

## Artigos técnicos

# Recuperação de áreas degradadas por mineração: associação de técnicas de bioengenharia de solos com geração e manutenção de serviços ecossistêmicos

*Recovery of degraded areas by mining: association of techniques of bioengineering of soils with generation and maintenance of ecosystem services*

Mariana Hortelani Carneseca Longo<sup>a</sup>, Caroline Almeida Souza<sup>a</sup>,  
Maria Lucia Solera<sup>a</sup>, Priscila Ikematsu<sup>b</sup>,  
Sofia Julia Alves Macedo Campos<sup>b</sup>, Omar Yazbek Bitar<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Seção de Sustentabilidade de Recursos Florestais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

<sup>b</sup> Laboratório de Recursos Hídricos e Avaliação Geoambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

\*E-mail: marihc@ipt.br

**Palavras-chave:**  
recuperação de área degradada; mineração; bioengenharia de solos; serviço ecossistêmico.

**Keywords:**  
*reclamation of degraded area; mining; soil bioengineering; ecosystem service.*

## Resumo

A recuperação de áreas degradadas é uma das atividades frequentemente consideradas em avaliação de impacto ambiental de projetos de mineração, sendo contemplada em estudos realizados, desde a fase de planejamento até os referentes à desativação do empreendimento. Sintetizam-se resultados de pesquisa aplicada à fase de operação de minas, voltada ao desenvolvimento de soluções fundamentadas na associação de técnicas de bioengenharia de solos, com a geração e manutenção de serviços ecossistêmicos. Três soluções foram desenvolvidas em experimento de campo, idealizadas para as condições da área de estudo, e aplicadas em talude de uma pilha de bota-fora composta por material estéril. O experimento incluiu também aplicação em setor do mesmo talude, tratado com rejeito proveniente do processo de beneficiamento do minério local, denominado de areia calcária, além de uma área testemunho mantida sem qualquer tratamento, e utilizada para fins comparativos. As cinco situações foram monitoradas em quatro campanhas de campo, por meio de dezessete indicadores selecionados para medir a evolução acerca de oito serviços ecossistêmicos esperados. O desempenho das soluções foi analisado comparativamente quanto à aplicabilidade, serviços ecossistêmicos e valoração econômica, demonstrando-se o potencial de aplicação em recuperação de áreas degradadas por mineração.

## Abstract

*The reclamation of degraded areas is an important activity in environmental impact assessment of mining projects, and it has been contemplated in studies since the planning phase to the time of the enterprise's deactivation. This work focuses on the phase of mine operation through the development of solutions based on the association of soil bioengineering techniques with the provisioning and maintenance of ecosystem services. Three solutions were developed according to the conditions of the studied area and applied in stacks of refuse mining areas composed by of sterile material. The experiment also included one application in an area of the same slope with local tailings from the process of ore, called limestone sand, as well as a control area, which was maintained untreated and used for comparative purposes. The five situations were monitored in four field works work campaigns, using seventeen indicators selected to measure the evolution of eight expected ecosystem services. The performance of the solutions was analyzed comparatively regarding applicability, ecosystem services and economic valuation, demonstrating the potential of application in reclamation of degraded areas by mining.*

## 1 Introdução

Serviços ambientais ou ecossistêmicos são cada vez mais considerados em avaliação ambiental de projetos (BAKER et al., 2013; KARJALAINEN et al., 2013; GENELETTI, 2013), visando melhorar a análise e a mitigação de impactos, com base nos benefícios à biodiversidade (ROSA; SÁNCHEZ, 2015; LONGO; RODRIGUES, 2017). Em mineração, isso também se mostra como uma tendência, pois a atividade extrativa altera a paisagem (TARDIEU et al., 2015), e reduz as áreas de superfície dos ecossistemas naturais, com a consequente perda de serviços ecossistêmicos (JACOB et al., 2016). Rosa e Sánchez (2016) enfatizam os avanços na prática convencional de avaliação de impacto (AI) quando a abordagem ecossistêmica é utilizada para avaliar os impactos ambientais e sociais esperados em mineração, como no contexto de avaliação de impacto ambiental (AIA). Larondelle e Haase (2012) adotam abordagem ecossistêmica para avaliar os impactos da mineração em um período de 100 anos e propõem opções de restauração pós-mineração, a fim de priorizar as áreas no planejamento regional para serviços ecossistêmicos. Longo (2014) e Wilker et al. (2016) destacam a necessidade de cenários de planejamento na recuperação de áreas degradadas (RAD) por mineração, proporcionando maiores benefícios nos quais esses serviços desempenham papel fundamental no contexto pós-mineração.

Em atividades de mineração, as medidas de RAD nem sempre são empregadas para atenuar a significância dos impactos causados e gerar um ganho ambiental representativo para a área e adjacências. Isso tende a ser possível pela aplicação combinada de técnicas de RAD, escolhidas para gerar serviços ambientais específicos. Solera et al. (2014) identificaram cinco soluções de bioengenharia de solos que podem gerar serviços ecossistêmicos, especialmente aqueles relacionados a estoques de carbono, habitats, diversidade biológica e condições físicas do solo,

classificando-as como de alto potencial para RAD na maioria dos contextos de mineração no Brasil. Para Souza et al. (2016), a diversificação de técnicas de RAD, além das convencionalmente adotadas, como a revegetação para manejo florestal comunitário e para sistemas agroflorestais e, ainda, a bioengenharia de solos, pode expandir a geração de serviços ecossistêmicos. Evans et al. (2013) também sugerem que os planos de restauração em mineração devem considerar as condições de vegetação e solo existentes, em uma abordagem de manejo adaptativo para medir o sucesso na melhoria dos serviços ecossistêmicos.

Ao mesmo tempo, a RAD se mostra como uma das atividades frequentemente consideradas no processo de avaliação de impacto ambiental (AIA) de projetos de mineração, contemplada em relação às fases de planejamento, instalação, operação e desativação de empreendimentos. Assim, experiências acerca de técnicas de RAD devem ser discutidas também em relação a esse contexto, tendo-se em conta a possibilidade de geração e manutenção de serviços ecossistêmicos.

Neste artigo, abordam-se alguns dos resultados obtidos em pesquisa aplicada à fase de operação de minas, com o objetivo de explicitar e discutir a aplicação potencial das soluções desenvolvidas em RAD de mineração (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016). Os trabalhos se baseiam em experimento de campo realizado em um talude de uma pilha de bota-fora composta por material estéril, proveniente dos trabalhos de lavra e constituído por blocos e fragmentos rochosos de dimensões variadas.

## 2 Procedimento metodológico

O experimento se desenvolveu em área de mineração de fosfato, no município de Cajati (SP), por meio da associação de conceitos e técnicas de bioengenharia de solos com os princípios da geração e manutenção de serviços ecossistêmicos ou ambientais. A inclinação do talude que compõe o experimento supera 45°, e abriga vegetação herbácea em trechos compostos por materiais com granulometria mais fina (**Figura 1**).

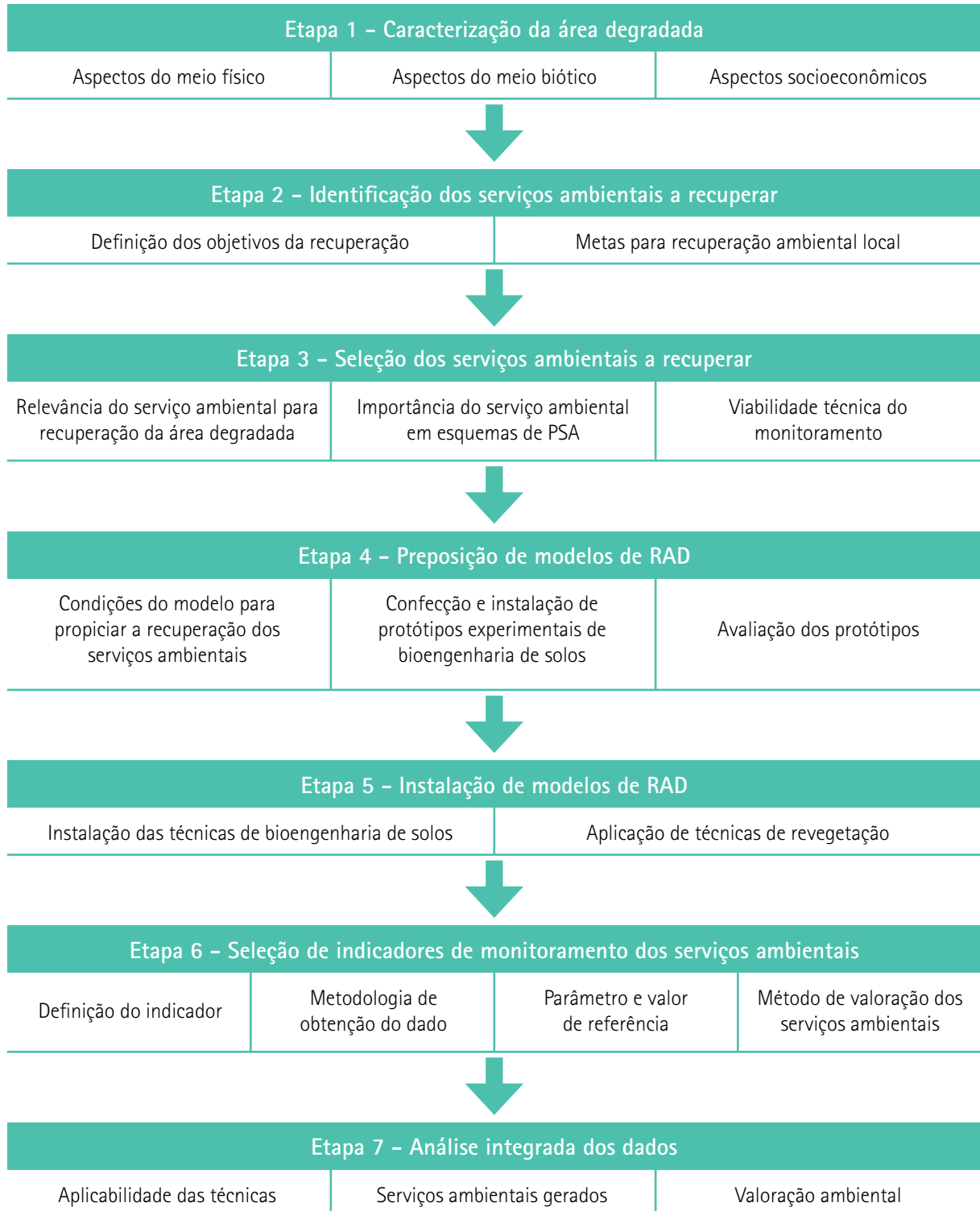
Figura 1 – Área de estudo: talude de depósito de resíduos de materiais estéreis da atividade de mineração de fosfato



Fonte: acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (30 abr. 2015)

Os trabalhos foram executados conforme a sequência de procedimentos ilustrada na **Figura 2**.

Figura 1 – Método 1, observação direta do Sol pelo observador. É possível observar na imagem o painel da base de tempo que controla a simulação sendo gerada pelo software



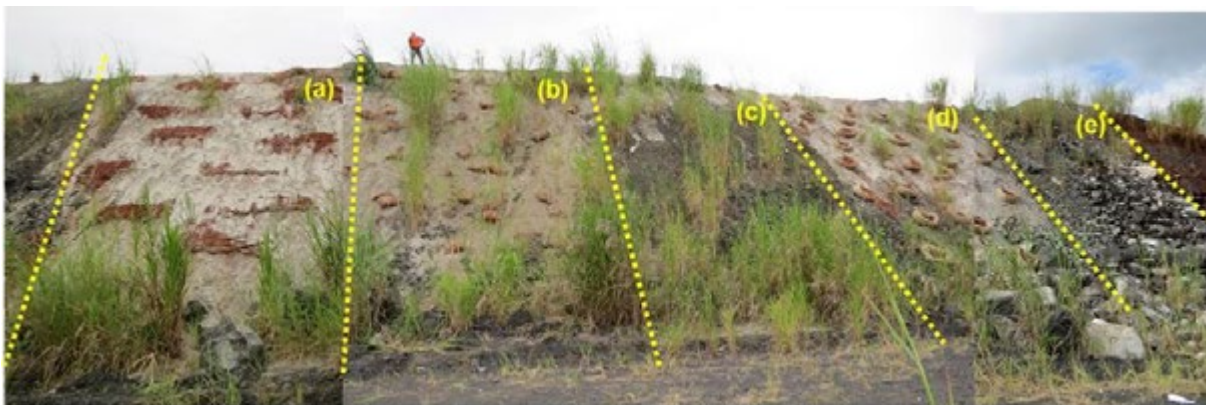
Fonte: elaborado pelos autores

A identificação dos serviços ecossistêmicos foi efetuada a partir dos prováveis impactos negativos advindos da instalação e dos objetivos da RAD, compreendendo: recuperar a cobertura vegetal (mais diversa possível); recuperar a paisagem (cênica e ecológica); reduzir os processos erosivos; manter a estabilidade do talude; atenuar a dispersão de material particulado; possibilitar o acúmulo de água no sistema, atenuando a lixiviação de finos e nutrientes; e possibilitar o uso de resíduos.

Foram identificados treze serviços ecossistêmicos. A proposição de soluções de bioengenharia de solos passíveis de aplicação foi realizada com base em revisão bibliográfica, análise das condições da área e reuniões técnicas entre as equipes do projeto e colaboradores. Três protótipos foram idealizados a partir disso, testados inicialmente em área piloto, de modo a verificar a dimensão requerida às estruturas quanto ao volume útil de solo, condições de montagem e instalação no talude.

Após o teste, foram confeccionadas três estruturas, denominadas guirlanda, solo-retentor e colmeia. Além dessas soluções, o experimento considerou duas outras situações: uma tratada por resíduo de beneficiamento do minério, denominada de areia calcária e, ainda, uma área testemunho, totalizando cinco soluções (**Figura 3**).

**Figura 3 – Experimento com as cinco soluções instaladas: (a) colmeia, (b) solo retentor, (c) areia calcária, (d) guirlanda, (e) área testemunho**



Fonte: acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (10 ago. 2015)

### 3 Resultados e discussão

As cinco soluções foram monitoradas em campanhas de campo, entre agosto/2015 e julho/2016, por meio de indicadores selecionados para medir a evolução dos serviços ecossistêmicos esperados (**Quadro 1**). Para cálculo do desempenho dos serviços ecossistêmicos, foram considerados os valores dos indicadores obtidos nas campanhas de campo. Esses valores foram normalizados e enquadrados em três classes. O desempenho de cada serviço ecossistêmico foi obtido pela média dos escores dos indicadores. A valoração econômica foi efetuada para parâmetros que apresentaram dados suficientes aos métodos de valoração selecionados. Os métodos de valoração levaram em conta valores de mercado e a possibilidade de substituição. Foram realizados ajustes para obtenção de valor monetário dos serviços a gerar. O desempenho foi avaliado quanto à aplicabilidade, geração e manutenção de serviços ecossistêmicos, e valoração econômica desses mesmos serviços, classificando-se em: 1. insatisfatório; 2. regular; ou 3. satisfatório. Foi calculado, por fim, o índice de desempenho geral de cada solução, por meio da média dos componentes avaliados.

Os resultados da análise do desempenho da aplicabilidade das técnicas de RAD são apresentados na **Figura 4A**. O melhor desempenho nesse componente foi atingido pela guirlanda, porém a areia calcária também poderá ser uma boa alternativa de recuperação, desde que haja disponibilidade de material local. Com relação à geração de serviços ecossistêmicos na área em recuperação, observa-se que as soluções da guirlanda e do solo-retentor apresentaram desempenho regular, enquanto as demais apresentaram desempenho insatisfatório (**Figura 4B**). Por fim, no que se refere ao componente da valoração econômica dos serviços ecossistêmicos, observa-se, de uma forma geral, que as soluções de recuperação que utilizam estruturas de bioengenharia de solos apresentaram desempenho satisfatório (**Figura 4C**). A solução de recuperação que utiliza apenas areia calcária apresentou desempenho regular e a área testemunho apresentou desempenho insatisfatório. Acrescenta-se que, para o índice de desempenho geral, as quatro soluções de RAD apresentaram desempenho regular quando comparadas com a área testemunho, que teve desempenho insatisfatório (**Figura 4D**). Ressalta-se que cada solução apresenta aspectos favoráveis e desfavoráveis, bem como potencialidades de aplicação, os quais devem ser avaliados conforme os objetivos da RAD, que podem, inclusive, ser contextualizados no âmbito de AIA correspondente.

Dessa forma, nota-se que a análise por componente indicou que a areia calcária apresentou melhor desempenho em termos de aplicabilidade. As soluções denominadas de guirlanda e solo-retentor mostraram melhor desempenho quanto à geração e manutenção de serviços ecossistêmicos ou ambientais, e o solo-retentor apresentou melhor resultado quanto ao valor econômico dos serviços ecossistêmicos que podem ser gerados.

**Quadro 1 – Serviços ambientais selecionados e respectivos indicadores e parâmetros**

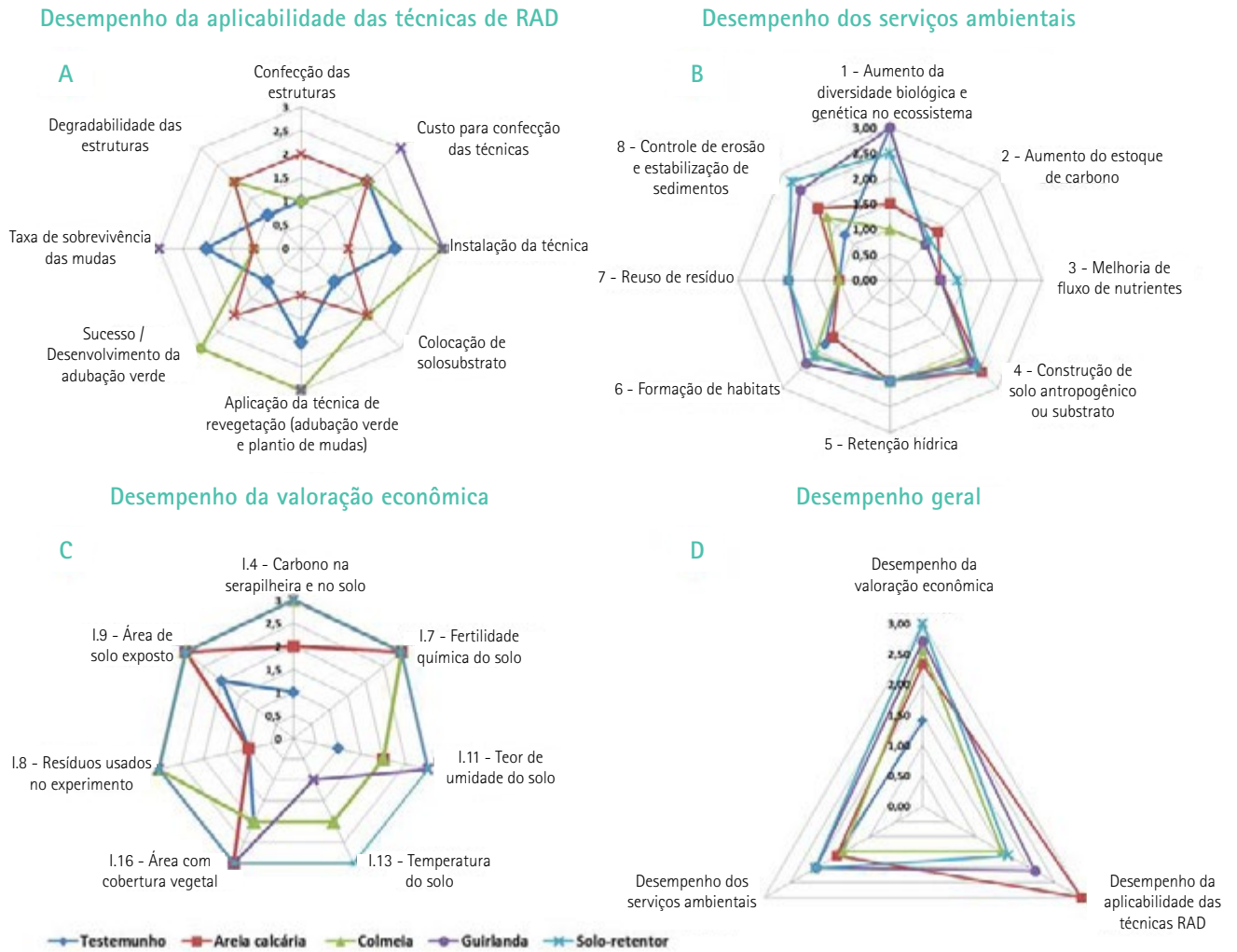
Serviço ambiental	Indicadores	Parâmetro
Aumento da diversidade biológica e genética no ecossistema	I.1 – Riqueza de espécies da fauna edáfica	Nº sp / tratamento
	I.2 – Riqueza de espécies da flora	Nº sp / tratamento
Aumento do estoque de carbono	I.3 – Carbono na biomassa vegetal	Quantidade de carbono na biomassa vegetal (g/amostra)
	I.4 – Carbono na serapilheira e no solo	Quantidade de carbono na serapilheira (g/amostra); Quantidade de carbono orgânico no solo (g/dm <sup>3</sup> )
Melhoria de fluxo de nutrientes	I.5 – Matéria orgânica incorporada	Quantidade de matéria orgânica do solo (g/dm <sup>3</sup> )
Construção de solo antropogênico ou substrato	I.6 – Agregação do solo *	DMG dos agregados
	I.7 – Fertilidade química do solo	pH (adimensional); K, Ca, Mg, Na, H+Al, Al, SB e CTC (mmolc/dm <sup>3</sup> ); P; S-SO <sub>4</sub> e micronutrientes (mg/dm <sup>3</sup> ).
Retenção hídrica	I.8 – Teor de umidade do solo	Teor de umidade = $100 \times [(Mu - Ms) / Ms]$ (%)
Formação de habitats	I.9 – Temperatura do solo	Temperatura em graus Celsius (°C)
	I.10 – Teor de umidade do solo	Teor de umidade = $100 \times [(Mu - Ms) / Ms]$ (%)
	I.11 – Volume de serapilheira	Média do volume de serapilheira por área de cada tratamento (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )
	I.12 – Área com cobertura vegetal	Área com cobertura vegetal de cada tratamento / área total do talude correspondente (%)
	I.13 – Grupos funcionais da vegetação *	Número de grupos funcionais (Nº / tratamento)
	I.14 – Grupos de fauna que utilizam a área em recuperação *	Número de grupos funcionais da fauna (Nº / tratamento)
Reuso de resíduo	I.15 – Resíduos usados	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ; kg/m <sup>2</sup> ; unid./m <sup>2</sup>
Controle de erosão e estabilização de sedimentos	I.16 – Área de solo exposto	Área com substrato exposto de cada tratamento / área total do talude correspondente (%)
	I.17 – Ocorrência de feições erosivas *	Extensão da feição erosiva (m); área com feição erosiva (m <sup>2</sup> )

**(\*) não foi objeto de valoração econômica**

**Fonte: elaborado pelos autores**



Figura 4 – Desempenho das soluções quanto aos seguintes componentes: (A) Aplicabilidade das técnicas de RAD; (B) Serviços ecossistêmicos ou ambientais a gerar; (C) Valoração econômica dos serviços ecossistêmicos; (D) Desempenho geral das soluções instaladas



Fonte: Elaborado pelos autores com dados do Observatório Nacional (2018)

Nota: Erro máximo encontrado da ordem de 3 min e incerteza máxima da ordem de  $\pm 2$  min.

## 4 Conclusões

O projeto de pesquisa contemplou a abordagem de técnicas com vistas a potencializar os benefícios ambientais da RAD frente ao convencionalmente adotado em mineração. Para tal, propôs-se o desenvolvimento de soluções com base na associação entre técnicas de bioengenharia de solos e a geração e manutenção de serviços ecossistêmicos ou ambientais, que podem ser previstas em estudos de RAD para todas as fases de AIA. Três soluções foram desenvolvidas, sendo comparadas entre si e com situações que compreendem o tratamento com emprego de rejeito de beneficiamento do minério e área sem qualquer tipo de solução.

Nesse contexto, desenvolveu-se, ainda, abordagem apropriada para a identificação e seleção de serviços ecossistêmicos a serem considerados no monitoramento, além de avaliação integrada, segundo aplicabilidade das técnicas desenvolvidas, serviços ecossistêmicos potencialmente gerados e valoração econômica desses mesmos serviços. Essa abordagem tende a contribuir na demonstração dos benefícios ambientais que podem decorrer da RAD em mineração.

O projeto de pesquisa contemplou a abordagem de técnicas com vistas a potencializar os benefícios ambientais da RAD frente ao convencionalmente adotado em mineração. Para tal, propôs-se o desenvolvimento de soluções com base na associação entre técnicas de bioengenharia de solos e a geração e manutenção de serviços ecossistêmicos ou ambientais, que podem ser previstas em estudos de RAD para todas as fases de AIA. Três soluções foram desenvolvidas, sendo comparadas entre si e com situações que compreendem o tratamento com emprego de rejeito de beneficiamento do minério e área sem qualquer tipo de solução.

Nesse contexto, desenvolveu-se, ainda, abordagem apropriada para a identificação e seleção de serviços ecossistêmicos a serem considerados no monitoramento, além de avaliação integrada, segundo aplicabilidade das técnicas desenvolvidas, serviços ecossistêmicos potencialmente gerados e valoração econômica desses mesmos serviços. Essa abordagem tende a contribuir na demonstração dos benefícios ambientais que podem decorrer da RAD em mineração.

## 5 Agradecimentos

Registram-se os agradecimentos especiais à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à empresa VALE S.A., pelo apoio ao Projeto de Pesquisa "Recuperação de áreas degradadas de mineração associando técnicas de bioengenharia de solos com a geração e manutenção de serviços ambientais" (Processo FAPESP nº 10/51233-7); a Caio Pompeu Cavallieri e colegas do IPT e de instituições parceiras que colaboraram direta ou indiretamente na realização do referido Projeto; Amarilis Lucia Casteli Figueiredo Gallardo pela coordenação do projeto em sua fase inicial; Márcio Augusto Rabelo Nahuz (*in Memoriam*), pela inestimável contribuição ao desenvolvimento da pesquisa e pela coordenação do projeto em suas etapas intermediárias; e à Comissão Organizadora do 4º Congresso Brasileiro de Avaliação de Impacto (4º CBAI), realizado pela Associação Brasileira de Avaliação de Impacto, por autorizar a reprodução e divulgação do artigo publicado nos Anais do referido congresso.

## 6 Referências

BAKER, J.; SHEATE, W. R.; PHILLIPS, P.; EALES, R. Ecosystem services in environmental assessment—help or hindrance? **Environmental Impact Assessment Review**, v. 40, p. 3-13, 2013.

EVANS, D. M.; ZIPPER, C. E.; BURGER, J. A.; STRAHM, B. D.; VILLAMAGNA, A. M. Reforestation practice for enhancement of ecosystem services on a compacted surface mine: Path toward ecosystem recovery. **Ecological Engineering**, v. 51, p. 16-23, 2013.

GENELETTI, D. Assessing the impact of alternative land-use zoning policies on future ecosystem services. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 40, p. 25-35, 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Recuperação de áreas degradadas de mineração associando técnicas de bioengenharia de solos com a geração e manutenção de serviços ambientais**. São Paulo: IPT, 2016. 115 p. (Relatório Científico Final - Processo FAPESP nº 2010/51233-7).

JACOB, C.; VAISSIERE, A. C.; BAS, A.; CALVET, C. Investigating the inclusion of ecosystem services in biodiversity offsetting. **Ecosystem Services**, v. 21, p. 92-102, 2016.

KARJALAINEN, T. P.; MARTTUNEN, M.; SARKKI, S.; RYTKÖNEN, A. M. Integrating ecosystem services into environmental impact assessment: an analytic-deliberative approach. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 40, p. 54-64, 2013.

LARONDELLE, N.; HAASE, D. Valuing post-mining landscapes using an ecosystem services approach: An example from Germany. **Ecological Indicators**, v. 18, p. 567-574, 2012.

LONGO, M. H. C. **Serviços ecossistêmicos e a atividade minerária: um estudo de caso no Vale do Ribeira, SP**. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, Piracicaba, 2014.

LONGO, M. H. C.; RODRIGUES, R. R. Análise de serviços ecossistêmicos na Avaliação de Impacto Ambiental: proposta e aplicação em um empreendimento minerário. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 43, p. 103-125, 2017. (Edição Especial: Avaliação de Impacto Ambiental).

ROSA, J. C. S.; SÁNCHEZ, L. E. Advances and challenges of incorporating ecosystem services into impact assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 180, p. 485-492, 2016.

ROSA, J. C. S.; SÁNCHEZ, L. E. Is the ecosystem service concept improving impact assessment? Evidence from recent international practice. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 50, p. 134-142, 2015.

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, C. A.; GALLARDO, A. L. C. F.; SILVA, É. D. D.; MELLO, Y. C. D.; RIGHI, C. A.; SOLERA, M. L. Environmental services associated with the reclamation of areas degraded by mining: potential for payments for environmental services. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, n. 2, p. 137-168, 2016.

TARDIEU, L.; ROUSSEL, S.; THOMPSON, J. D.; LABARRAQUE, D.; SALLES, J. M. Combining direct and indirect impacts to assess ecosystem service loss due to infrastructure construction. **Journal of Environmental Management**, v. 152, p. 145-157, 2015.

WILKER, J.; RUSCHE, K.; BENNING, A.; MACDONALD, M. A.; BLAEN, P. Applying ecosystem benefit valuation to inform quarry restoration planning. **Ecosystem Services**, v. 20, p. 44-55, 2016.

