

## BIOENGENHARIA DE SOLOS: APLICABILIDADE NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS MINERADAS E NA OFERTA DE SERVIÇOS AMBIENTAIS

### SOIL BIOENGINEERING: ITS APPLICABILITY IN MINING AREAS RECOVERY AND IN THE PROVISION OF ENVIRONMENTAL SERVICES

**Maria Lucia Solera**

Bióloga, Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Unesp-Sorocaba, Pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, SP, Brasil. lucinha@ipt.br

**Amarilis Lucia C. F. Gallardo**

Doutora em Engenharia, Profa. do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Profa. do Programa de Mestrado em Gestão Ambiental e Sustentabilidade e do Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Uninove – Campus Memorial, São Paulo, SP, Brasil. amarilis@uninove.br

**Caroline Almeida Souza**

Eng. Florestal, Mestre em Economia Ecológica, Pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, SP, Brasil. caroline@ipt.br

**Mariana H. Carneseca Longo**

Bióloga, Mestre em Conservação de Ecossistemas Florestais, Pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, SP, Brasil. marihc@ipt.br

**Tania de Oliveira Braga**

Geóloga, Pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, SP, Brasil. taniabrg@ipt.br

## RESUMO

Esta pesquisa discute a aplicabilidade de técnicas de bioengenharia de solos na recuperação de áreas degradadas por mineração e a maximização da provisão dos serviços ambientais associados. Os objetivos desta pesquisa são: i) identificar a aplicabilidade das técnicas de bioengenharia de solos para atenuar ou incrementar os efeitos dos processos naturais (biofísicos) em áreas mineradas; ii) analisar a aplicabilidade da bioengenharia de solos na fase de recuperação de áreas degradadas por mineração; iii) identificar os potenciais serviços ambientais associados a áreas mineradas a serem recuperadas com técnicas de bioengenharia de solos. Foram identificadas e caracterizadas as técnicas de bioengenharia de solos aplicadas no Brasil. Os serviços ambientais, associados a essas técnicas, foram agrupados nas seguintes categorias: suporte, regulação e cultura, com destaque para aqueles relacionados com o aumento das reservas de carbono, formação de habitats, aumento da biodiversidade, e melhoria das condições físicas do solo.

**Palavras-Chave:** recuperação vegetal, serviços ambientais, recuperação de áreas mineradas.

## ABSTRACT

This study discusses the applicability of soil bioengineering techniques in recovering degraded areas due to the mining activity and the maximized provision of associated environmental services. The objectives of this study are: i) to identify the applicability of soil bioengineering techniques in attenuating or enhancing the effects of natural (biophysical) processes in mining areas; ii) to analyze the applicability of soil bioengineering in the recovery phase of degraded areas by the mining activity; iii) to identify the potential environmental services associated to mining areas to be recovered with the use of soil bioengineering techniques. Soil bioengineering techniques currently applied in Brazil were identified and characterized. The environmental services, associated to them, were grouped into the following categories: support, regulation and culture, highlighting the ones related to carbon stocks increase, habitats formation, biodiversity increase, and improvement of soil physical conditions.

**Keywords:** vegetal recovery, environmental services, recuperation of mining areas.

## RESUMÉN

Esta investigación analiza la aplicabilidad de las técnicas de bioingeniería de suelo para la recuperación de áreas mineras degradadas y la maximización de la prestación de los servicios ambientales asociados. Los objetivos de esta investigación son: i) identificar la aplicabilidad de las técnicas de bioingeniería de suelo para reducir o aumentar los efectos de los procesos naturales (biofísicos) en las zonas minadas; ii) analizar la aplicación de la bioingeniería de suelos en la recuperación de áreas degradadas por la minería; iii) identificar los potenciales servicios ambientales asociados a las áreas de minería y que deberán ser recuperadas con técnicas de bioingeniería de suelos. Fueron identificadas y caracterizadas las técnicas de bioingeniería de suelos aplicadas en Brasil. Los servicios ambientales, asociados a esas técnicas, se agruparon en las siguientes categorías: el apoyo, la regulación y la cultura especialmente, los relacionados con el aumento de las reservas de carbono, formación de hábitats, acréscimo de la biodiversidad, y mejoría de las condiciones físicas del suelo.

**Palabras-Clave:** recuperación vegetal, servicios ambientales, recuperación de áreas mineradas.

## INTRODUÇÃO

A etapa de recuperação pós-uso da mineração consiste em uma obrigatoriedade legal no país desde 1989 (Decreto Federal nº 97.632/1989) e, de acordo com Almeida e Sánchez (2005, p.47), “[...] a recuperação de áreas degradadas pela mineração normalmente envolve atividades que têm o objetivo de restabelecer a vegetação”. A revegetação tem sido uma medida adotada com regularidade, principalmente, em minas localizadas em zonas rurais (BITAR, 1997). Os primeiros trabalhos sistemáticos de recuperação de áreas mineradas visavam a revegetação rápida para recobrimento do solo que, na maioria dos casos, tinha como motivação apenas o controle da erosão (estabilidade física) e o cumprimento de exigência legal (DIAS; ASSIS, 2011), ou ainda com vistas à atenuação do impacto visual (MECHI; SANCHES, 2010), porém sem atingir o patamar esperado quanto ao sucesso em termos ecológicos (ALMEIDA; SÁNCHEZ, 2005).

Desde os levantamentos de Griffith, Dias e Jucksch (1994), que destacavam a recorrência das práticas de reflorestamentos homogêneos com espécies exóticas, notadamente eucalipto e pinus, e o uso intensivo da hidro-semeadura com gramíneas, técnica do tapete verde, historicamente, o uso de espécies nativas, limita-se a áreas indicadas pelos órgãos ambientais, principalmente, áreas de preservação permanente, como indicado por Bitar (1997) e, reforçado por Almeida e Sánchez (2005).

Nos últimos vinte anos, o conhecimento acumulado sobre a dinâmica das formações naturais e a experiência adquirida na restauração de áreas degradadas tem conduzido a uma significativa mudança na orientação dos projetos de recuperação (JAKOVAC, 2007), com vistas a conciliar velocidade no recobrimento do solo aos objetivos ecológicos de uma abordagem sucessional, cuja importância vinha sendo destacada (GRIFFITH; DIAS; JUCKSCH, 1996).

De acordo com Ferreira *et al.* (2010), há pouca pesquisa no Brasil acerca da avaliação do sucesso dos reflorestamentos e eficiência de técnicas empregadas para recuperar ambientes degradados. Mechí e Sanches (2010) destacam que as áreas mineradas, frequentemente situadas em locais de importância para a preservação da biodiversidade e dos recursos hídricos, não oferecem condições para propiciar regeneração natural, devendo ser prospectadas técnicas adequadas para recuperar o ambiente degradado.

A discussão sobre as boas práticas da etapa de recuperação de áreas mineradas, o que inclui o componente vegetal em termos de biodiversidade, vem ganhando relevância no setor mineral (NERI; SÁNCHEZ, 2012). No caso de minerações inseridas em biomas importantes, é recomendável a restauração de ecossistemas florestais a qual pode ser estimulada pelo plantio de espécies facilitadoras de sucessão natural, de modo a proporcionar atração da fauna, crescimento vegetal rápido e grande deposição de serapilheira (CHADA; CAMPELLO; FARIA, 2004).

Com vistas a diversificar as técnicas de recuperação de áreas degradadas por mineração, para além das convencionalmente aplicadas, encontra-se a bioengenharia de solos, uma tecnologia que, segundo Durlo e Sutili (2005), emprega o uso de materiais vivos, isolados ou combinados com materiais inertes para estabilização de margens de cursos d’água e taludes naturais ou construídos. Na bioengenharia de solos, as espécies vegetais são arranjadas em distintos modelos construtivos, conjugando funcionalidade estrutural e ecológica, para recuperar ambientes em diferentes contextos de degradação (GRAY; SOTIR, 1995; SUTILI, 2007; EVETTE *et al.*, 2009; FERNANDES; FREITAS, 2011).

A bioengenharia de solos prioriza as conexões biológicas e as interações ambientais resultantes permitindo usar a matéria-prima vegetal existente no entorno com eficiência técnica (HOLANDA; ROCHA; OLIVEIRA, 2008). Tem por premissa minimizar o grau de artificialidade em suas intervenções (FERNANDES; FREITAS, 2011), não só por privilegiar a vegetação como elemento estrutural, mas também por utilizar materiais inertes naturais, como pedras e madeira, esta última, por meio de sua decomposição, cria condições para que a vegetação se reestabeleça na área degradada (MOSCATELLI *et al.*, 2009).

Na perspectiva de sustentabilidade ambiental, a manutenção dos estoques físicos de capital natural ou o provimento das funções e processos ecológicos podem ser mensurados pelos serviços ambientais providos (CAVALCANTI, 2004). Os

serviços ambientais podem ser entendidos como os benefícios obtidos dos ecossistemas de modo direto e indireto (COSTANZA *et al.*, 1997; GROOT; WILSON; BOUMANS, 2002; MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005).

Nesse contexto, insere-se como problema de pesquisa discutir a aplicabilidade de técnicas de bioengenharia de solos na recuperação de áreas mineradas, assumindo que tais técnicas podem ampliar os serviços ambientais oferecidos nessa etapa do ciclo de vida de um empreendimento mineral. Essa pesquisa, exploratória e qualitativa, tem como objetivos: i) identificar a aptidão das técnicas de bioengenharia de solos utilizadas no Brasil para atenuar ou incrementar efeitos dos processos naturais (biofísicos) em áreas mineradas; ii) analisar a aplicabilidade da bioengenharia de solos na fase de recuperação de áreas mineradas; e iii) identificar os potenciais serviços ambientais associados às técnicas de bioengenharia de solos a áreas mineradas a ser recuperadas com técnicas de bioengenharia de solos.

## MATERIAL E MÉTODO

Esta pesquisa tem como base a obtenção e análise de dados coletados em campo. Para que a coleta de dados em campo não só permitisse a identificação e caracterização das técnicas de bioengenharia de solos aplicadas no Brasil, mas também favorecesse a análise dessas técnicas quanto sua aptidão para o controle dos processos biofísicos, sua aplicabilidade na recuperação de áreas mineradas e seu potencial na geração de serviços ambientais, foi utilizado um protocolo adaptado do Barômetro da Sustentabilidade.

### *Protocolo de Coleta e Análise de Dados*

Para orientar e sistematizar a coleta de dados referentes às técnicas de bioengenharia de solos utilizadas no Brasil e os serviços ambientais decorrentes, estabeleceu-se um protocolo adaptado do Barômetro da Sustentabilidade (PRESCOTT-ALLEN, 1997), que é considerado uma das três principais ferramentas de avaliação da sustentabilidade (VAN BELLEN, 2004). Algumas proposições que utilizam essa ferramenta corroboram essa escolha metodológica. Gonçalves e Dziedzic (2012) desenvolveram, com base na mesma, a ferramenta de Diagnóstico Socioambiental Empresarial para auxiliar gestores na tomada de decisão com base em indicadores socioambientais, de sustentabilidade e de desempenho ambiental; Cetrulo, Molina e Malheiros (2013), por sua vez, também utilizaram a mesma para orientar na

elaboração do Barômetro da Sustentabilidade Estadual, garantindo a solidez na utilização da base de dados e a construção de parâmetros de sustentabilidade disponíveis, que foi aplicado para o Estado de Rondônia. O Barômetro da Sustentabilidade é uma ferramenta proposta para mensurar a sustentabilidade de um sistema, pautada em aspectos socioambientais. Essa ferramenta, que pela sua versatilidade e arranjo se presta a cotejamentos, nessa pesquisa é usada para orientar a discussão de proposições similares (técnicas de bioengenharia de solos) em contextos distintos dos quais foi empregada (áreas mineradas).

Na elaboração desse protocolo, foram utilizados os dois primeiros dos seis estágios da ferramenta Barômetro da Sustentabilidade, quais sejam: 1) Definição de processos e metas: entendimento da dinâmica do ambiente da área a ser avaliada; e 2) Identificação de questões e objetivos: características dos ecossistemas e sociedade relacionada ao objeto a investigar. Os demais estágios não foram incluídos, pois extrapolam os objetivos desta pesquisa. Seguindo as premissas da ferramenta foram definidos quatro sistemas a avaliar: área degradada, técnicas de bioengenharia de solos, área recuperada com técnicas de bioengenharia de solos e entorno imediato (Tabelas 1 e 2). No preenchimento do protocolo foram usadas como ferramentas de pesquisa a observação visual e entrevistas semiestruturadas.

Tabela 1 – Estrutura do protocolo de coleta de dados: Sistemas 1 – Área degradada e 2 – Técnicas de bioengenharia de solos.

Sistemas	Metas	Questões principais	Informações a coletar (objetivos)	Meio de obtenção das informações	
Área degradada	Identificar tipo de degradação	Cenário anterior	Como era o local antes da aplicação da técnica de B.S.?(1)	Entrevista	
Técnicas de B.S. utilizadas	Identificar o porquê do uso da B. S.	Motivação do uso da B.S.	Qual o principal fator de decisão para uso da B.S.?(1)/(2)	Entrevista	
	Caracterizar a técnica	Material utilizado	Quais os materiais utilizados e suas características?(1)		
			Qual a procedência do material inerte utilizado?(1)		
			Quais as composições, as dimensões e as quantidades?(1)		
			Qual o tipo de vegetação utilizada?(1)	Entrevista/ Observação	
			Qual o método de plantio utilizado para a vegetação?(1)/(2)	Entrevista	
			Qual a procedência do material vivo utilizado?(1)		
	Instalação da técnica	Qual o período de instalação da técnica?(1)		Entrevista	
		Quais as etapas de instalação da técnica?(1)			
		Quais os principais problemas da instalação?(1)			
		Quais as características da mão de obra?(1)			
		Houve treinamento específico?(1)			
		Quais os problemas enfrentados?(1)			
	Monitoramento e manutenção	Como é ou como foi feito o monitoramento?(1)		Entrevista	
		Quais as principais práticas utilizadas na manutenção?(1)			
		Qual a frequência da manutenção?(1)			
		Quais os principais problemas na manutenção?(1)			
		Qual a taxa de mortalidade das espécies?(1)			
		Após quanto tempo surgiram os primeiros resultados? (1)			
Identificar a percepção de custos e benefícios da aplicação da técnica	Identificação dos custos	Qual o custo da mão de obra na instalação, monitoramento e manutenção?(1)		Entrevista	
		Qual o custo dos materiais na instalação, monitoramento e manutenção?(1)			
	Identificação dos benefícios	Qual a satisfação com os resultados?(1)			
		Quais os principais indicadores que evidenciam os resultados satisfatórios?(2)			

(1) Reconhecer as técnicas de Bioengenharia de Solos (B.S)

(2) Reconhecer os possíveis serviços ambientais associados

Tabela 2 – Estrutura do protocolo de coleta de dados: Sistemas 3 – Área Recuperada com Bioengenharia de Solos (B.S.) e 4 – Entorno Imediato.

Sistemas	Metas	Temas	Informações a coletar (objetivos)	Meio de obtenção
Área recuperada com B.S.	Caracterizar o local da área com B.S.	Uso da área	Qual o uso pretendido para a área?-(1)/(2)	Entrevista
			A área já está sendo utilizada?-(2)	
		Meio físico	Qual o tipo de solo?-(1)	Entrevista Observação
			Qual a declividade do talude?-(1)	
			Ocorrem surgências de água e/ou cursos d'água? (1)	Observação
			Qual a quantidade de morfoespécies vegetais observada na área?-(2)	
	Meio biótico	Qual a quantidade de indivíduos da fauna observados na área?-(2)	Entrevista Observação	
		Há indícios da presença de fauna?-(2)		
		Identificar os possíveis serviços ambientais associados com a recuperação da área	Material utilizado	Qual estado de conservação dos materiais inertes?-(1)
	Qual a funcionalidade dos materiais?-(1)			
	Há solo exposto à erosão?-(2)			
	Meio físico		Ocorre erosão laminar na área?-(2)	
São observados sulcos, ravinas ou boçorocas?-(2)				
É observado assoreamento de planícies aluviais ou corpo d'água?-(2)				
Entorno imediato	Identificar relação entre o entorno e a área recuperada	Paisagem	Quando da ocorrência de ventos, são observadas partículas sólidas no ar provenientes da área?-(2)	Entrevista
			Há indícios de escorregamento?-(2)	
		Paisagem	Qual o contexto em que a área está inserida? (1)	Observação
			Qual o uso e ocupação do solo predominante no entorno?-(2)	
			Há remanescentes florestais no entorno (raio de 50 m)?-(2)	Observação
			Qual o estado de conservação dos remanescentes florestais no entorno?-(2)	
		Social	Foi utilizada mão de obra local? (1)	Entrevista
			A população faz uso direto ou indireto da área? (1)	

(1) – Reconhecer as Técnicas de Bioengenharia de Solos (B.S.)

(2) – Reconhecer os possíveis serviços ambientais associados

As técnicas de bioengenharia de solos investigadas em campo foram então analisadas em termos de:

Aplicabilidade quanto ao potencial de uso em áreas de mineração. Adotou-se escala, relativa e qualitativa, que determina em duas categorias extremas (elevada ou restrita) a aptidão da técnica aos contextos degradados mais comumente encontrados em atividades minerárias. Para tanto, foram utilizadas as principais etapas de um empreendimento minerário definidas por Fornasari Filho *et al.* (1992): áreas lavradas (bancadas e taludes); áreas de disposição de estéril e rejeito (bota-foras e barragem de rejeitos); área industrial (entorno de unidades de beneficiamento); e áreas de apoio (estocagem, vias de circulação, escritórios e oficinas); e

Identificação dos potenciais serviços ambientais decorrentes do desempenho da técnica de bioengenharia de solos, discutidos com base em referencial bibliográfico, quanto aos benefícios gerados para a sociedade, advindos dos ecossistemas. As quatro categorias de serviços ambientais consideradas são: serviços de provisão (como fornecimento de água e alimentos); serviços de regulação (como controle de inundações e doenças); serviços de suporte (como formação do solo e ciclagem de nutrientes); e serviços culturais (como recreação e uso para fins religiosos), conforme a classificação de Millennium Ecosystem Assessment (2005).

### Coleta de dados: reconhecimento das técnicas de bioengenharia de solos em campo

Encontra-se descrita na literatura em referência uma série de técnicas de bioengenharia de solos, que são aplicadas em contextos diferentes de degradação ambiental: pacotes de ramos (branchpacking), camadas de ramos (brushlayering), feixes vivos (live fascines), estacas vivas (live staking), geogrelha vegetada (vegetated geogrids), contenção tipo cribwall (live cribwal), grade viva (live slope grating), dentre outras (GRAY; SOTIR, 1996; EUBANKS; MEADOWS, 2002; DURLO; SUTILI, 2005).

Desta forma, o reconhecimento das técnicas de bioengenharia de solos no campo foi realizado por meio de consulta a empresas que fazem uso de algumas dessas técnicas de bioengenharia de solos. Os critérios de seleção das áreas para coleta de dados de campo

foram: diversidade no uso das técnicas de bioengenharia de solos; diversidade de contextos de degradação, isto é, diferentes intervenções afetando distintos processos da dinâmica superficial; e áreas situadas em diferentes regiões do país.

Agregada a esses critérios, a escolha das áreas de estudo deu-se por conveniência da disponibilidade para realização da visita acompanhada por responsável técnico pela recuperação da área degradada. Embora esse critério tenha limitado o número de áreas passíveis de visitação, ele foi fundamental, pois permite a obtenção de dados não apreensíveis apenas com a observação do local. Assim, a coleta de dados primários foi realizada em seis áreas situadas em quatro estados do país: São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Paraíba.

## RESULTADOS

Nas seis áreas visitadas – três parques urbanos, uma rodovia, uma usina hidroelétrica, e uma área de mineração – foram identificados nove locais, onde foram aplicadas técnicas de recuperação ambiental; sendo que, quatro locais correspondem aos taludes fluviais, um corresponde à cava de mineração na fase de desativação, dois correspondem aos taludes construídos, e dois correspondem a margens de reservatório (Tabela 3).

**Tabela 3 – Localização das áreas, processos e causas da alteração e técnicas utilizadas.**

Localização/Data	Área degradada	Causa da degradação	Bioengenharia de solo	Funcionalidade
<b>Parque Severo Gomes, São Paulo, SP. (31/10/2012)</b>	Margem do córrego Judas	Erosão de margem (alteração constante do volume de água superficial)	Paliçada de madeira e implantação de vegetação herbácea	Controle de erosão fluvial
<b>Parque Tijuco Preto, São Carlos, SP. (17/11/2012)</b>	Córrego Tijuco Preto	Tamponamento artificial do córrego	Calha em madeira e pedras, vegetação herbácea	Renaturalização de cursos de água
<b>Parque Chico Mendes, Sorocaba, SP. (29/11/2012)</b>	Talude de drenagem intermitente	Erosão no talude e início de boçoroca	Grade viva e implantação de vegetação herbácea e arbustiva Paliçada de madeira	Controle de erosão e estabilização de taludes de elevadas declividades
<b>Mineração de bauxita, da Alcoa, Poços de Caldas, MG. (30/11/2012)</b>	Antigas cavas de extração de bauxita (encosta inteira)	Decapamento do solo e extração de bauxita	Transposição de <i>topsoil</i> e plantio de espécies arbóreas	Controle de erosão e restauração ecológica
<b>BR-101, João Pessoa, PB. (04/02/2013)</b>	Viaduto rodoviário	Instabilidade do talude	Hidro-semeadura conjugada com biomanta	Controle de erosão e estabilização de taludes e recuperação de áreas com boçoroca
	Ponte sobre o Rio Preto	Instabilidade do talude		
	Cana contígua à rodovia	Boçoroca		
<b>UHE Itumbiara, GO. (25/02/2013)</b>	Área 1 - margem direita do reservatório de Furnas (área de empréstimo)-	Boçoroca de grande porte em área de empréstimo	Hidro-semeadura conjugada com biomanta, e canaleta verde	Controle de erosão em taludes e recuperação de áreas com boçoroca
	Área 2 - margem direita do reservatório de Furnas (área de empréstimo)	Boçoroca de menor porte em área de empréstimo	Hidro-semeadura conjugada com biomanta, e canaleta verde	

Nesses nove locais foram identificados e caracterizados seis diferentes técnicas, sendo cinco amparadas no conceito de bioengenharia de solos adotado por este artigo: hidro-semeadura conjugada com biomanta, paliçada de madeira com vegetação herbácea, grade viva conjugada com paliçada e vegetação herbácea e arbustiva, calha em madeira e pedras com vegetação herbácea e canaleta verde. No caso da sexta técnica, a transposição de *topsoil*, embora não referenciada na literatura específica como uma técnica de bioengenharia de solos, é comumente descrita na literatura e muito empregada para revegetar taludes de corte e aterro e na restauração da cobertura vegetal de áreas mineradas. O uso de *topsoil* pode estar associado a algum elemento inerte, compondo uma técnica de bioengenharia de solos conforme o conceito adotado, porém na área visitada durante a pesquisa esta técnica foi utilizada isoladamente, sem a presença de um material inerte.

A hidro-semeadura conjugada com biomanta responde por metade das técnicas empregadas, seguida pela paliçada de madeira com vegetação herbácea. Os principais materiais construtivos observados no emprego das técnicas de bioengenharia de solos referem-se a: *mix* de sementes forrageiras e plantio de espécies herbáceas e arbóreas nativas, como elementos vivos; e como materiais inertes, madeiras, areia e pedra.

Das cinco técnicas de bioengenharia de solos identificadas em campo, observa-se que a grade viva, a paliçada de madeira com vegetação herbácea e a hidro-semeadura combinada com a biomanta, apresentam similaridades com as descritas em

literatura com maior aplicação na estabilização de ambientes fluviais e taludes artificiais (GRAY; SOTIR, 1996; EUBANKS; MEADOWS, 2002; DURLO; SUTILI, 2005; FERNANDES; FREITAS, 2011). Quanto à canaleta verde e à calha em madeira e pedras, essas são técnicas desenvolvidas e praticadas por empresas que adotam princípios e conceitos da bioengenharia de solos para controlar boçorocas e renaturalizar córregos tamponados, não sendo essas técnicas descritas na literatura científica.

Nas áreas visitadas, as causas mais prováveis da degradação estão relacionadas, principalmente, a intervenções no terreno e modificações no escoamento das águas superficiais, conduzindo à instabilização de taludes e terrenos e à aceleração da erosão e assoreamento. Para atenuar ou incrementar o processo natural (biofísico) presente, associado à causa da degradação, houve a aplicação de uma técnica ou o consórcio de duas técnicas. Somente a paliçada de madeira com vegetação herbácea e a hidro-semeadura conjugada com biomanta aparecem duas vezes em contextos diferentes de degradação. A paliçada de madeira com vegetação herbácea foi utilizada para conter o processo erosivo das margens de um córrego; e, consorciada com a grade viva, para controlar erosão de talude de drenagem intermitente. A hidro-semeadura foi utilizada na cobertura vegetal de talude rodoviário, visando sua estabilização e, como cobertura vegetal para recuperar área com boçoroca.

Em termos de funcionalidade, as técnicas de bioengenharia de solos empregadas estão relacionadas, principalmente, ao controle de erosão, inclusive no estágio de boçorocamento, e à estabilidade de taludes fluviais, de encostas naturais e construídas (corte e aterro).

## DISCUSSÃO

Para subsidiar a discussão da aptidão das técnicas de bioengenharia de solos para atenuar ou incrementar efeitos dos processos naturais (biofísicos), a partir das funcionalidades identificadas em campo; da aplicabilidade da bioengenharia de solos na fase de recuperação de áreas mineradas e; por fim, dos potenciais serviços ambientais decorrentes dessas técnicas, apresenta-se uma síntese desses aspectos na Tabela 4 e Tabela 5.

**Tabela 4 – Técnicas de bioengenharia de solos identificadas em campo, potenciais serviços ambientais associados e aplicabilidade ao contexto de recuperação de áreas mineradas.**

Técnicas de bioengenharia de solos	Caracterização	Aptidão da técnica para atenuar ou incrementar efeitos dos processos naturais (biofísicos)	Serviço ambiental potencial associado	Aplicação da técnica de B.S. (observação de campo)
<b>Grade viva conjugada à paliçada de madeira</b>	Troncos de madeiras de eucalipto não-tratados dispostos na horizontal e na vertical do talude formando uma grade preenchida com solo e plantio de mudas da espécie arbustiva amoreira - Parque Chico Mendes	Redução da erosão e estabilização do solo na área tratada; melhoria do aspecto visual da área degradada; baixa sobrevivência das mudas plantadas e surgimento de diferentes espécies herbáceas e arbustivas; presença de formigas	Serviços de suporte: aumento da diversidade biológica; favorecimento da regeneração natural; formação de habitats. Serviços de regulação: aumento de estoque de carbono; controle de erosão. Serviços culturais: recuperação da beleza cênica	Taludes íngremes e eventualmente margens fluviais
<b>Técnicas de bioengenharia de solos</b>	Caracterização	Aptidão da técnica para atenuar ou incrementar efeitos dos processos naturais (biofísicos)	Serviço ambiental potencial associado	Aplicação da técnica de B.S. (observação de campo)
<b>Paliçada de madeira</b>	Troncos de madeira de eucalipto dispostos no talude de forma horizontal e apoiados por tronco de madeira fixada na vertical e por pedras, como proteção de base do talude, e implantação de vegetação herbácea - Parque Severo Gomes	Redução do processo erosivo nas margens e do aporte de sedimentos ao curso d'água; desenvolvimento da vegetação arbustiva, presença de avifauna	Serviços de suporte: aumento da diversidade biológica; favorecimento da regeneração natural; formação de habitats; melhoria das condições físicas do solo. Serviços de regulação: aumento de estoque de carbono; controle de erosão. Serviços culturais: recuperação da beleza cênica	Margens fluviais e talude com inclinação suave
<b>Calha de madeira e pedra</b>	Sistema de drenagem com toras de madeira de eucalipto e pedra apoiada sobre o colchão drenante; contenção lateral com solo envelopado e toras de eucalipto; plantio de grama em placa – Córrego Tijuco Preto	Estabelecimento da vegetação herbácea, presença de aves, melhoria do aspecto visual da área degradada	Serviços de suporte: aumento da diversidade biológica, formação de habitats; melhoria das condições física do solo. Serviços de regulação: aumento de estoque de carbono. Serviços culturais: recuperação da beleza cênica	Execução de sistema de drenagem superficial e córregos tamponados



Tabela 5 – Técnicas de bioengenharia de solos identificadas em campo, potenciais serviços ambientais associados e aplicabilidade ao contexto de recuperação de áreas mineradas.

Hidro-semeadura conjugada à biomanta	Instalação de biomanta e aplicação mecanizada no solo de mistura contendo insumos e mix de sementes, que formará a cobertura vegetal – BR101	Consolidação superficial do talude, estabelecimento da cobertura vegetal, desenvolvimento de morfoespécies	Serviços de suporte: melhoria das condições físicas do solo; aumento da diversidade biológica. Serviços de regulação: aumento estoque de carbono; controle de erosão	Taludes de corte e aterro, encostas, e áreas com boçorocas (talude interno)
	Instalação de biomanta e aplicação mecanizada no solo de mistura contendo insumos e mix de sementes, que formará a cobertura vegetal – UHE Itumbiara	Estabilização dos taludes, estabelecimento da cobertura vegetal; desenvolvimento de morfoespécies presença de formigas e aves	Serviços de suporte: melhoria das condições físicas do solo; aumento da diversidade biológica; formação de habitats. Serviços de regulação: aumento estoque de carbono; retenção de sedimentos e controle de erosão. Serviços culturais: recuperação da beleza cênica	
Canaleta verde	As canaletas são escavadas no solo, compactadas, cobertas com biomantas e implantação de vegetação herbácea	Obra complementar de transição para os canais de concreto para captação e condução de águas pluviais	Serviços de suporte: melhoria das condições físicas do solo; aumento da diversidade biológica, formação de habitats; melhoria das condições física do solo. Serviços de regulação: aumento de estoque de carbono; controle de erosão	Sistemas de drenagem de água superficial
Transposição de topsoil*	Transposição da camada superficial do solo (contendo o horizonte A e parte do horizonte B) e plantio de espécies arbóreas - Alcoa, Poços de Caldas	Boa cobertura superficial do solo, com inexpressivas áreas de solo exposto; pouca presença de gramíneas invasoras e significativa regeneração natural; presença de outras formas de vida além de arbóreas; melhoria do aspecto visual da área degradada	Serviços de suporte: favorecimento da regeneração natural; aumento da diversidade biológica no ecossistema (incluindo a biodiversidade do solo); formação de habitats; melhoria das condições físicas do solo; melhoria no fluxo de nutrientes. Serviço de regulação: aumento do estoque de carbono; proteção do solo e controle de erosão. Serviços culturais: recuperação da beleza cênica	Uso preferencialmente em áreas planas para fins de restauração ecológica

(\*) – PODE SER CONSIDERADA COMO TÉCNICA DE BIOENGENHARIA DE SOLOS QUANDO ASSOCIADA COM ELEMENTOS INERTES.

Em termos de aptidão das técnicas, observa-se que todas as técnicas, sem exceção, promoveram o controle dos processos de dinâmica superficial, instalados (escorregamento de encostas e taludes fluviais, erosão e, conseqüentemente, assoreamento) e contribuíram para incrementar as condições ecológicas locais propiciando o desenvolvimento de morfoespécies, atração de grupos de fauna, como formigas e aves e, melhorando o aspecto visual da área. A presença de espécies invasoras e o baixo desempenho no desenvolvimento das mudas, caracterizam-se como aspectos negativos observados que podem estar associados a problemas operacionais durante a implantação das técnicas de bioengenharia de solos ou relacionados à falta de manutenção adequada das mesmas.

Em termos de aplicabilidade em área de mineração, apenas a transposição de *topsoil* é discutida quanto ao uso com finalidade de restauração ecológica. Ainda que recomendada pela literatura (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 1992; GISLER, 1995; OZÓRIO, 2000; PARROTA; KNOWLES, 2003; MOREIRA, 2004; JAKOVAC, 2007), essa técnica pode encontrar restrições em minerações, no caso de não terem sido realizados, durante o decapeamento do solo, a retirada e o armazenamento do *topsoil*; por se onerosa; ou ainda, em alguns casos, de difícil aplicabilidade devido às particularidades locais como, pequena espessura de solo e dificuldade de armazenamento (LONGO; RIBEIRO; MELO, 2011). Outra restrição da aplicabilidade refere-se ao grau de inclinação de taludes. Alguns autores concluíram que essa técnica não apresenta eficiência para taludes de elevada inclinação e em áreas com deficiência de nutrientes no solo autóctone (DAY; LUDEKE, 1986; OZÓRIO, 2000; MOREIRA, 2004). No entanto, Jakovac (2007) constatou que é possível utilizar a transposição de *topsoil* para recuperar taludes com até 30° de inclinação, desde que associada a outras técnicas para contenção do *topsoil*, como estacas de madeira dispostas em linha no talude formando terraços e linhas de sulcos horizontais associadas a linhas de adubação verde. Portanto, é neste sentido que o *topsoil* associado a elementos inertes pode ser caracterizado como uma técnica de bioengenharia de solos apropriada para ser aplicada em áreas mineradas.

Nos demais contextos de degradação associados a parques urbanos, rodovia e usina hidroelétrica, as técnicas de bioengenharia de solos foram aplicadas em taludes (grade viva), margens de cursos d'água (grade viva e paliçada de madeira com vegetação herbácea), controle de erosão (grade viva, paliçada de madeira com

vegetação herbácea e hidro-semeadura combinada com biomanta), desde sulcos até boçorocas.

Considera-se que as cinco técnicas de bioengenharia de solos identificadas e analisadas nesta pesquisa, bem como a transposição de *topsoil*, apresentam potencial de aplicação nos diversificados contextos de áreas mineradas. Desse modo, de acordo com a classificação de Fornasari Filho *et al.* (1992) para as principais etapas de um empreendimento mineral, classificam-se esse potencial em duas categorias, elevado ou restrito:

- Em bancadas e taludes de cavas – a hidro-semeadura conjugada com biomanta e o *topsoil* são técnicas classificadas como de elevada aplicabilidade que exercem a função de proteção superficial a partir do recobrimento vegetal, controlando a erosão. Vale destacar que o potencial de aplicação do *topsoil*, somente é válido se considerada as restrições associadas à técnica. A grade viva e a paliçada de madeira com vegetação podem ser utilizadas para contenção de trechos de taludes. A calha de madeira em pedras e vegetação e a canaleta verde podem ser utilizadas como sistema de drenagem;
- Em áreas de disposição de estéril e rejeitos (bota-foras, bacias de decantação e barragem de rejeitos) - a hidro-semeadura conjugada com biomanta, a transposição de *topsoil*, a grade viva, as canaletas verdes e a paliçada de madeira com vegetação, com vistas a exercer a função de proteção superficial, estabilização de taludes e disciplinamento das águas pluviais, são técnicas que têm potencial restrito de aplicação, pois a vegetação utilizada deve ser escolhida com critérios rigorosos para evitar escorregamentos;
- Nas demais áreas (entorno de unidades de beneficiamento, áreas de estocagem, vias de circulação, escritórios e oficinas) - a paliçada de madeira com vegetação, a calha em madeira e pedras com vegetação, visando controlar erosão, estabilizar taludes e disciplinar fluxo de água superficial, são técnicas com potencial elevado de aplicação.

As técnicas de bioengenharia de solos analisadas nos contextos de degradação em que foram empregadas, conforme Tabelas 4 e 5, apresentam potencial de gerar serviços ambientais, principalmente, nas categorias suporte, regulação e cultural como:

- Controle da erosão, pois os materiais (vivos e inertes) são arranjados de forma a funcionar como elementos de estabilização de terrenos (caso da grade viva e paliçada de madeira com vegetação herbácea) e de proteção superficial do solo (caso da hidro-semeadura conjugada com biomanta);
- Aumento da diversidade biológica (caso da grade viva, paliçada de madeira com vegetação herbácea, calha em madeira e pedras com vegetação, transposição de *topsoil* e hidro-semeadura), pois podem favorecer o desenvolvimento de espécies vegetais, bem como aumentar o número de espécies locais da flora e da fauna por meio da potencialização da interação entre elas, como na polinização e na decomposição;
- Favorecimento da regeneração natural (caso da grade viva, paliçada de madeira com vegetação herbácea e transposição de *topsoil*), pois fornecem as condições do substrato para a germinação espontânea de sementes não plantadas;
- Regulação do clima (caso da grade viva, paliçada de madeira com vegetação, calha em madeira e pedras com vegetação, transposição de *topsoil* e hidro-semeadura), por meio do aumento dos estoques de carbono nas áreas recuperadas via crescimento vegetal observado nos casos analisados;
- Formação de habitats (caso da grade viva, paliçada de madeira com vegetação, calha em madeira e pedras com vegetação, transposição de *topsoil* e hidro-semeadura), pois fornecem condições para desenvolvimento da fauna e flora (formação de substrato para o desenvolvimento da flora; favorecimento da interação fauna-flora, como a polinização; estabelecimento de área de vida para a fauna);
- Melhoria das condições físicas do solo (no caso da paliçada de madeira com vegetação herbácea,

calha em madeira e pedras com vegetação, transposição de *topsoil* e hidro-semeadura conjugada com biomanta), pois promovem agregação do solo (aumento da porosidade do solo) por meio da ação das raízes das espécies vegetais plantadas ou incorporadas (este último no caso da transposição do *topsoil*);

- Melhoria do fluxo de nutrientes (no caso da transposição de *topsoil*), pois preserva a composição da camada superficial do solo, o que propicia a reutilização da camada orgânica do solo e a decomposição da serapilheira e, conseqüentemente, a disponibilização de nutrientes para os vegetais vivos;
- Recuperação da beleza cênica (nos casos da paliçada de madeira com vegetação herbácea, da calha de madeira e fragmentos de rocha com vegetação, transposição de *topsoil* e da hidro-semeadura conjugada com biomanta), pois melhoram o aspecto visual do local.

Dos potenciais serviços ambientais gerados, o aumento de estoque de carbono está associado a todas as técnicas relacionadas nas Tabelas 4 e 5. Outros serviços ambientais frequentes referem-se à formação de habitats, aumento da diversidade biológica, melhoria das condições físicas do solo e recuperação da beleza cênica. Considera-se que todas as técnicas analisadas, se, aplicadas a áreas mineradas, podem gerar os mesmos serviços ambientais. A hidro-semeadura conjugada com biomanta, aplicada em dois contextos diferentes de degradação, é a técnica mais comumente empregada, em consonância aos achados de literatura (SILVA FILHO, 1988; SANTOS; NÓBREGA, 1992; ALMEIDA, 2002). Todavia, como técnica para promover serviços ambientais propicia baixo valor agregado em termos ecológicos, visto que, normalmente, privilegia a cobertura vegetal herbácea para controle de erosão e não a restauração das funções ecológicas do sistema.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As cinco técnicas de bioengenharia de solos estudadas – grade viva, hidro-semeadura conjugada à biomanta, paliçada de madeira com vegetação herbácea, calha em madeira e pedras com vegetação, canaleta verde, mais transposição de *topsoil* – executadas em situações diversas de degradação, em diferentes regiões do país, demonstram potencial elevado de aplicabilidade na maior parte dos contextos de degradação em áreas mineradas. Apenas para áreas de disposição de estéril e rejeito (bota-foras e barragem de rejeitos), o potencial pode ser considerado restrito.

Assim, a recuperação de áreas de disposição de estéril e rejeito com bioengenharia de solos consiste um desafio e enseja três caminhos: o aprimoramento das técnicas analisadas com vistas a ampliar seu potencial de uso; a avaliação de outras técnicas descritas na literatura, em termos, de aplicabilidade a áreas mineradas; e o desenvolvimento de novas técnicas de bioengenharia de solos específicas para áreas mineradas.

Quanto ao potencial dessas técnicas na geração de serviços ambientais, foram caracterizados serviços associados às categorias de suporte, regulação e cultural, com destaque para aqueles relacionados ao aumento de estoque de carbono, formação de habitats, aumento da diversidade biológica e melhoria das condições físicas do solo. Deve-se considerar que o uso de técnicas de

bioengenharia de solos não usualmente empregadas, bem como adaptações e melhorias das técnicas identificadas nesta pesquisa, podem ampliar e enriquecer essa lista de serviços ambientais em contextos de recuperação de ambientes degradados pela mineração.

Recomenda-se realizar estudos sobre os materiais inertes e vivos, este último em especial, a julgar a grande diversidade de espécies botânicas no país, com o propósito de conhecer e indicar espécies potenciais para uso na bioengenharia de solos, de modo a abranger uma gama maior de serviços ambientais. Como exemplo da importância de tais estudos, tem-se a pesquisa de Holanda *et al.* (2012) que avaliou a viabilidade da propagação vegetativa por meio do método de estaquia de sete espécies arbóreas de grande ocorrência na zona ripária do Baixo Curso do Rio São Francisco sergipano, para potencialização de seu uso na composição da técnica de bioengenharia de solos.

Recomenda-se, ainda, desenvolver experimentos de campo para testar a aplicabilidade das mais diversificadas técnicas de bioengenharia de solos e mensurar os serviços ambientais propostos. Adicionalmente, podem ser desenvolvidos estudos que quantifiquem e valorem esses serviços ambientais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Processo nº 2010/51233-7) pelo auxílio financeiro concedido ao projeto e às empresas e aos gestores municipais que receberam a equipe para aplicação do protocolo de coleta de dados de técnicas de bioengenharia de solos. Os autores ainda agradecem à colega Edna Gubitoso do IPT pelo auxílio na busca de trabalhos nas bases indexadas e na cuidadosa revisão das referências bibliográficas deste manuscrito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, R. O. P. O. **Revegetação de áreas mineradas**: estudo dos procedimentos aplicados em mineração de areia. 2002. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 160p.
- 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.
- BITAR, O. Y. **Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na região metropolitana de São Paulo**. 1997. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. 185p.
- CAVALCANTI, C. Uma tentativa de caracterização da economia ecológica. *Ambiente & Sociedade*, v. 7, n. 1, p. 149-156, jan./jun. 2004.
- CETRULO, T. B.; MOLINA, N. S.; MALHEIROS, T. F. Indicadores de sustentabilidade: proposta de um barômetro de sustentabilidade estadual. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, São Paulo, n. 30, p. 33-45, 2013.
- CHADA, S. S.; CAMPELLO, E. F. C.; FARIA, S. M. Sucessão vegetal em uma encosta reflorestada com leguminosas arbóreas em Angra dos Reis, RJ. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 801-809, 2004.
- COSTANZA, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, v. 387, p. 253-260, 1997.
- DAY, A. D.; LUDEKE, K. L. Revegetation of coal mine soil with forest litter. *Journal of Arid Environments*, v. 11, n. 3, p. 229-233, Nov. 1986.
- 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.
- DURLO, M. A.; SUTILI, F. J. **Bioengenharia**: manejo biotécnico de cursos de água. Porto Alegre: EST Edições, 2005. 198 p.
- 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. *et al.* 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 das Águas Livres, 2011. v. 2.
- FERREIRA, W. C. *et al.* Regeneração natural como indicador de recuperação de área degradada a jusante da usina hidrelétrica de Camargo, MG. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 34, n. 4. p. 651-660, 2010.
- FORNASARI FILHO, N. *et al.* **Alterações no meio físico decorrentes de obras de engenharia**. São Paulo: IPT, 1992. 165 p. (Publicação IPT).
- GISLER, C. V. T. **Uso da serapilheira na recomposição da cobertura vegetal em áreas mineradas de bauxita, MG**. 1995. Dissertação (Mestrado em Biologia) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. 146p.
- GONÇALVES, A. A.; DZIEDZIC, M. Proposta de ferramenta de diagnóstico socioambiental empresarial. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, São Paulo, n. 25, p. 81-98, 2012.
- GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization**: a practical guide for erosion control. New York: John Wiley & Sons, 1996. 377 p.
- GRIFFITH, J. J.; DIAS, L. E.; JUCKSCH, I. Novas estratégias ecológicas para a revegetação de áreas mineradas no Brasil. In: SIMPÓSIO SUL-AMERICANO E SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1., 1994, Foz do Iguaçu. *Anais...* Curitiba: FUPEF, 1994. p. 31-43.
- GRIFFITH, J. J.; DIAS, L. E.; JUCKSCH, I. Rehabilitation of mine sites in Brazil using native vegetation. In: MAJUMDAR, S. K.; MILLER, W. E.; BRENNER, F. J. (Ed.) **Forests – a global perspective**. Bradford: The Pennsylvania Academy of Science, 1996. Cap. 31, p. 470-488.

- GROOT, R. S.; WILSON, M. A.; BOUMANS, R. M. J. A. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. **Ecological Economics**, v. 41, p. 393-408, 2002.
- HOLANDA, F. S. R. *et al.* Propagation through cutting technique of species occurring in the Lower São Francisco River in Sergipe State with different concentrations of indolbutiric acid. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 75-82, 2012.
- 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 MINERAÇÃO. **Mineração e Meio Ambiente**. Brasília: IBRAM, 1992. 111 p.
- JAKOCAV, A. C. C. **O uso do banco de sementes florestal contido no topsoil como estratégia de recuperação de áreas degradadas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. 152p.
- LONGO, R. M.; RIBEIRO, A. I.; MELO, W. J. Uso da adubação verde na recuperação de solos degradados por mineração na floresta amazônica. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 1, p. 139-146, 2011.
- 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.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis**. Washington, DC: World Resources Institute, 2005. 141 p.
- MOREIRA, P. R. **Manejo de solo e recomposição da vegetação com vistas a recuperação de áreas degradadas pela extração de bauxita, Poços de Caldas, MG**. 2004. Tese (Doutorado em Biologia)- Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2004. 139p.
- MOSCATELLI, M. C. *et al.* Wood-soil interactions in soil bioengineering slope stabilization works. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v. 2, p. 187-191, oct. 2009.
- 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. 176p.
- OZÓRIO, T. F. **Potencial do uso da serapilheira em áreas degradadas pela mineração de ferro**. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000. 62p.
- PARROTA, J. A.; KNOWLES, O. H. Restauração florestal em áreas de mineração de bauxita na Amazônia. In: KAGEYAMA, P. Y. *et al.* (Ed.). **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2003. p. 301-330
- PRESCOTT-ALLEN, R. **Barometer of sustainability: measuring and communicating wellbeing and sustainable development**. Cambridge: IUCN, 1997. 28p.
- SANTOS, R. J. R.; NÓBREGA, M. T. Erosão urbana e recuperação – superintendência do controle da erosão e saneamento ambiental (SUCEM). In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1., 1992, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Sobrade, 1992. p. 58-65.
- SILVA FILHO, N. L. **Recomposição da cobertura vegetal de um trecho degradada da Serra do Mar, Cubatão, SP**. Campinas: Fundação Cargill, 1988. 53p.
- SUTILI, F. J. **Bioengenharia de solos no âmbito fluvial do sul do Brasil**. 2007. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Perigos Naturais, Instituto de Bioengenharia de Solos e Planejamento da Paisagem, Universidade Rural de Viena, Viena, 2007. 94p.
- VAN BALLEEN, H. M. Desenvolvimento sustentável: uma descrição das principais ferramentas de avaliação. **Ambiente & Sociedade**, v. 7, n. 1, p. 67-87, jan./jun. 2004.