeia, retentor e guirlanda aplicados na área experimental para cada critério analisado individualmente. A aplicação da Equação (2) gerou o Índice de Desempenho de cada modelo estrutural para o conjunto de critérios analisados.

Para cada modelo estrutural, o desempenho final foi classificado em baixo, médio e bom gerando três intervalos qualitativos com base nos valores de I_{ME} obtidos, sendo: baixo desempenho ($I_{ME}=0,00-0,33$), médio desempenho ($I_{ME}=0,34-0,67$) e bom desempenho ($I_{ME}=0,68-1,00$).

4.8.2 Indicadores ambientais do solo

Foram considerados os critérios facilidade de medição e confiabilidade metodológica na escolha dos indicadores ambientais do solo para avaliar os modelos estruturais. Representados por propriedades químicas, físicas ou biológicas, os indicadores ambientais do solo estão associados a processos diferenciados, destacando-se a ciclagem de nutrientes, retenção hídrica, potencial erosivo e de lixiviação e atividade biológica (MAIA; PARRON, 2015). Assim, a matéria orgânica e a fauna edáfica foram os indicadores ambientais escolhidos para avaliar os modelos estruturais instalados no talude.

Para medir a matéria orgânica do solo no solo e realizar análise da fauna edáfica, amostras de solo-substrato, aproximadamente 500g, foram coletadas de algumas das unidades dos modelos estruturais, escolhidas de forma aleatória, utilizando quadrantes de 30 cm x 30 cm (Figuras 46A, 46B e 46C), em cinco repetições de cada modelo estrutural.

Figura 46 – Coleta de amostras de solo-substrato nos modelos estruturais.



Fonte: acervo IPT (Fev./2016).

Legenda: A) modelo estrutural colmeia; B) modelo estrutural retentor; C) modelo estrutural guirlanda.

Quatro campanhas de monitoramento foram realizadas, sendo a primeira campanha, em ago./2015. Nessa campanha as amostras de solo-substrato foram coletadas em nove unidades de cada um dos modelos estruturais. Na segunda e quarta campanhas, realizadas em fev./2016 e jul./2016, respectivamente, as coletas foram realizadas somente em cinco unidades de cada modelo estrutural por considerar esse número adequado para avaliar os modelos estruturais. Na terceira campanha, o monitoramento compreendeu somente de observações de campo e registros fotográficos.

As amostras foram coletadas acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas para determinação da matéria orgânica do solo (g/dm^3) por meio do método dicromato/colorimétrico, gerando o valor de matéria orgânica no solo para cada tratamento. As análises das amostras compostas coletadas de cada um dos modelos estruturais foram realizadas pelo laboratório do Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP).

Para análise da fauna edáfica foram utilizadas amostras coletadas na segunda e quarta campanhas de monitoramento, respectivamente em fev./2016 e jul./2016. As amostras de solo compostas e identificadas de cada um dos modelos estruturais passaram por um peneiramento utilizando jogo de peneiras de malhas de 4,75 mm; 2,00 mm e 1,00 mm. Os organismos que passaram pela malha mais fina (1,00 mm) foram imersos em frascos contendo álcool 70% para conservação e, com auxílio de uma lupa foi realizada a triagem desses indivíduos de acordo com os aspectos morfológicos e classificados em morfoespécie (Figura 47).

Figura 47 – Indivíduos da fauna edáfica.



Fonte: acervo IPT (Abr./2016).

Legenda: A) isópoda; B) coleoptera; C) formiga; D) piolho-de-cobra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em se tratando de uma tecnologia comumente praticada para estabilizar margens de cursos d'água e taludes naturais ou construídos, a instalação dos modelos estruturais de bioengenharia de solos constitui-se de um desafio em taludes de pilhas de estéril nas condições verificadas, além de ser nova a aplicabilidade nesse contexto, cuja aplicação dessa tecnologia, para esse fim, ainda é incipiente no meio técnico-científico.

Desse modo, este capítulo mostra a concepção dos modelos estruturais de bioengenharia de solos instalados no talude da pilha de estéril, a avaliação dos modelos estruturais utilizando o índice de desempenho e os indicadores ambientais do solo como resultado desta pesquisa.

5.1 Índice de desempenho dos modelos estruturais

Na comparação do desempenho do I_{ME} , conforme mostra a Tabela 1 e Figura 48, verificou-se se que os modelos estruturais colmeia, com o valor do I_{ME} de 0,17 e retentor com valor do I_{ME} de 0,58, apresentaram baixo e médio desempenho, respectivamente, enquanto que a guirlanda obteve um bom desempenho com valor do I_{ME} de 0,75. Esses valores sugerem que o modelo estrutural guirlanda mostrou ser mais eficiente para a situação verificada na pilha de estéril.

Ainda que os modelos estruturais tenham alcançado diferentes faixas de desempenho, eles apresentam elevado potencial de aplicabilidade. Particularmente para o modelo guirlanda, que exibe uma estrutura circular e vazada, tem-se que o bom desempenho foi conferido à leveza do modelo, à facilidade de instalação, à fixação no talude e à facilidade de transporte. A forma e dimensão do modelo também favoreceram o desenvolvimento da adubação verde.

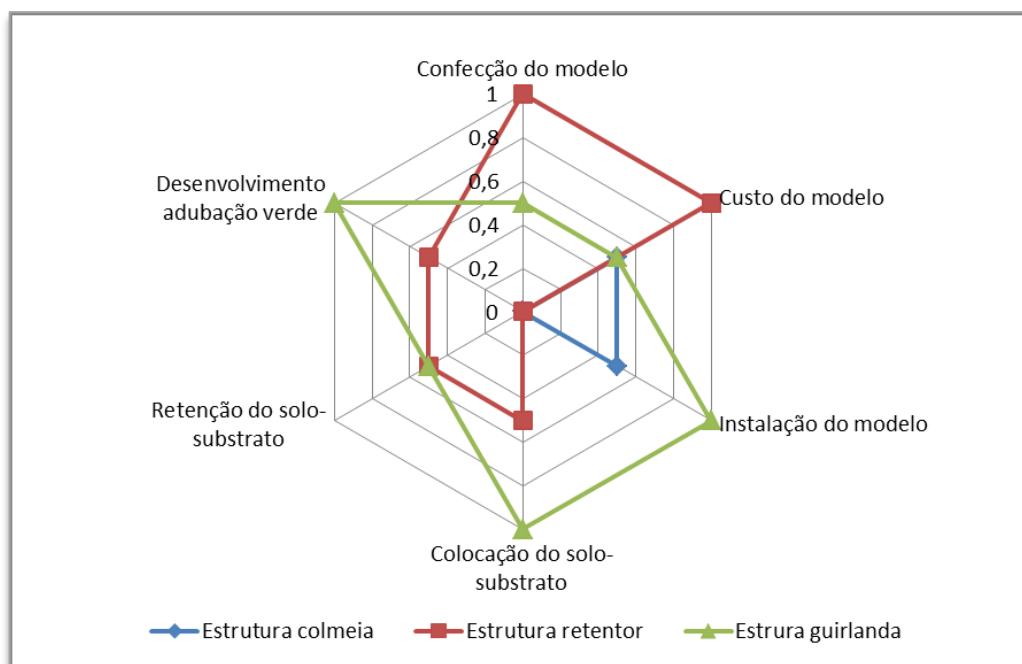
Tabela 1 – Critérios de desempenho dos modelos estruturais de bioengenharia de solos.

Modelos Estruturais / Critérios	Colmeia	I_C	Retentor	I_C	Guirlanda	I_C
Confecção do modelo (dificuldade)	Alta: unir o tecido, dobrar e pregar para formar as células	0	Baixa: a sacaria de café facilitou a costura ajustada a nova configuração	1	Média: dar forma ao modelo com palha de junco seca e fechar com fio de sisal	0,50
Confecção do modelo (custo)	Médio: uso de fibra têxtil vegetal (<i>Corchorus capsulari</i> – juta) e grampos	0,50	Baixo: reuso de sacarias de café e fio de sisal para unir as sacarias	1	Médio: uso de fibra têxtil vegetal (<i>Corchorus capsulari</i> – juta); fio de sisal; contratação de terceiros; confecção do modelo	0,50
Instalação do modelo (dificuldade)	Média: dificuldade de fixar e estaquear o modelo no talude devido à dimensão	0,50	Alta: grande esforço na instalação devido ao peso da própria estrutura, não favorecendo o posicionamento no talude	0	Baixa: modelo apresenta leveza, fácil de transportar, instalar e estaquear	1
Colocação solo-substrato/sementes (dificuldade)	Alta: colocar mistura solo-substrato/sementes com duto coletor em cada uma das células	0	Média: o solo-substrato/sementes foi colocado fora do talude	0,50	Baixa: colocação do solo-substrato no modelo com duto coletor no talude	1
Retenção do solo-substrato/sementes	Baixa: grande perda de solo devido ao posicionamento do modelo no talude de alta declividade	0	Média: menor perda de solo-substrato/sementes devido à configuração do modelo	0,50	Média: menor perda de solo-substrato/sementes devido à configuração do modelo	0,50
Adubação verde (desenvolvimento)	Baixo: perda de solo-substrato/sementes devido à deformação do modelo prejudicando a adubação verde	0	Médio: necessidade de fazer aberturas na estrutura para auxiliar a adubação verde	0,50	Alto: configuração favoreceu adubação verde	1
Desempenho/I_{ME}	baixo	0,17	médio	0,58	bom	0,75

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: I_C : índice de desempenho dos critérios; I_{ME} : índice de desempenho dos modelos estruturais.

Figura 48 – Gráfico radar do desempenho dos modelos estruturais de bioengenharia de solos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na avaliação geral dos modelos estruturais, a guirlanda obteve bom desempenho ($I_{ME} = 0,75$), sendo que os menores valores foram para os critérios: confecção do modelo (dificuldade), com $I_C = 0,50$; confecção do modelo (custo), com $I_C = 0,50$ e retenção do solo-substrato/sementes, com $I_C = 0,50$; e os maiores valores para os critérios: instalação do modelo (dificuldade), com $I_C = 1$; colocação solo-substrato/sementes (dificuldade), com $I_C = 1$ e desenvolvimento da adubação verde, com $I_C = 1$.

O modelo retentor, ao contrário da guirlanda, obteve maior avaliação nos critérios confecção do modelo (dificuldade), com $I_C = 1$ e confecção dos modelos (custo), com $I_C = 1$ e menores valores para os critérios: instalação do modelo (dificuldade), com $I_C = 0$; colocação do solo-substrato/sementes (dificuldade), com $I_C = 0,50$; retenção do solo/sementes, com $I_C = 0,50$ e desenvolvimento da adubação verde, com $I_C = 0,50$; e ainda assim, obteve desempenho médio ($I_{ME} = 0,58$).

O modelo colmeia ($I_{ME} = 0,17$) apresentou baixo desempenho devido aos menores valores atribuídos a quatro dos seis critérios: confecção dos modelos (dificuldade), com $I_C = 0$; colocação solo-substrato/sementes (dificuldade), com $I_C = 0$; retenção do solo-substrato/sementes, com $I_C = 0$; desenvolvimento da adubação verde, com $I_C = 0$ sendo que os valores maiores foram atribuídos para os critérios: confecção do modelo (custo), com $I_C = 0,50$ e instalação do modelo (dificuldade), com $I_C = 0,50$.

O baixo desempenho do modelo colmeia foi atribuído à dificuldade construtiva em virtude de sua dimensão, dificultando sua instalação e fixação no talude. Além disso, as condições do talude (altura e inclinação) não favoreceram o posicionamento do modelo, levando a perda de solo-substrato, prejudicando a germinação das sementes e conseqüentemente o desenvolvimento das plântulas.

A manutenção das configurações originais desse modelo (1,5 m x 0,5 m) e aplicação de resina (não agressiva ao meio ambiente) pode fornecer maior rigidez ao tecido de juta, e aumentar o número de unidades, facilitando a instalação, posicionamento e fixação. Estas alterações podem aumentar a área de retenção do solo-substrato/sementes e aumentar o desempenho de cada critério individualmente.

O modelo estrutural retentor, mesmo não exigindo nenhum tipo de esforço construtivo devido ao uso de sacarias de café, teve desempenho médio. Sua instalação demandou maiores esforços que foi atribuído ao seu peso, uma vez que sua configuração não favoreceu seu posicionamento no talude, havendo a necessidade de ser lançado ao talude para depois posicioná-lo. Por ser um modelo fechado, houve necessidade de realizar fissuras para auxiliar na germinação das sementes e no desenvolvimento das plântulas.

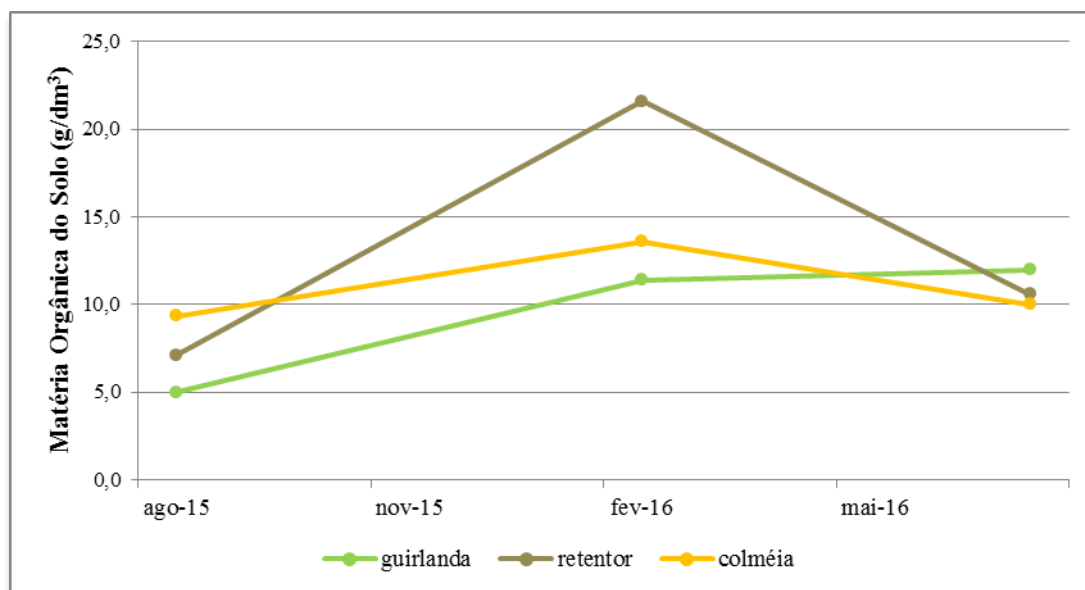
O desempenho desse modelo estrutural pode ser melhorado com a manutenção das dimensões originais (1,3 m x 0,35 m) e do tecido de juta, bem como na forma de preenchimento com o solo-substrato/sementes após posicionamento e fixação no talude.

O modelo estrutural guirlanda, diferente dos modelos estruturais colmeia e retentor, obteve um bom desempenho. Sua configuração e os materiais utilizados lhe conferiram leveza, facilitaram a sua instalação, colocação do solo-substrato/sementes e desenvolvimento da adubação verde. Para esse modelo estrutural, cuja configuração apresenta fundo vazado, o desempenho pode ser potencializado com a realização de estudos experimentais, utilizando modelos de fundo fechado e com a colocação de sementes misturadas à palha de junco, propiciando uma maior retenção de solo-substrato/sementes, conseqüentemente, maior desenvolvimento de adubação verde.

5.2 Indicadores ambientais do solo

A Figura 49 mostra os resultados obtidos com a determinação da matéria orgânica do solo (g/dm^3) dos modelos estruturais a partir da coleta de amostras de solo na primeira, segunda e quarta campanhas. A terceira campanha, mai./16, não foi contemplada na análise de matéria orgânica do solo devido a não coleta de amostras de solo.

Figura 49 – Matéria orgânica do solo (g/dm^3) dos modelos estruturais.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na análise da matéria orgânica do solo, o modelo estrutural guirlanda apresentou um aumento contínuo, enquanto que nos modelos estruturais colmeia e retentor foi observado um aumento nos intervalos entre as campanhas primeira e segunda e uma redução entre a segunda e quarta campanha.

Os resultados constantes da Figura 50 indicam que na primeira coleta de dados (primeira campanha), quatro meses após a instalação do experimento, o modelo colmeia apresentou o maior valor de matéria orgânica no solo ($9,33 \text{ g}/\text{dm}^3$), seguido pelo retentor ($7,11 \text{ g}/\text{dm}^3$) e guirlanda ($5,00 \text{ g}/\text{dm}^3$). Na segunda coleta de dados, que corresponde à segunda campanha, após seis meses da primeira coleta, o modelo retentor apresentou o maior valor de matéria orgânica no solo ($21,60 \text{ g}/\text{dm}^3$), seguido pelo modelo colmeia ($13,60 \text{ g}/\text{dm}^3$) e guirlanda ($11,40 \text{ g}/\text{dm}^3$). Na terceira e última coleta de dados (quarta campanha), que aconteceu onze meses após a primeira coleta de dados, o modelo guirlanda apresentou o maior valor de matéria orgânica no solo ($12,00 \text{ g}/\text{dm}^3$), seguido pelo tratamento retentor ($10,60 \text{ g}/\text{dm}^3$) e colmeia ($10,00 \text{ g}/\text{dm}^3$).

No balanço entre a primeira e a quarta campanha de coleta de dados, os três modelos estruturais apresentaram aumento de matéria orgânica no solo, sendo que o tratamento guirlanda foi que apresentou o maior aumento (140%), seguido pelo retentor (49%) e colmeia (7%).

O aumento da produção de matéria orgânica do solo na segunda campanha de campo (Fev./16) pode ser atribuído ao grande volume de chuvas que antecedeu a segunda campanha.

Esse volume de chuvas, constatado em campo, foi corroborado utilizando dados do posto pluviométrico F5-028 (DAEE/Vale Fertilizantes – Cajati-SP.) da área de estudo e por apresentar uma série histórica de dados completos entre 1970 a 2016.

Além disso, as espécies escolhidas possuem ciclos vegetativos diferentes, ou seja, ciclos anuais (*Mucuna aterrina* e *Crotalaria juncea*) e semi-perene (*Cajanus cajan*). São leguminosas de verão, significando que a ocorrência de altas temperaturas e chuvas de verão propicia maior produção de biomassa, incorporação de nitrogênio e ciclagem de nutrientes. A tendência dessas espécies, no inverno, é de um crescimento mais lento, podendo estar associada à diminuição da temperatura e da disponibilidade hídrica (ESPINDOLA et al., 2005). Portanto, o fator clima pode ter influenciado no declínio da matéria orgânica ocorrido entre a segunda campanha (fev./16) e a quarta campanha (jul./16).

Esse resultado mostra que a disponibilidade hídrica de uma região é um fator muito importante que influencia tanto na degradação ou conservação da matéria orgânica como na produtividade dos ecossistemas, na agricultura, na pecuária, na produção de água, no uso e cobertura da terra e nos serviços ambientais (FRITZSONS et al.; 2015).

A matéria orgânica melhora o fluxo de nutrientes do solo no sistema que é um serviço ambiental de suporte fornecido pela matéria orgânica, relacionada com a melhoria da qualidade do solo-substrato.

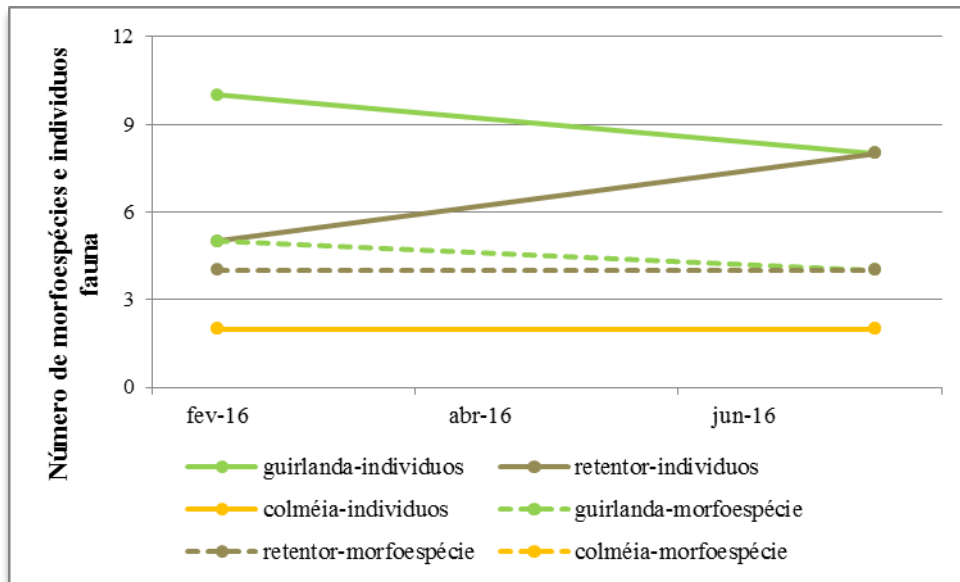
Com relação à fauna edáfica, ela exerce uma importante função na construção do solo antropogênico ou substrato que é um serviço ambiental de suporte. Além disso, em áreas que se encontram em processo de recuperação ambiental, a fauna edáfica, como bioindicadora do uso do solo ou da sua fertilidade oferece uma noção da condição atual do solo e de alterações que são induzidas por fatores bióticos e abióticos através do tempo (BROWN et al., 2015).

Formigas, cupins, minhocas etc., designados de “engenheiros do ecossistema”, são indicadores das modificações do ambiente, uma vez que criam estruturas biogênicas como galerias, ninhos, câmaras e bolotas fecais, modificando tanto as propriedades físicas dos solos quanto a disponibilidade de recursos para outros organismos. Esses indivíduos quebram o material vegetal em pequenas frações, por meio do processo de decomposição e da humidificação (fragmentação, ingestão, estimulação da comunidade microbiana decompositora) e facilitando a ação decompositora dos microorganismos que também agem na formação e estruturação do solo por meio do processo de pedogênese (BROWN et al., 2015; CORREIA, 2002; MELO et al., 2009; URQUIAGA, et al., 2005).

Assim, na análise da fauna edáfica realizada com as amostras compostas do solo-substrato/sementes coletadas das unidades de cada modelo estrutural, nas segunda e quarta

campanhas realizadas, respectivamente em fev./16 e jul./16, em cinco repetições, revelaram um número maior de morfoespécies e de indivíduos da fauna edáfica nos modelos guirlanda e retentor conforme mostra a Figura 50.

Figura 50 – Número de morfoespécie e de indivíduos da fauna edáfica.



Fonte: Elaborado pela autora.

O gráfico da Figura 50 mostra que houve um declínio no número de morfoespécies do modelo guirlanda amostrados na segunda campanha (cinco) para a quarta campanha (quatro). Da mesma forma, esse declínio ocorreu para o número de indivíduos amostrados na segunda campanha que passou dez indivíduos para oito indivíduos na quarta campanha.

Para o modelo retentor, o número de morfoespécie amostrado na segunda campanha (quatro) permaneceu o mesmo na quarta campanha. Quanto ao número de indivíduos, na quarta campanha foram amostrados oito indivíduos, número superior ao da segunda campanha (cinco). Para o modelo colmeia, não houve alteração no número de morfoespécie de indivíduos (dois) amostrados tanto na segunda quanto na quarta campanha.

Mesmo que o número de indivíduos amostrados na quarta campanha para o modelo retentor tenha sido superior ao da segunda campanha, na avaliação geral, o modelo guirlanda apresentou o melhor resultado entre os modelos estruturais colmeia e retentor.

A configuração dos modelos concebidos para reter solo-substrato/sementes, assim como os fatores sazonalidade e método de coleta das amostras, utilizado nas campanhas de monitoramento de fev./16 e jul./16, pode ter influenciado nesses resultados.

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresentou os processos realizados na concepção, confecção e instalação dos modelos estruturais de bioengenharia de solos para reter solo em talude de pilha de estéril e auxiliar a posterior revegetação. Apresentou também os resultados obtidos com o índice de desempenho e avaliação dos indicadores ambientais do solo para esses modelos.

Na avaliação geral dos modelos estruturais, os índices de desempenho desenvolvidos para avaliar esses modelos indicaram que a guirlanda apresentou o melhor resultado, destacando-se a baixa dificuldade de instalação, a baixa dificuldade no preenchimento do solo-substrato/sementes e alto desenvolvimento das espécies de adubos verdes, utilizando as leguminosas *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrina* e *Cajanus cajan*. O segundo melhor desempenho foi alcançado pelo modelo retentor seguido pelo modelo colmeia, que obteve o pior desempenho.

Na avaliação dos indicadores ambientais do solo, houve maior produção de matéria orgânica do solo no modelo guirlanda seguida dos modelos retentor e colmeia. Quanto à fauna edáfica, o número de organismos de morfoespécie e de indivíduos foi superior no modelo guirlanda, seguido do modelo retentor e colmeia.

Tanto a aplicação do índice de desempenho como dos indicadores ambientais de solo, utilizados para avaliar os modelos estruturais de bioengenharia de solos indicaram potencial de aplicabilidade em futuros projetos de pesquisa para recuperar situações similares de degradação em áreas de mineração a céu aberto.

Em se tratando de uma tecnologia comumente praticada para estabilizar margens de cursos d'água e taludes naturais ou construídos, a pesquisa, utilizando modelos estruturais com base nas técnicas da bioengenharia de solos, constitui-se de um desafio para as condições verificadas nas pilhas de estéril, cuja aplicação da tecnologia ainda é incipiente no meio técnico-científico para esse fim.

Por ser nova a aplicabilidade da bioengenharia de solos em talude de pilha de estéril, além da ausência de trabalhos nesse tema com vistas a comparações, esta pesquisa mostra a necessidade de continuidade de estudos visando promover o aperfeiçoamento dos modelos estruturais para reter solo podem ampliar seu potencial de uso na recuperação de áreas degradadas pela atividade minerária.

REFERÊNCIAS

AGUS, C.; PUTRA, P. B.; FARIDAH, E.; WULANDARI, D.; NAPITUPULU, R. R. Organic carbon stock and their dynamics in rehabilitation ecosystem areas of post open coal mining at tropical region. **Procedia Engineering**, v. 159, p. 329-337, 2016.

ALCÂNTARA, F. A.; FURTINI NETO, A. E.; DE PAULA, M. B.; MESQUITA, H. A.; MUNIZ, J. A. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 2, 2000.

ALMEIDA, R. O. P. O.; SÁNCHEZ, L. H. Revegetação de áreas mineração: critérios de monitoramento e avaliação do desempenho. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 47-54, 2005.

ALVES, L. B.; BASTOS, R. P. Sustentabilidade em Silvânia (GO): o caso dos assentamentos rurais São Sebastião da Garganta e João de Deus. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 49, n. 2, p. 419-448, 2011.

BAASCH, A.; KIRMER A.; TISCHEW, S. Nine years of vegetation development in a postmining site: effects of spontaneous and assisted site recovery. **Journal of Applied Ecology**, v. 49, p. 251-260, 2012.

BAO, N.; LIXIN, W.; BAOYING, Y.; KE Y.; WEI, Z. Assessing soil organic matter of reclaimed soil from a large surface coal mine using a field spectroradiometer in laboratory. **Geoderma**, v. 288, p. 47-55, 2017.

BISCHETTI, G. B.; CHIARADIA, E. A.; D'AGOSTINO, V.; SIMONATO, T. Quantifying the effect of brush layering on slope stability. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 3, p. 258-264, 2010.

BITAR, O. Y. **Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na região metropolitana de São Paulo**. 1997. 185 f. (Doutorado) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

BOLDT-BURISCH, K.; NAETH, M. A., SCHNEIDER, B. U., HÜTTL, R. F. Linkage between root systems of three pioneer plant species and soil nitrogen during early reclamation of a mine site in Lusatia, Germany. **Restoration Ecology**, v. 23, n. 4, p. 357-365, 2015.

BRADSHAW, A. D. Underlying principles of restoration. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 53, n. 1, p. 3-9, 1996.

BRANCALION, P. R. S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. Uma revisão ecossistêmica do processo de restauração ecológica. In: RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. (Orgs.). **Pacto para a restauração ecológica da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo: Instituto BioAtlântica, 2009. p. 78-85.

BRASIL. Decreto Federal nº 97.632, de 10 de abril de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 12 abr. 1989.

- BROWN, G. G.; NIVA, C. C.; ZAGATTO, M. R. G.; FERREIRA, S. A.; NADOLNY, H. S.; CARDOSO, G. B. X.; SANTOS, A.; MARTINEZ, G. A.; PASINI, A.; BARTZ, M. L. C.; SAUTTER, K. D.; THOMAZINI, M. J.; BARETTA, D.; SILVA, E.; ANTONIOLLI, Z. I.; DECAËNS, T.; LAVELLE, P. M.; SOUSA, J. P.; CARVALHO, F. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. In: PARRON, L. M. et al. (Ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- BURYLO, M.; HUDEK, C.; REY, F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). **Catena**, v. 84, n. 1, p. 70-78, 2011.
- CALDEIRA, M. V. W.; SILVA, E. M. R.; FRANCO, A. A.; WATZLAWICK, L. F. Influência de fungos micorrízicos arbusculares sobre o crescimento de três leguminosas arbóreas. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, v. 1, n. 1, p. 27-32, 2003.
- CAPILLERI, P. P.; MOTTA, E.; RACITI, E. Experimental study on native plant root tensile strength for slope stabilization. **Procedia Engineering**, v. 158, p. 116-121, 2016.
- CHAER, G. M.; RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E. F. C.; FARIA, S. M.; ODDEY, R. M. Use nitrogen-fixing legume trees to revegetate degraded lands. **Tree Physiology**, p. 1-11, 2011.
- COLODETE, C. M.; DOBBSS, L. B.; RAMOS, A. C. Aplicação das Micorrizas arbusculares na recuperação de áreas impactadas. **Natureza on line**, v. 12, n. 1, p. 31-37, 2014.
- CORNELINI, P.; FERRARI, R. **Manuale di ingegneria naturalistica per le scuole secondarie**. Regione Lazio: Assessorato all' Ambiente e Cooperazione tra i Popoli, Direzione Ambiente e Cooperazione tra i Popoli, Area Difesa del Suolo, 2008.
- CORREIA, M. E. F. **Potencial de utilização dos atributos das comunidades de fauna de solo e de grupos chave de invertebrados como bioindicadores do manejo de ecossistemas**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia-Documents (INFOTECA-E), 2002.
- COUTO, L.; GONÇALVES, W.; COELHO, A. T.; PAULA, C. C.; GARCIA, R.; AZEVEDO, R. F.; GOMIDE, L. C. **Técnicas de bioengenharia para revegetação de taludes no Brasil**. Viçosa: Centro Brasileiro para Conservação da Natureza e Desenvolvimento Sustentável, 2010.
- CUNHA, C. A. G. **A sub-bacia do rio Jacupiranga: análise dos aspectos sócio-econômicos e ambientais como subsídio para o manejo sustentável da região do Vale do Ribeira de Iguape, São Paulo**. 2010. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- DE QUADROS, P. D.; ZHALNINA, K.; DAVIS-RICHARDSON, A. G.; DREW, J. C.; MENEZES, F. B.; FLÁVIO, A. D. O.; TRIPLET, E. W. Coal mining practices reduce the microbial biomass, richness and diversity of soil. **Applied Soil Ecology**, v. 98, p. 195-203, 2016.
- DHITAL, Y. P.; TANG, Q. Soil bioengineering application for flood hazard minimization in the foothills of Siwaliks, Nepal. **Ecological Engineering**, v. 74, p. 458-462, 2015.

DIAS, L. E.; ASSIS, I. R. Restauração ecológica em áreas degradadas pela mineração. In: SIMPÓSIO DE RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA: DESAFIOS ATUAIS E FUTUROS, 6, 2011. **Anais...** São Paulo: Instituto de Botânica / SMA, 2011.

DONTALA, S. P.; REDDY, T. B.; VADDE, R. Environmental Aspects and Impacts its Mitigation Measures of Corporate Coal Mining. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 11, p. 2-7, 2015.

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

EGGERT, R. G. Mining and environment: an introduction and overview. In: EGGERT, R. G. **Mining and the environment**: international perspectives on public policy. Washington, DC: Resources for the Future, 1994. p. 1-20.

ESPINDOLA, J. A. A. GUERRA, J. G. M.; DE-POLLI, H.; DE ALMEIDA, D. L.; ABOUD, A. D. S. **Adubação verde com leguminosas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2005.

EUBANKS, C. E.; MEADOWS, D. **A soil bioengineering guide**: for streambank and lakeshore stabilization. Washington: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Technology and Development Program, [2002].

EVETTE, A.; LABONNE, S.; REY, F.; LIEBAULT, F.; JANCKE, O.; GIREL, J. History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in Western Europe. **Environmental Management**, v. 43, n. 6, p. 972-984, June 2009.

FERNANDES, J. P.; FREITAS, A. R. M. **Introdução à engenharia natural**. Lisboa: Empresa Portuguesa de Águas Livres, 2011. v. 2.

FORNASARI FILHO, N.; SAMPAIO, A. J. M.; OLIVEIRA, A. M. S. O.; LEITE, C. A. G.; PRANDINI, F. L.; NAKASU, L. Geologia aplicada à disposição de rejeitos de mineração: a problemática e contribuições à diagnose e solução. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3., 1981, Itapema. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 3, p. 355-373.

FRANCO, A. A.; CAMPELLO, E. F.; MONTEIRO, E. D. S.; FARIA, S. M. **Revegetação de solos degradados**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia-Comunicado Técnico, 1992. (INFOTECA-E).

FRANTI, T. G. **Bioengineering for hillslope, streambank and lakeshore erosion control**. Lincoln: University of Nebraska, Lincoln Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, 2013.

FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L. E.; PRATES, V.; WREGGE, M. S. Caracterização ambiental de duas regiões do Bioma Mata Atlântica no Paraná e sua importância para estudos em serviços ambientais. In: PARRON, L. M. et al. (Ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, p. 47-56, 2015.

GALVÃO, T. C. D. B.; PEREIRA, A. R.; PARIZZI, M. G.; SILVA, H. A. Bioengineering techniques associated with soil nailing applied to slope stabilization and erosion control. **Natural Hazards Review**, v. 11, n. 2, p. 43-48, 2010.

GARAY, A. G.; COSTA, M. R. M. M.; MATTANA JUNIOR, A. Avaliação do desempenho de areias calcárias para utilização em argamassas de revestimento. **Iniciação Científica Cesumar**, v. 13, n. 1, 2010.

GEOCONSULTORIA. **Plano de recuperação de áreas degradadas (PRAD) da atividade de mineração do Complexo**. Cajati, 2003. 30 p.

GOEDERT, W. J.; CORREA, R. S. Usos, degradação e qualidade do solo. In: CORRÊA, R. S.; BAPTISTA, G. M. M. (Org.). **Mineração e áreas degradadas no cerrado**. Brasília: Universa, 2004. p. 159-172.

GOEDERT, W. J.; CORRÊA, R. S. Usos, degradação e qualidade do solo. In: CORRÊA, R. S.; BAPTISTA, G. M. M. (Org.). **Mineração e áreas degradadas no cerrado**. Brasília: Universa, 2004. cap. 8, p. 159-172.

GOMES, L. G. N. **A bioengenharia como ferramenta para restauração ambiental das margens do rio São Francisco**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, 2005.

GOOGLE EARTH. **Vista do Talude da pilha de estéril no Complexo Minerquímico de Cajati, SP**. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/>>. Acesso em: 3 maio 2013.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control**. New York: John Wiley & Sons, 1996. 337 p.

GREENWAY, H. R. V.; RELLA, A. J.; MILLER, J. K. **Engineered approaches for limiting erosion along sheltered shorelines**. Hoboken: Stevens Institute of Technology, 2012. (The Hudson River Sustainable Shorelines Project).

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.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2012. 275 p. (Série Manuais Técnicos em Geociências, 1).

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha Justus Perthes, 1928. Wall-map 150 cm x 200 cm.

KRONKA, F. J. N. (Coord.). **Inventário florestal da vegetação natural do Estado de São Paulo: regiões administrativas de São José dos Campos (litoral), Baixada Santista e Registro**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente / Imprensa Oficial, 2007. 140 p.

KRONKA, F. J. N.; NALON, M. A.; MATSUKUMA, C. K.; KANASHIRO, M. M.; YWANE, M. S. S.; PAVÃO, M.; DURIGAN, G.; LIMA, L. P. R.; GUILLAUMON, J. R.; BAITELLO, J. B.; BORGIO, S. C.; MANETTI, L. A.; BARRADAS, A. M. F.; FUKUDA, J. C.; SHIDA, C. N.; MONTEIRO, C. H. B.; PONTINHAS, A. A. S.; ANDRADE, G. G.; BARBOSA, O.; SOARES, A. P.; JOLY, C. A.; COUTO, H. T. Z. **Inventário florestal da vegetação nativa do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente / Instituto Florestal / Imprensa Oficial, 2005. 200 p.

LA MANTIA, T.; MESSANA, G.; BILLECI V.; DIMARCA, A.; DEL SIGNORE, M. B.; LEANZA, M.; CONSOLE, S. L.; MARAVENTANO, G.; NICOLINI, G.; PRAZZI, E.; QUATRINI, P.; SANGUEDOLCE, F.; SORRENTINI, G.; PSTA, SALVATORE. Combining bioengineering and plant conservation on a mediterranean islet. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v. 5, p. 296-305, 2012.

LEINFELDER, R. R.; IRAMINA, W, S.; ESTON, S. M. Mining as a tool for reclamation of a degraded area. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 68, n. 2, p. 215-220, 2015.

LEWIS, L. **Soil Bioengineering**: an alternative for roadside management: a practical guide. Califórnia: United States Department of Agriculture Forest Service, 2000.

LI, M.-H.; EDDLEMAN, K. E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: a biotechnical streambank stabilization design approach. **Landscape and Urban Planning**, v. 60, n. 4, p. 225-242, 2002.

LI, X.; ZHANG, L.; ZHANG, Z. Soil bioengineering and the ecological restoration of riverbanks at the Airport Tow, Shanghai, China. **Ecological Engineering**, v. 26, p. 304-314, 2006.

MAIA, C. M. B. F.; PARRON, L. M. Matéria orgânica como indicador da qualidade do solo e da prestação de serviços ambientais. In: parron, L. M. et al. (Ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília: Embrapa, p. 101-108, 2015.

MARTINHO, H. M. **Avaliação da efetividade de arranjos tecnológicos e processuais na melhoria do desempenho ambiental da produção de fosfato bicálcio**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MATEUS, G. P.; WUTKE, E. B. Espécies de leguminosas utilizadas como adubos verdes. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 1-15, jan./jun. 2006.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010.

MELO, F. V.; BROWN, G. G.; CONSTANTINO, R.; LOUZADA, J. N.; LUIZÃO, F. J. MORAIS, J. W.; ZANETTI, R. A importância da meso e macrofauna do solo na fertilidade e como bioindicadores. **Boletim Informativo da SBCS**, p. 39, jan./abr. 2009.

MENDES, I. C. SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 191-209, 2017.

MOSCATELLI, M.C.; ROMAGNOLI, M.; CENFI, S.; LAGOMARSINO, A.; DI TIZIO, A.; SPINA, S.; GREGO, S. Wood-soil interactions in soil bioengineering slope stabilizations works. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v. 2, p. 187-191, Oct. 2009.

MUKHOPADHYAY, S.; MAITI, S. K.; MASTO, R. E. Use of reclaimed mine soil index (RMSI) for screening of tree species for reclamation of coal mine degraded land. **Ecological Engineering**, v. 57, p. 133-142, 2013.

NASCIMENTO, J. T.; SILVA, I. F.; SANTIAGO, R. D.; SILVA NETO, L. F. Efeito de leguminosas nas características químicas e matéria orgânica de um solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 457-462, 2003.

NERI, A. C.; SÁNCHEZ, L. E. **Guia de boas práticas de recuperação ambiental em pedreiras e minas de calcário**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2012.

NOGUEIRA, N. O.; OLIVEIRA, O. M.; MATINS, C. A. D.; BERNARDES, C. O. Utilização de leguminosas para recuperação de áreas degradadas. In: **Enciclopédia Biosfera - Centro Científico Conhecer, Goiânia**, v. 8, n. 14, p. 2131, jun. 2012.

NUSSBAUMER, Y.; COLE, M. A.; OFFLER, C. E. Identifying and ameliorating nutrient limitations to reconstructing a forest ecosystem on mined land. **Restoration Ecology**, v. 24, n. 2, p. 202-2011, 2016.

PADOVAN, M. P.; SILVA, R. F. **Adubação verde-opções para outono/inverno, primavera/verão e espécies perenes**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. (INFOTECA-E).

PAULETTI, V.; PIERRI, L. D.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Long-term effects of the application of gypsum and lime in a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 495-505, 2014.

PELIZER, L. H.; PONTIERI, M. H.; MORAES, I. O. Utilização de resíduos agro-industriais em processos biotecnológicos como perspectiva de redução do impacto ambiental. **Journal of Technology Management & Innovation**, v. 2, n. 1, p. 118-126, 2007.

PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J. G. M.; CECON, P. R. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 35-40, 2004.

PILLON, C. N.; MIURA, A. K.; ALBA, J. M. F. Agricultura no contexto da recuperação de áreas mineradas. **Recuperação de Áreas Mineradas**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. v. 2, p. 31-46.

PINTO, G. M. **Bioengenharia de solos na estabilidade de taludes**: comparação com uma solução tradicional. 2009. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PROMINER PROJETOS LTDA. **Godinho Estudo de Impacto Ambiental – EIA**: Bunge Fertilizantes, Cajati – SP (Processo SMA 13.623/03). São Paulo: Prominer Projetos Ltda., 2009. 10 volumes. (Relatório elaborado para Bunge Fertilizantes S/A).

RASHID, M. I.; MUJAWAR, L. H.; SHAHZAD, T.; ALMEELBI, T.; ISMAIL, I. M.; OVES, M. Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. **Microbiological Research**, v. 183, p. 26-41, 2016.

REY, F.; BURYLO, M. Can bioengineering structures made of willow cuttings trap sediment in eroded marly gullies in a Mediterranean mountainous climate?. **Geomorphology**, v. 204, p. 564-572, 2014.

RIBEIRO, A. I. **Mecanização no preparo de solo em áreas degradadas por mineração na Floresta Nacional do Jamari (Rondonia-BR)**. 2005. 172 f. (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

RIBEIRO, A. I.; SOLERA, M. L.; NAHUZ, M. A. R.; LONGO, R. M.; CAMPOS, S. J. A. M.; FENGLER, F. H. Engenharia natural aplicada em taludes de Bota-Fora: uma análise preliminar da solo-retenção. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 10., 2014, Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: SINRAD, 2014.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).

ROSA, P. A. L.; ALVES, M. C.; VIDEIRA, L. M. L.; BONINI, C. S. S. Recuperação de um solo de cerrado após 19 anos: ocorrência espontânea de espécies arbóreas. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 1, n. 1, p. 44-57, 2015.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 1, p. 17-43.

SÁNCHEZ, L. E. Planejamento e gestão do processo de recuperação de áreas degradadas. In: ALBA, J. M. F. (Ed.). **Recuperação de áreas mineradas**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. p. 103-121.

SCARANARI, H. J.; INFORZATO, R. Sistema radicular das principais leguminosas empregadas como adubo verde em cafezal. **Bragantia**, v. 12, n. 7-9, p. 291-296, 1952.

SCHIECHTL, H. M. **Bioengineering for land reclamation and conservation**. Edmonton: University of Alberta Press, 1980.

SETZER, J. **Atlas Climático e Ecológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguaí, 1966. 61 p.

SILVA, R. B.; BECKER, R. G.; MACHADO, T. F.; DORNELLES, J. E. Monitoramento de áreas em recuperação: padrões de colonização da comunidade de vertebrados terrestres. In: ALBA, J. M. F. (Ed.). **Recuperação de áreas mineradas**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010, p. 181-221.

SKALSKI JUNIOR, J. O processo da Petrobras na recuperação das áreas mineradas para a exploração do xisto em São Mateus do Sul, PR. In: ALBA, J. M. F. (Ed.). **Recuperação de áreas mineradas**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. p. 257-279.

SOLERA, M. L.; GALLARDO, A. L. C. F.; SOUZA, C. A.; LONGO, M. H. C.; BRAGA, T. O. Bioengenharia de solos: aplicabilidade na recuperação de áreas mineradas e na oferta de serviços ambientais. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, v. 34, p. 46-59, 2014.

SOUZA, R. Técnicas de engenharia natural como ferramenta de RAD. In: SIMPÓSIO NACIONAL RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS: REVENDO PRINCÍPIOS / VALIDANDO CONCEITOS, 11., 2017, Curitiba. **Apresentação...** Curitiba: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 2017.

SRIVASTAVA, N. K.; RAM, L. C.; MASTO, R. E. Reclamation of overburden and lowland in coal mining area with fly ash and selective plantation: A sustainable ecological approach. **Ecological Engineering**, v. 71, p. 479-489, 2014.

STOKES, A.; DOUGLAS, G. B.; FOURCAUD, T.; GIADROSSICH, F.; GILLIES, C.; HUBBLE, T.; KIM, J. H.; LOADES, K. W.; MAO, Z.; MCIVOR, I. R.; MICKOVSKI, S. B.; MITCHELL, S.; OSMAN, N.; PHILLIPS, C.; POESEN, J.; POLSTER, D.; PRETI, F.; RAYMOND, P.; REY, F.; SCHWARZ, M.; WALKER, L. R. Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. **Plant and Soil**, v. 377, n. 1-2, p. 1-23, 2014.

STOKES, A.; SOTIR, R.; CHEN, W.; GHESTEM, M. Soil bio- and eco-engineering in China: past experience and future priorities. **Preface Ecological Engineering**, v. 36, n. 3, p. 247-257, 2010.

STUMPF, L; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. **Soil and Tillage Research**, v. 161, p. 71-78, 2016.

SUTILI, F. J. **Bioengenharia de solos no âmbito fluvial do sul do Brasil**. 2007. 94 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Perigos Naturais, Instituto de Bioengenharia de Solos e Planejamento da Paisagem, Universidade Rural de Viena, Viena, 2007.

URQUIAGA, S.; SISTI, C.; ZOTARELLI, L., ALVES, B., BODDEY, R. Manejo de sistemas agrícolas para seqüestro de carbono no solo. **Conhecimentos e técnicas avançadas para o estudo dos processos da biota no sistema solo-planta**. Brasília: Embrapa, p. 257-273, 2005.

VENTI, D. et al. **Manuale tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni, Applicabilità delle tecniche, limiti e soluzioni**. Provincia di Terni: Provincia di Terni Servizio Assetto del Territorio-Ufficio Urbanistica / Agenzia Umbria Ricerche, 2003.

VERGANI, C.; GRAF, F. Soil permeability, aggregate stability and root growth: a pot experiment from a soil bioengineering perspective. **Ecohydrology**, v. 9, n. 5, p. 830-842, 2016.




YANG, S. X.; LIAO, B., YANG, Z. H., CHAI, L. Y., LI, J. T. Revegetation of extremely acid mine soils based on aided phytostabilization: A case study from southern China. **Science of The Total Environment**, v. 562, p. 427-434, 2016.




ZHANG, L.; WANG, J.; BAI, Z.; CHUNJUAN, L. V. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. **Catena**, v. 128, p. 44-53, 2015.



ZHAO, Z.; SHAHROUR, I.; BAI, Z.; FAN, W.; FENG, L.; LI, H. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China. **European Journal of Soil Biology**, v. 55, p. 40-46, 2013.

APÊNDICE A


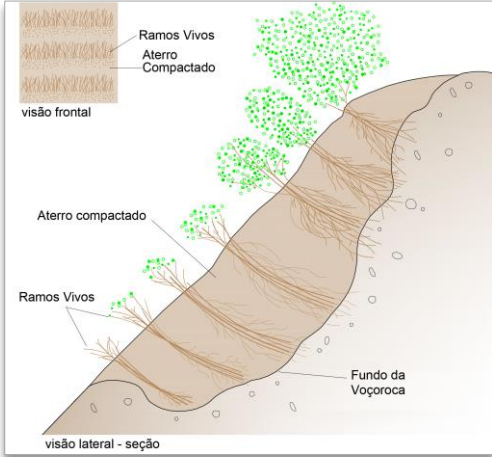

Quadro 1 - Ilustração, descrição e aplicação de algumas técnicas/métodos de bioengenharia de solos.


	Descrição	Campo de Aplicação
<p><i>Brush Layering / Brush Layering: Fill Method</i></p> <p>Gray e Sotir (1996); Eubanks e Meadows ([2002])</p>  <p>Fonte: Eubanks e Meadows ([2002])</p>	<ul style="list-style-type: none"> camadas de ramos vegetativos intercalados com camada de solo que são entrelaçados ou sobrepostos dispostas na horizontal e perpendicular à face do talude 	<ul style="list-style-type: none"> estabilizar encostas com deslizamentos superficiais; proteger as encostas de erosões
<p><i>Branchpacking/ Branch Packing</i></p> <p>Gray e Sotir (1996); Eubanks e Meadows ([2002]); Greenway, Rella e Miller (2012)</p>  <p>Fonte: Eubanks e Meadows ([2002])</p>	<ul style="list-style-type: none"> camadas de ramos vegetativos alternadas e preenchidas com solo 	<ul style="list-style-type: none"> reparar pequenas depressões em taludes; reduzir a erosão superficial; retardar o escoamento superficial
<p><i>Brush Mattress / Esteira de Ramagem / Esteira Viva</i></p> <p>Eubanks e Meadows ([2002]); Greenway, Rella e Miller (2012); Durlo e Sutili (2005); Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p>Fonte: Eubanks e Meadows ([2002])</p>	<ul style="list-style-type: none"> ramos vegetativos dispostos perpendicularmente à direção do escoamento que se fixam ao solo com auxílio arames sustentados por troncos de madeira 	<ul style="list-style-type: none"> restaurar a vegetação ciliar e habitats

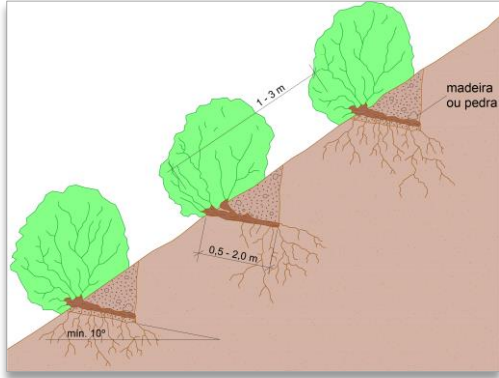


<i>Barreiras de Contenção de Solo</i>	Descrição	Campo de Aplicação
<p>Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p>Fonte: Fernandes e Freitas (2011)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ estacas de madeira cravadas atrás de troncos de madeiras dispostos na horizontal como base para a construção de leitos com ramos vegetativos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ consolidar superfície de solos erodidos
<i>Biorolos</i>	Descrição	Campo de Aplicação
<p>Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p>Fonte: Souza (2017; slide 45)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ rolo de fibra de coco e estacas, tronco de madeira, material vegetal (estacas vegetativas) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ estabilizar margens fluviais
<i>Deflectores (Esporões) Vivos</i>	Descrição	Campo de Aplicação
<p>Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p>Fonte: Fernandes e Freitas (2011)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ estrutura construída em madeira, pedra e material vegetal, dispostos na transversal ou longitudinalmente ao escoamento das águas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ reduzir a velocidade da água e estabilizar margens




<i>Fascines with Subsurface Interceptor Drain</i>	Descrição	Campo de Aplicação
Gray e Sotir (1996)  Fonte: Gray e Sotir (1996)	<ul style="list-style-type: none"> linhas de feixes instalados nas curvas de nível, dreno subsuperficial orientado na direção da encosta abaixo e perpendicular aos feixes colocado em trincheira axial, abaixo dos feixes para interceptar e coletar a água subsuperficial 	<ul style="list-style-type: none"> direcionar a drenagem de encostas úmidas com insurgência de água subsuperficial e em áreas com boçorocas aterradas, ravinas ou depressões
<i>Gabiões Vivos</i>	Descrição	Campo de Aplicação
Fernandes e Freitas (2011)  Fonte: Fernandes e Freitas (2011)	<ul style="list-style-type: none"> estrutura retangular feita com rede de malha hexagonal em arame galvanizado preenchida com pedra e estacas vegetativas em seu interior dispostas de forma irregular. <p>Obs.: técnica não inserida na Engenharia Natural, pois a vegetação não substitui as funções de suporte de gabião</p>	<ul style="list-style-type: none"> proteger margens de rios e taludes erodidos
<i>Geotexteis e Geomalhas Vivas</i>	Descrição	Campo de Aplicação
Fernandes e Freitas (2011)  Fonte: Fernandes e Freitas (2011)	<ul style="list-style-type: none"> mantas orgânicas, geotêxteis e redes metálicas como sistema de cobertura superficial, utilizando sementes, estacas vegetativas ou planta enraizadas 	<ul style="list-style-type: none"> áreas com erosão laminar e ravinas; consolidar linhas de drenagem e margens de rios, taludes declivosos

<i>Hidrossementeira</i>	Descrição	Campo de Aplicação
<p data-bbox="379 315 668 344">Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p data-bbox="341 741 707 770">Fonte: Fernandes e Freitas (2011)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="852 423 1165 618">▪ mistura de água com mulch (fibras de madeira), sementes, fertilizantes, corretivos/aditivos biológicos do solo 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1195 439 1445 568">▪ taludes e margens fluviais com processos erosivos
<i>Leito de Vegetação ou de Ramagens / faixa de Vegetação</i>	Descrição	Campo de Aplicação
<p data-bbox="379 904 668 934">Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p data-bbox="341 1330 707 1359">Fonte: Fernandes e Freitas (2011)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="852 994 1165 1256">▪ abertura de sulcos em linhas onde ramos ou estacas vegetativas são dispostos de forma perpendicular à superfície da encosta, podendo ser utilizada mantas orgânicas 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1195 1043 1445 1137">▪ estabilizar taludes e encostas
<i>Live Fascines / Fascina Viva / Feixe Vivo</i>	Descrição	Campo de Aplicação
<p data-bbox="236 1458 813 1545">Gray e Sotir (1996); Eubanks e Meadows ([2002]); Fernandes e Freitas (2011); Greenway, Rella e Miller (2012)</p>  <p data-bbox="363 1942 686 1971">Fonte: Souza (2017; slide 43)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="852 1529 1165 1861">▪ feixes vegetativos de fácil propagação posicionados e fixados por estacas de madeira; instalados tanto em trincheiras rasas e cobertas com solo ou mesmo superficialmente em taludes de corte e aterro 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1195 1547 1445 1641">▪ proteger e consolidar margens; <li data-bbox="1195 1648 1445 1843">▪ estabilizar taludes de corte e aterro na prevenção de erosão e risco de ravinamento

<p><i>Live Fascines Used in Pole Drains</i></p> <p>Gray e Sotir (1996)</p>  <p>Fonte: Gray e Sotir (1996)</p>	<p>Descrição</p> <ul style="list-style-type: none"> linhas de feixes vegetativos instalados em forma de V e conectados a um dreno central; seções laterais compostas por um único feixe vegetativo; dreno central (coletor principal) composto por três fardos de feixes 	<p>Campo de Aplicação</p> <ul style="list-style-type: none"> sistema utilizado em encostas úmidas com insurgência de água subsuperficial onde há risco de ocorrer desestabilização do terreno
<p><i>Live Gully Repair Fill</i></p> <p>Gray e Sotir (1996)</p>  <p>Fonte: modificado de Gray e Sotir (1996)</p>	<p>Descrição</p> <ul style="list-style-type: none"> aterro vivo alternando camadas estacas de ramos vegetativos de 0,01 m a 0,05 m de diâmetro com solo compactado 	<p>Campo de Aplicação</p> <ul style="list-style-type: none"> recompor ravinas e pequenas boçorocas em encostas naturais
<p><i>Trança Viva / Entrançados Vivos</i></p> <p>Durlo e Sutili (2005); Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p>Fonte: Fernandes e Freitas (2011)</p>	<p>Descrição</p> <ul style="list-style-type: none"> feixes vegetativos entrelaçados e dispostos junto a linha d'água 	<p>Campo de Aplicação</p> <ul style="list-style-type: none"> linhas d'água e proteção de margens fluviais

<p><i>Live Stakes / Estacas Vivas / Estacaria Viva</i></p> <p>Gray e Sotir (1996); Durlo e Sutili (2005); Eubanks e Meadows ([2002]); Fernandes e Freitas (2011); Greenway, Rella e Miller (2012)</p>  <p>Fonte: Souza (2017; slide 41)</p>	<p>Descrição</p> <ul style="list-style-type: none"> estacas vegetativas em linhas, como primeiro tratamento, sozinha ou em feixes de vegetação amarrados com fibras naturais. 	<p>Campo de Aplicação</p> <ul style="list-style-type: none"> taludes e margens fluviais de baixa declividade
<p><i>Live Slope Grating / Grade Viva</i></p> <p>Gray e Sotir (1996); Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p>Fonte: Souza (2017; slide 49)</p>	<p>Descrição</p> <ul style="list-style-type: none"> troncos de madeira dispostos perpendicularmente entre si, sustentada por troncos de madeira cravados no solo, com a colocação de estacas vegetativas e solo nos interstícios 	<p>Campo de Aplicação</p> <ul style="list-style-type: none"> estabelecer a vegetação e consolidar taludes muito inclinados
<p><i>Sementeira</i></p> <p>Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p>Fonte: Fernandes e Freitas (2011)</p>	<p>Descrição</p> <ul style="list-style-type: none"> mix de sementes herbáceas, arbustivas ou arbóreas lançadas de forma manual ou mecânica 	<p>Campo de Aplicação</p> <ul style="list-style-type: none"> áreas com superfícies planas ou irregulares com processor erosivos

<i>Tiered Wall With Bench Planting / Plantio em banquetas</i>	Descrição	Campo de Aplicação
<p>Gray e Sotir (1996); Durlo e Sutili (2005)</p>  <p>Fonte: modificado de Durlo e Sutili (2005)</p>	<ul style="list-style-type: none"> plântio realizado em canteiros escavados utilizando espécies arbustivas em oposição às arbóreas para atenuar a sobrecarga do peso sobre o talude 	<ul style="list-style-type: none"> implantar a vegetação em taludes com declividades elevadas e encostas fluviais
<i>Terra Reforçada</i>	Descrição	Campo de Aplicação
<p>Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p>Fonte: Fernandes e Freitas (2011)</p>	<ul style="list-style-type: none"> manta geotêxtil orgânica reforçada ou não com redes de aço ou plástico preenchidas com solo, finalizando com a aplicação de estacas vegetativas, hidrossemeadura, ou plantas em torrão 	<ul style="list-style-type: none"> reconstrução de taludes muito inclinados
<i>Vegetated Geogrids</i>	Descrição	Campo de Aplicação
<p>Gray e Sotir (1996); Eubanks e Meadows ([2002]); Greenway, Rella e Miller (2012)</p>  <p>Fonte: Eubanks e Meadows ([2002])</p>	<ul style="list-style-type: none"> ramos vegetativos intercalados entre camadas de solo envolto com mantas geossintéticas ou mantas de fibras naturais. 	<ul style="list-style-type: none"> estabilizar encostas muito íngreme; proteger encosta com erosão; estabilizar taludes e reforçar taludes de aterro com drenagem; reconstruir margens de rios

<p><i>Barragem de Correção Torrencial</i></p> <p>Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p>Fonte: Fernandes e Freitas (2011)</p>	<p>Descrição</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ barragem em madeira, pedras e vegetação, construída na transversal em relação ao sentido do escoamento da água 	<p>Campo de Aplicação</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ obras de consolidação com função de diminuir a velocidade da água à montante e à jusante; ▪ sustentação do terreno; ▪ consolidação de materiais instáveis
<p><i>Live Crib Walls / Muros de Suporte Vivo / Parede Krainer</i></p> <p>Gray e Sotir (1996); Eubanks e Meadows ([2002]); Durló e Sutili (2005); Fernandes e Freitas (2011) Greenway, Rella e Miller (2012)</p>  <p>Fonte: Souza - (2017; slide 46)</p>	<p>Descrição</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ estrutura de contenção utilizando toras de madeira dispostas perpendicularmente (simples, com uma parede longitudinal frontal ou dupla com duas paredes longitudinais), preenchida com solo e estacas ou ramos vegetativos 	<p>Campo de Aplicação</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ estabilizar taludes declivosos; ▪ controlar erosão de margem fluviais íngremes
<p><i>Enrocamento Vivo</i></p> <p>Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p>Fonte: Fernandes e Freitas (2011)</p>	<p>Descrição</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ obra longitudinal nas margens pedras nas margens e estacas vegetativas 	<p>Campo de Aplicação</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ estabilizar o solo das margens dos rios por meio do sistema radicular da vegetação

<i>Soleiras</i>	Descrição	Campo de Aplicação
<p data-bbox="379 322 667 349">Fernandes e Freitas (2011)</p>  <p data-bbox="341 757 705 784">Fonte: Fernandes e Freitas (2011)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="852 474 1161 604">▪ obras transversais construídas com pedras e troncos de madeira após alargamento do leito. 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1193 430 1449 658">▪ estabilizar / consolidar leitos de linha d'água com inclinação de média a baixa de fundo pedregoso

Fonte: Elaborado pela autora.