



Disponibilidade de frações orgânicas de fósforo no solo de áreas mineradas em processo de restauração ecológica.

Thaís de Marchi Soares⁽²⁾; Denise Terezinha Bizuti⁽³⁾; Takashi Muraoka⁽⁴⁾; Pedro Henrique Santin Brancalion⁽⁵⁾;

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos do Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq.

⁽²⁾ Mestranda em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente, Universidade de São Paulo, Cena-USP, Piracicaba, São Paulo, (thais.msoares@usp.br); ⁽³⁾ Doutoranda em Ecologia Aplicada; Cena-USP, (denize_bizuti@yahoo.com.br); ⁽⁴⁾ Professor titular USP-Esalq, Piracicaba, São Paulo (muraoka@cena.usp.br); ⁽⁵⁾ Professor Doutor, USP- Esalq, Piracicaba, São Paulo, (pedrob@usp.br).

RESUMO: Durante a exploração das jazidas minerais o solo é um dos componentes do meio físico mais vulnerável, sendo sua recuperação necessária para o início da revegetação. Deste modo, o objetivo desse estudo foi avaliar a disponibilidade de frações orgânicas de fósforo no solo de áreas recém-mineradas, restauradas com seis e vinte anos e com floresta nativa. A distribuição de uma camada de 5 cm de topsoil foi procedimento comum para todas as áreas em processo de restauração. Em cada área estudada, foram estabelecidas 2 unidades amostrais correspondendo a um ponto de coleta composto por 15 sub-amostras, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm no perfil do solo. O fósforo orgânico (Po) foi avaliado utilizando-se o fracionamento sequencial de Hedley et al. (1982). O delineamento foi inteiramente casualizado, no esquema de parcelas subdivididas, os resultados submetidos à análise de variância e comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Concluiu-se que o emprego do topsoil contribuiu para a recuperação do fósforo moderadamente lábil a partir de seis anos da implantação da restauração. Já a fração orgânica lábil só foi recuperada a partir de vinte anos, e as frações não lábeis mantiveram-se constantes.

Termos de indexação: Topsoil, fracionamento sequencial.

INTRODUÇÃO

Historicamente, a extração de minérios é uma atividade básica na economia nacional, já que o subsolo brasileiro é um dos mais importantes depósitos de minérios do mundo (Dnrm, 2014). Entretanto, o setor causa graves impactos ambientais, sendo o solo um dos componentes do meio físico mais vulnerável durante a exploração das jazidas minerais (Colturato, 2009).

Em situações como esta, de extrema degradação, o solo não oferece as condições mínimas necessárias para o início do processo

sucessional. Porém, esse problema pode ser minimizado com a transposição de solo proveniente de áreas de florestas que foram suprimidas para as áreas que necessitam ser restauradas (Jakovac, 2007; Longo et al. 2011). Tal material, denominado topsoil, tem demonstrado excelentes resultados na recuperação de áreas degradadas por mineração no que se refere a melhoria dos atributos do solo (Jakovac, 2007; Parrota & Knowles, 2008; Longo et al., 2005; Moreira, 2004).

Bertacchi (2012), avaliando com diferentes idades, notou que os maiores valores de fósforo (P) e matéria orgânica foram encontrados na área de regeneração mais antiga. Resultados semelhantes foram obtidos por Resende et al. (1988) que concluíram que espécies pioneiras são mais responsivas ao fornecimento de P indicando sua necessidade para o desenvolvimento dessas espécies. Portanto, verifica-se que o suprimento de P é essencial em florestas jovens, com o intuito de se alcançar estádios de sucessão mais avançados.

Em sistemas florestais, que promovem um acúmulo de matéria orgânica no solo, o P disponível está associado ao fósforo lábil, sendo capazes de manter adequadamente a disponibilidade de P para as plantas mediante a mineralização do Po (Fontes, 2006; Szott & Melendez, 2001). Desta maneira, a ciclagem do fósforo em ecossistemas naturais está associada, principalmente, à fase orgânica, ou seja, ao Po, protegendo-o do dreno solo, mantendo-o disponível à vegetação (Bizuti, 2011).

Sendo o solo essencial para o sucesso da restauração de áreas degradadas por mineração, não restam dúvidas de sua importância quando se trata de entender os mecanismos ecológicos envolvidos no processo de restauração de uma área degradada.

O objetivo desse estudo foi avaliar a disponibilidade de frações orgânicas de fósforo no solo de áreas recém-mineradas, restauradas com seis e vinte anos e com floresta nativa.



MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no município de Poços de Caldas/MG, na Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) do Retiro Branco, pertencente à ALCOA S/A. O município situa-se em um planalto, cuja altitude média é de 1300 m, entre as coordenadas de 21°55'26" latitude Sul e 46°33'09" longitude oeste. Segundo Köppen, o clima é do tipo Cfb (subtropical úmido), apresenta temperatura média anual de 18,2 °C e pluviosidade média de 1.605 mm. A vegetação predominante no local é a Floresta Estacional Semidecidual de Altitude (Plano de Manejo, 2009).

Tratamentos e amostragens

Consideraram-se quatro tratamentos, sendo: áreas recém-mineradas (M), áreas em restauração há seis anos (R1) e 20 anos (R2), e florestas nativas secundárias (N).

O método de restauração florestal adotado nas áreas de estudos compreendeu: 1) recondicionamento do relevo, restabelecimento da drenagem e conservação do solo; 2) distribuição de uma camada de 5 cm de topsoil (serapilheira e horizonte O, do solo de floresta nativa) obtida após a supressão da vegetação nativa da área destinada à mineração de bauxita; 3) plantio adensado de mudas de diferentes espécies nativas (cerca de 5.000 indivíduos/ha); 4) adubações de cobertura e controle de gramíneas competidoras.

Para cada tratamento foram estabelecidas 4 unidades amostrais, cada uma correspondendo a um ponto de coleta composto por 15 sub-amostras, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm do perfil do solo.

Análises químicas

A caracterização química do solo das áreas estudadas foi realizada pelo Laboratório de Análise Química de Solo e Planta do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos-Araras.

Utilizou-se o método de Hedley et al. (1982) na determinação das formas de P, as quais foram: a) formas lábeis, isto é, P disponível (P-resina) e o P adsorvido à superfície dos colóides; b) formas pouco lábeis, que compreendem P inorgânico (Pi) (ligado a Fe e a Al) e Po (ligado a compostos húmicos); c) formas não-lábeis, que incluem o P ligado a Ca e as formas mais estáveis de Po e Pi (P-residual).

O P resina foi estimado pela metodologia de Camargo et al. (2008). Os extratos de Pi foram determinado pelo método Murphy & Riley (1962), com neutralização parcial da acidez, com adição de NaOH e nitrofenol. O P total (Pt) foi determinado por metodologia descrita por Usepa (1971). Po foi

obtido pela diferença entre o Pt e Pi em cada fração. O solo remanescente foi submetido à digestão com H₂SO₄ + H₂O₂ a 360° (P residual). Tanto o Pt como P residual foram mensurados por metodologia desenvolvida pela Embrapa (2005).

Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade. O delineamento foi o inteiramente casualizado, no esquema de parcelas subdivididas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se que não houve interação entre os fatores idade sucessional e profundidade do solo para as variáveis apresentadas nas **tabelas 1 e 2**, ou seja, apresentaram comportamentos independentes e, portanto, foram analisados de forma separada. O mesmo não ocorreu para as variáveis da **tabela 3**.

Tabela 1: Frações de P, em mg kg⁻¹, extraídas pelo Fracionamento Sequencial de Hedley et al. (1982) dos solos estudados, em relação ao fator idade sucessional.

Área	Fator Idade Sucessional					
	P resina	Pt NaHCO ₃	Pi NaHCO ₃	Pi residual	PHCI	PTotal
RM	2,3 b	10,8 b	5,5 a	627,1 a	6,6 a	719,8 a
A6	1,8 c	14,3 b	5,4 a	627,6 a	6,7 a	724,5 a
A20	3,8 a	17,3 ab	7,0 a	736,9 a	5,7 a	928,2 a
N	4,4 a	25,1 a	9,0 a	945,0 a	5,3 a	1145,7a

Obs: Letras iguais minúsculas em coluna não diferem entre si (Tukey 5%). RM = recém minerada, A6 = em restauração à 6 anos, A20 = em restauração à 20 anos, N = floresta nativa.

Tabela 2: Frações de P em mg kg⁻¹ extraídas pelo Fracionamento Sequencial de Hedley et al. (1982) dos solos estudados, em relação ao fator profundidade.

Área	Fator Profundidade					
	P resina	Pt NaHCO ₃	Pi NaHCO ₃	Pi residual	PHCI	PTotal
0-5	4,0 a	18,0 ab	6,8 ab	725,6 a	5,8 a	842,5 a
0-10	3,5 ab	22,0 a	8,8 a	738,7 a	6,5 a	914,5 a
10-20	3,0 bc	17,2 ab	7,9 a	738,7 a	5,8 a	898,8 a
20-40	2,5 c	14,2 b	5,2 b	725,6 a	5,8 a	871,7 a
40-60	2,5 c	13,1 b	4,9 b	724,9 a	6,3 a	870,3 a

Obs: Letras iguais minúsculas em coluna não diferem entre si (Tukey 5%). RM = recém minerada, A6 = em restauração à 6 anos, A20 = em restauração à 20 anos, N = floresta nativa.

As variáveis P residual, P HCl e PTotal (PT), não apresentaram diferenças estatísticas tanto para o fator idade sucessional quanto para o fator profundidade (**Tabelas 1 e 2**). O fato de P Total não ter apresentado diferença estatística entre as áreas estudadas demonstra que o tamanho do seu reservatório não é diretamente proporcional ao P



disponível no solo. Segundo Gatiboni (2003) a estimativa do PT não informa sobre a disponibilidade deste elemento, já que apenas uma parte do PT do solo é disponibilizada às plantas. Em solos tropicais são encontrados óxidos de ferro e alumínio, fixadores de P. A elevada acidez e baixa CTC destes solos favorecem sua ligação com tais óxidos, prejudicando sua ligação com o cálcio (Soares & Casagrande, 2013). Este comportamento pode justificar os teores baixos de P HCl encontrados, cerca de 6 mg kg^{-1} , e a semelhança dessas frações entre as idades sucessionais. Quando a entrada de P no ecossistema ocorre via fertilização, as frações lábeis são favorecidas e o P residual, ocluso, é pouco alterado (Ceretta, 2010). Nas áreas estudadas, o topsoil pode ter cumprido o papel de fertilizar o solo, favorecendo as frações lábeis e moderadamente lábeis durante a trajetória sucessional.

Constatou-se que os compartimentos do P resina, Pt NaHCO_3 e P lábil, foram restaurados por volta de 20 anos após o emprego do topsoil (**Tabela 3**). Após ser absorvido pelas plantas, a reposição do P na solução do solo é feita pelo P-lábil. Porém, sua reposição pela fração moderadamente lábil é lenta, logo, os resultados sugeriram que, em geral, o topsoil acelera a resiliência desse ecossistema e a recuperação da fração moderadamente lábil de P no solo, no início da sucessão florestal.

A partir de 6 anos de restauração já há indícios de recuperação das frações moderadamente lábeis (Pi, Po e Pt NaOH), porém, não houve diferença significativa entre as profundidades (**Tabela 3**). Com o intuito de analisar o topsoil proveniente de áreas de mineração de bauxita, Moreira (2004) concluiu que esse apresentou teores de nutrientes 4% maiores do que da área original, devido ao fato de este material ser empilhado juntamente com restos da cobertura vegetal, o que explicaria os teores de P encontrados na área restaurada há 6 anos. O topsoil funcionaria como catalisador da recuperação da fertilidade durante a fase de reestruturação das florestas tropicais e a manutenção do P no solo ocorreria via serapilheira.

A área recém-minerada não apresentou diferença significativa em seu conteúdo de P, com exceção P resina e Pt NaOH, em comparação com a restaurada há 6 anos (**Tabelas 2 e 3**). No início da pedogênese, os colóides orgânicos são pouco intemperizados e a quantidade de sítios adsorventes no solo é pequena, sendo o P retido no solo com baixa energia de ligação, ocorrendo sua maior biodisponibilização neste estágio de formação do solo (Gatiboni, 2003). Considerando que durante o processo de mineração de bauxita o decapeamento do solo é bastante profundo, chegando a expor fragmentos de rocha, pressupõe-se que nas áreas recém-mineradas haja alta

disponibilidade de P, o que explica os resultados encontrados.

Tabela 3: Frações de P extraídas pelo Fracionamento Seqüencial de Hedley et al. (1982) dos solos estudados, as quais apresentaram interação entre os fatores idade sucessional e profundidade.

Áreas de estudo				
Prof.(cm)	RM	A6	A20	N
Po NaHCO_3 (mg kg^{-1})				
0-5	5,6 Ba	12,9 ABa	17,8 Ab	18,4 Aa
0-10	6,2 Ba	12,6 Aa	18,0 Aa	19,6 Aa
10-20	3,7 Ca	5,5 BCa	16,9 Aa	13,1 ABab
20-40	3,8 Ba	10,8 Aa	8,1 ABb	11,7 Aab
40-60	5,7 Aa	8,7 Aa	10,6 Aab	7,5 Ab
Pi NaOH (mg kg^{-1})				
0-5	30,3 Ba	47,1 Aba	85,4 Aa	72,3 Aa
0-10	33,0 Aa	43,5 Aa	76,2 Aab	73,9 Aa
10-20	26,7 Aa	45,9 Aa	43,4 Ab	46,3 Aa
20-40	57,6 Aa	44,8 Aa	55,1 Aab	62,7 Aa
40-60	53,4 Aa	41,5 Aa	53,8 Aab	73,2 Aa
Pt NaOH (mg kg^{-1})				
0-5	69,6 Ba	128,3 Aa	184,4 Aab	158,5 Aa
0-10	79,1 Ca	114,6 BCa	212,6 Aa	164,3 ABa
10-20	61,8 Ca	111,6 Ba	171,1 Aab	193,8 Aa
20-40	71,9 Ba	117,2 Aa	150,1 Ab	154,0 Aa
40-60	81,6 Ba	79,6 Bb	102,6 Bc	158,5 Aa
Po NaOH (mg kg^{-1})				
0-5	51,4 Ba	82,2 ABab	110,7 Aa	90,5 ABb
0-10	47,1 Ba	102,6 Aab	136,4 Aa	93,1 ABab
10-20	42,0 Ba	53,0 Bb	133,1 Aa	153,4 Aa
20-40	8,2 Bb	72,4 Aab	80,5 Aab	97,2 Aab
40-60	30,7 Bab	45,8 ABb	53,2 ABb	83,1 Ab

Obs: Letras iguais minúsculas em coluna e maiúscula em linha não diferem entre si (Tukey 5%). RM = recém minerada, A6 = em restauração à 6 anos, A20 = em restauração à 20 anos, N = floresta nativa.

CONCLUSÕES

Através deste estudo, conclui-se que a partir de seis anos da implementação da restauração o emprego do topsoil contribui efetivamente para a recuperação do P moderadamente lábil no solo.

A fração orgânica lábil necessita de mais tempo para ser recuperada, ocorrendo em níveis satisfatórios apenas a partir de vinte anos do início do processo de restauração.

As frações não lábeis, oclusas, mantêm-se constantes, mesmo após a degradação ocorrida devido à atividade de mineração.

REFERÊNCIAS

BERTACCHI, M.I.F. Micro-sítio como filtro para o estabelecimento de regenerantes arbóreos em áreas restauradas. 2012. 117f. Dissertação (Mestre em Ciências)- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.



BIZUTI, D.T. **Ciclagem do fósforo em Floresta Ombrófila Densa dos Núcleos de Picinguaba e Santa Virgínia-SP.** 2011. 115f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; RHEINHEIMER, D. Fracionamento do nitrogênio, fósforo, enxofre orgânico. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, 2008. p. 243-258.

CERETTA, C.A.; LORENSINI, F.; BRUNETTO, G.; GIROTTO, E.; GATIBONI, L.C.; LOURENZI, C.R.; TIECHER, T.L.; CONTI, L.; TRENTIN, G.; MIOTTO, A. Frações de fósforo no solo após sucessivas aplicações de dejetos de suínos em plantio direto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 45, n. 6, p. 593-602, 2010.

COLTURATO, S.C.O. Aspectos ambientais da mineração de argila na região de Rio Claro e Santa Gertrudes, SP: Proposta metodológica para ponderação dos impactos negativos. 2002. 137 p. Dissertação (Mestrado). IGCE, UNESP, 2009.

DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral (Brasília). Sumário Mineral 2014. vol 32. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=736> Acesso em: 20 fev. 2014.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Pecuária. Manual de laboratórios: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos. São Carlos: EMBRAPA, CNCS, 2005. p.80.

FONTES, A.G. Ciclagem de nutrientes em sistemas agroflorestais de cacau no sul da Bahia. Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2006. 71p.

GATIBONI, L.C. Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas. 2003. 247p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory

incubations. Soil Science Society of American Journal, Madison, v. 46, n. 4, p. 970-976, 1982.

JAKOVAC, A.C.C. O uso do banco de sementes florestal contido no *topsoil* como estratégia de recuperação de áreas degradadas. 2007. 142 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

LONGO, R.M.; RIBEIRO, A.I.; MELO, W.J. Caracterização física e química de áreas mineradas pela extração de cassiterita. Bragantia, Campinas, v.64, n.1, p.101-107, 2005.

LONGO, M.R.; RIBEIRO, A.I.; MELO, W.J. Uso da adubação verde na recuperação de solos degradados por mineração na floresta amazônica. Bragantia, 70: 139-146, 2011.

MOREIRA, P.R.; Manejo do solo e recomposição da vegetação com vistas à recuperação de áreas degradadas pela extração de Bauxita, Poços de Caldas, MG. 2004. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Biológicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2004.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta, Oxford, v. 27, p. 31-36, 1962.

PARROTA, J.A.; KNOWLES, O.H. Restauração florestal em áreas de mineração de bauxita na Amazônia. In: KAGEYAMA, P.Y.; OLIVEIRA, R.E.; MORAES, L.F.M.; ENGEL, V.L.; GANDARA, F.B. Restauração Ecológica de Ecossistemas Naturais. Botucatu, 2008. p. 307 -330.

RESENDE, M.; CURI, N.; SANTANA, D.P. Pedologia e fertilidade do solo: Interações e aplicações. Brasília: MEC, Lavras: ESAL, Piracicaba: POTAFOS, 1988. 81p.

SOARES, M.R.; CASAGRANDE, J.C. O solo: base para a restauração ecológica. In: Anais do V Simpósio de Restauração Ecológica, São Paulo, 2013, p. 95-101.

SZOTT, L.T.; MELENDEZ, G. Phosphorus availability under annual cropping, alley cropping, and multistrata agroforestry systems. Agrofor. Syst., 53:125-1132, 2001.

USEPA, United States Environmental Protection Agency. Methods of chemical analysis for water and wastes. Cincinnati, 1971. 312 p.