

RECUPERAÇÃO DA COBERTURA VEGETAL E DA ATIVIDADE FOTOSINTÉTICA EM JAZIDAS REVEGETADAS NO DISTRITO FEDERAL

RECOVERY OF VEGETATION COVER AND PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY
IN REVEGETATED MINE SITES IN THE BRAZILIAN FEDERAL DISTRICT

Rodrigo Studart Corrêa

PhD em Solos e Nutrição de Plantas pela University of Melbourne (UniMelb). Docente do Programa de Pós-Graduação e Ciências Ambientais da Universidade de Brasília (UnB) – Brasília (DF), Brasil.

Alexander Paulo do Carmo Balduino

Mestre em Botânica pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Doutorando em Ciências Ambientais pela UnB – Brasília (DF), Brasil

Cláudio Tavares Viana Teza

Doutor em Geociências Aplicadas pela UnB. Docente do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Católica de Brasília (UCB) – Brasília (DF), Brasil.

Gustavo Macedo de Mello Baptista

Doutor em Geologia pela UnB. Docente do Programa de Pós-Graduação e Ciências Ambientais da UnB – Brasília (DF), Brasil.

Douglas José da Silva

Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Docente do curso de Engenharia Ambiental da UCB – Brasília (DF), Brasil.

Endereço para correspondência:

Rodrigo Studart Corrêa –
Universidade de Brasília (UnB) –
Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais (FUP) – Caixa
Postal: 04.401 – 70842-970 – Brasília
(DF), Brasil – E-mail: rscorrea@unb.br

Recebido: 03/11/2016

Aceito: 22/11/2017

RESUMO

A recuperação da cobertura vegetal e da capacidade de produção de biomassa são etapas essenciais para a reabilitação de ecossistemas. Por esse motivo, este trabalho avaliou, com o uso de sensoriamento remoto, o padrão temporal de desenvolvimento da cobertura vegetal e da atividade fotossintética em jazidas de cascalho revegetadas por meio de cinco diferentes tratamentos comumente usados no Distrito Federal: regeneração natural, plantio de árvores, plantio de árvores conjugadas a ervas, reposição da camada superficial do solo conjugada ao plantio de árvores e incorporação de lodo de esgoto aos horizontes de solos expostos pela mineração. Os resultados indicaram que uma jazida minerada deixada à regeneração natural demandaria um tempo secular para obter uma cobertura vegetal satisfatória. O plantio exclusivo de árvores nativas do Cerrado demandou 15 anos para prover 80% de cobertura vegetal à área estudada. A reposição da camada superficial do solo sobre a superfície minerada ou a incorporação de lodo de esgoto aos horizontes de solos expostos pela mineração conciliou os menores tempos de desenvolvimento da cobertura vegetal (2,5 a 5,0 anos) e os maiores percentuais de superfície revegetada (80 a 95%). Todavia, os cinco tratamentos estudados limitaram a atividade fotossintética a 60–80% dos valores medidos em áreas nativas de Cerrado.

Palavras-chave: mineração; restauração; índices de vegetação.

ABSTRACT

The recovery of biomass production capacity is an essential step towards the rehabilitation of ecosystems. In this work we used remote sensing to evaluate the temporal development of vegetation cover and photosynthetic activity in gravel mines revegetated with five techniques commonly used in the Brazilian Federal District: natural regeneration, tree plantation, cultivation of trees + herbs, topsoil replacement + tree plantation, and sewage sludge incorporation into mining substrates. Results showed that mines left under natural regeneration would require a secular time to achieve a satisfactory vegetation cover. Tree plantation required fifteen years to provide a mine 80% of vegetation cover. The use of topsoil + trees or the incorporation of sewage sludge into mining substrates achieved the fastest development of vegetation cover (2.5 to 5.0 years) and the highest percentages of revegetated surface (80 to 95%). However, the five study revegetation techniques achieved from 60 to 80% the values of photosynthetic activity measured in native areas of Cerrado.

Keywords: mining; restoration; vegetation index.

INTRODUÇÃO

A mineração expõe à superfície materiais genericamente denominados estéreis, rejeitos ou substratos, que são inadequados ao estabelecimento e ao desenvolvimento de plantas e de outros organismos (DUTTA; AGRAWAL, 2002; SILVA; CORRÊA, 2010). Substratos minerados funcionam como filtros ecológicos (DAJOZ, 2005) e limitam o recrutamento de organismos em jazidas, que podem permanecer desprovidas de cobertura vegetal por séculos (DUTTA; AGRAWAL, 2002). A intervenção humana é capaz de acelerar o restabelecimento da vegetação em locais minerados e, em alguns casos, abreviar o processo de sucessão ecológica (STARR *et al.*, 2013).

A reabilitação de um local degradado deve prover condições topográficas, edáficas e biológicas favoráveis ao restabelecimento de processos ecológicos (ALVES *et al.*, 2007). Nesse sentido, a produção primária é fator chave para o funcionamento de ecossistemas (ROSCHE *et al.*, 2012), e o estabelecimento de cobertura vegetal em áreas mineradas é condição necessária para fomentar a restauração por meio da sucessão ecológica. A fotossíntese produz matéria e gera energia para o funcionamento dos ecossistemas, e a vegetação e o solo conectam as fases líquida, sólida e gasosa dos ciclos biogeoquímicos nesses ambientes (DAJOZ, 2005). Dessa forma, o desenvolvimento da cobertura vegetal e da atividade fotossintética retrata as condições gerais da vegetação que irá prover recursos sucessionais em uma área em processo de recuperação (SILVA *et al.*, 2013; STARR *et al.*, 2013).

Projetos de restauração ecológica priorizam o plantio de espécies arbóreas, pois árvores incrementam a estrutura e a complexidade de ecossistemas e podem acelerar a regeneração de ambientes degradados (DUTTA; AGRAWAL, 2002; PINHEIRO *et al.*, 2009; STARR *et al.*, 2013). Porém, o tempo necessário para o crescimento de espécies arbóreas as torna, em seus primeiros anos de desenvolvimento, menos eficientes do que as ervas para proverem uma cobertura vegetal sobre superfícies mineradas. Ervas oferecem ambientes estruturalmente mais simples, mas crescem rápido, são eficientes para controlarem a erosão do solo, incorporam carbono a substratos e aceleram a pedogênese (CORRÊA *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2013). No Distrito Federal (DF) a restauração das jazidas mineradas segue o modelo silvicultural predominante no país (RODRIGUES *et al.*, 2009; CORRÊA *et al.*, 2015), e as áreas mineradas têm sido revegetadas com espécies

arbóreas e herbáceas, separadamente ou conciliadas (STARR *et al.*, 2013; CORRÊA *et al.*, 2015).

Substratos minerados que não tiveram a camada superficial do solo preservada (*topsoil*) demandam grande quantidade de matéria orgânica (MO) para serem revegetados (CORRÊA *et al.*, 2008). Visando suprir a demanda por MO, a incorporação de lodo de esgoto a substratos minerados foi testada pela primeira vez no DF em 1994, tornando-se rotina a partir de 2003. O lodo de esgoto produzido no DF é um subproduto do tratamento de esgotos domésticos e apresenta teores significativos de MO (550,0 g kg⁻¹), nitrogênio – N (5,5 g kg⁻¹), fósforo – P (4,5 g kg⁻¹) e outros nutrientes presentes em sua matéria seca. O estabelecimento espontâneo de uma cobertura vegetal herbácea é o efeito mais evidente após a incorporação de lodo de esgoto a substratos minerados no DF (SILVA *et al.*, 2013).

Desenvolvimento da cobertura vegetal, ausência de sinais de erosão, sobrevivência e desenvolvimento da vegetação implantada, recrutamento de espécies nativas e invasão por espécies alóctones são parâmetros frequentemente utilizados no monitoramento de ecossistemas em restauração (BRANCALION *et al.*, 2012). Apesar da influência da fertilidade do solo sobre a sobrevivência e o desenvolvimento de plantas (ALVES *et al.*, 2007; SILVA; CORRÊA, 2010) e da importância da fotossíntese para a manutenção dos ecossistemas terrestres e de seus processos ecológicos (DAJOZ, 2005), não se tem conhecimento de trabalhos ou normas brasileiras que utilizem a recuperação da capacidade fotossintética como indicador da restauração de ecossistemas (IBAMA, 2011). O sensoriamento remoto de coberturas vegetais e da atividade fotossintética tem sido utilizado em estudos de sazonalidade de vegetação nativa (HUETE *et al.*, 2006; SILVEIRA *et al.*, 2008; BECERRA *et al.*, 2009), caracterização e identificação de fitofisionomias (LIESENBERG *et al.*, 2007; COUTO JR. *et al.*, 2011), desmatamento (JAMALI *et al.*, 2015) e conservação da biodiversidade (TRACEWSKI *et al.*, 2016), mas é negligenciado em estudos de restauração ecológica (PINHEIRO *et al.*, 2009; BRANCALION *et al.*, 2012; STARR *et al.*, 2013; CORRÊA *et al.*, 2015). Incrementos de biomassa, cobertura vegetal e diversidade são parâmetros associados que são movidos pela fotossíntese durante o processo de sucessão ecológica (GOULDEN *et al.*, 2011; DUFFY *et al.*, 2017). Portanto, a recuperação da capacidade fotossin-

tética é processo inerente à restauração de ecossistemas (GOULDEN *et al.*, 2011). Em face do exposto, este trabalho visou avaliar, por meio de imagens de satélite, o padrão temporal de desenvolvimento da cobertura

vegetal e do nível de atividade fotossintética em jazidas mineradas e posteriormente revegetadas no DF por meio de cinco tratamentos (T_1 a T_5) que retratam as práticas de restauração utilizadas localmente.

MATERIAL E MÉTODOS

Áreas de estudo

Sete jazidas de cascalho, escavadas em área de Cambissolo sob Cerrado sentido restrito, foram selecionadas para este estudo. O clima predominante no DF é o Tropical de Savana – Aw (Köppen), e a precipitação média anual varia entre 1.200 e 1.600 mm, com 84% do volume de chuvas ocorrendo durante o verão. A temperatura média anual oscila entre 18 e 22°C, e a umidade relativa do ar varia entre 12 e 85% (INMET, 2017).

As sete jazidas selecionadas foram revegetadas seguindo cinco tratamentos, descritos a seguir (Figura 1):

- T_1 : jazida abandonada à regeneração natural (controle);
- T_2 : jazida revegetada com espécimes arbóreos nativos do Cerrado;
- T_3 : jazida revegetada com espécimes herbáceos e arbóreos nativos do Cerrado;
- T_4 : jazida revegetada com reposição da camada superficial do solo (*topsoil*) e plantio de espécimes arbóreos nativos do Cerrado;

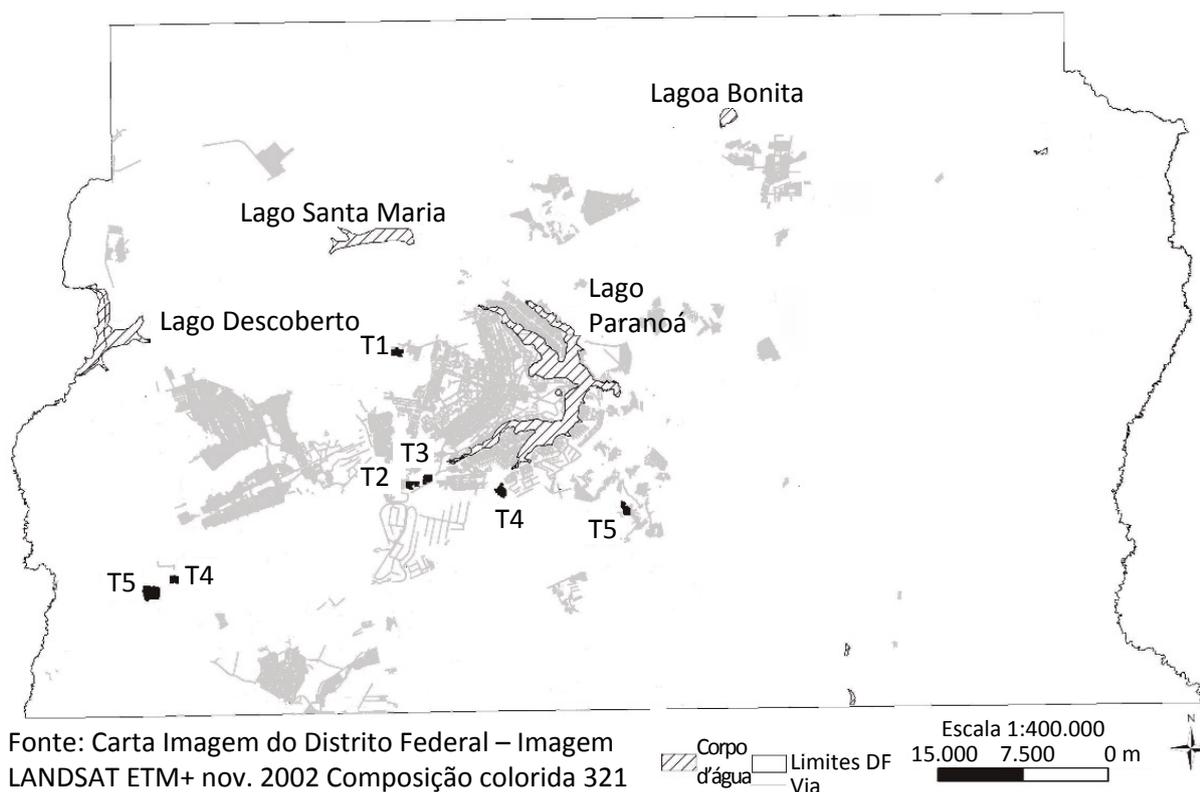


Figura 1 – Localização das jazidas estudadas no Distrito Federal (indicadas por tratamento – T_1 a T_5).

- T₅: jazida espontaneamente revegetada após a incorporação de lodo de esgoto ao substrato exposto.

O tratamento T₁ (controle) refere-se a uma jazida explorada em 1969 e abandonada à sucessão autogênica na área do Parque Nacional de Brasília, onde as condições de sucessão são apropriadas (CORRÊA et al., 2007). O tratamento T₂ refere-se a uma jazida explorada entre 1972 e 1975 na atual área do Santuário de Vida Silvestre do Riacho Fundo (SVSRF). Terraços foram construídos para controle da erosão, o substrato exposto foi escarificado até a profundidade de 20 cm e covas de 250 L foram adubadas com 20 L de composto de lixo e 50 g NPK - 4:14:8. A jazida foi revegetada em 2003 exclusivamente com espécimes arbóreos nativos do bioma Cerrado a uma densidade de 625 árvores por hectare, com 77,8% de plantas sobreviventes até o final da segunda estação de crescimento (SILVA; CORRÊA, 2008). O tratamento T₃ refere-se a uma jazida revegetada com espécimes herbáceos e arbóreos do Cerrado, também situada no SVSRF, que apresenta o mesmo histórico de exploração, data de revegetação e tratamento das covas da jazida anterior (T₂). Adicionalmente a T₂, composto de lixo (20 m³ ha⁻¹) e fertilizante químico (1,5 Mg ha⁻¹ de NPK - 4:14:8) foram incorpora-

dos ao substrato exposto para a implantação de um estrato herbáceo entre o estrato arbóreo no tratamento T₃ (SILVA; CORRÊA, 2008).

O tratamento T₄ refere-se a duas jazidas que receberam a camada superficial do solo (*topsoil*) espalhada sobre superfície minerada antes do plantio de espécimes arbóreos nativos do Cerrado: uma jazida está situada à margem do km 14,5 da Rodovia BR-060 e fora explorada em 2001 e revegetada em 2003. A outra jazida está localizada na Área de Proteção Ambiental das Bacias do Gama e Cabeça de Veado, tendo sido explorada em 1960 e revegetada em 2005 (PINHEIRO et al., 2009). O tratamento T₅ se utilizou de duas jazidas que receberam lodo de esgoto: a primeira situa-se à margem do km 16 da Rodovia BR-060, explorada entre 1999 e 2001 e, em 2002, a dose de 250 t ha⁻¹ de lodo de esgoto (88% de umidade) foi mecanicamente incorporada ao seu substrato exposto. A segunda jazida que recebeu lodo de esgoto (T₅) situa-se à margem da Rodovia BR-251, foi explorada entre 2000 e 2001 e recebeu, em 2003, tratamento semelhante à jazida anterior. A vegetação sobre essas jazidas estabeleceu-se espontaneamente nos anos que sucederam à incorporação de lodo de esgoto (SILVA et al., 2013).

Análise da cobertura vegetal e da atividade fotossintética

A cobertura vegetal e a atividade fotossintética nas áreas de estudo foram avaliadas por meio do produto MOD13Q1 do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), que se encontra embarcado na plataforma Terra. As imagens MOD13Q1 do bimestre fevereiro-março dos anos de 2000 a 2013 foram selecionadas para análise. A escolha de um período fixo de aquisição das imagens (fevereiro-março) visou atenuar o efeito da sazonalidade climática sobre a vegetação, uma vez que a precipitação incipiente na época seca no bioma Cerrado é fator limitante à atividade fotossintética, principalmente do estrato herbáceo (HUETE et al., 2006; BECERRA et al., 2009). O bimestre fevereiro-março representa o fim da estação chuvosa na região, quando são medidos os mais elevados valores de atividade fotossintética no Cerrado (SILVEIRA et al., 2008; BECERRA et al., 2009).

Os dados MOD13Q1 são disponibilizados em formato de 16 bits e, por meio da multiplicação pelo fator de escala 0,0001, obtiveram-se dados normalizados que variam de -1 a 1. Resultados negativos representam áreas não fotossinteticamente ativas (NFA), e valores a partir de 0,03 representam a vegetação fotossinteticamente ativa (VFA). A percentagem de cobertura vegetal nas áreas estudadas foi calculada por meio da razão entre as áreas ocupadas por VFA e por NFA em cada imagem MOD13Q1 selecionada para este estudo. A intensidade da atividade fotossintética nas jazidas foi obtida a partir dos valores positivos do índice de vegetação melhorado (EVI) do produto MOD13Q1 no período fevereiro-março dos anos selecionados.

Coleta e análises químicas das amostras dos substratos revegetados

Três amostras de substrato revegetado compostas por dez subamostras foram coletadas entre 0 e 20 cm de

profundidade em cada uma das sete áreas de estudo. As amostras foram analisadas para carbono orgânico

pelo método da combustão úmida (Walkley-Black) e posterior titulação com uma solução 0,05 M de sulfato ferroso amoniacal. Os resultados de carbono orgânico foram multiplicados por 1,724 para se estimar a concentração de MO. Nitrogênio total (N-total) foi avaliado pelo método Kjeldahl de destilação. O pH foi medido com potenciômetro em uma solução 1:2,5 de solo-água e em CaCl_2 . Fósforo disponível (P-disponível) e potássio trocável (K-trocável) foram extraídos com solução Mehlich I ($0,025 \text{ N H}_2\text{SO}_4 + 0,05 \text{ N HCl}$). As concentrações de P-disponível foram determinadas em fotocolorímetro a 660 nm e as concentrações de K-tro-

cável em espectrofotômetro de absorção atômica com chama. Cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) foram extraídos com uma solução de KCl 1 N e suas concentrações determinadas em espectrofotômetro de absorção atômica com chama. Acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$) foi determinada por meio de uma solução tamponada de acetato de cálcio 0,5 M e posterior titulação com NaOH 0,05 M. A partir dos resultados obtidos, foram calculadas a capacidade de troca catiônica (CTC a pH 7), a soma de bases (S) e a porcentagem de saturação de bases (V%) dos substratos (Tabela 1), conforme a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (1997).

Tratamento dos dados

Os valores de cobertura vegetal e de atividade fotossintética foram inseridos no eixo das ordenadas de um gráfico, tendo o tempo decorrido em anos inse-

rindo no eixo das abscissas. Modelos de regressão foram preenchidos a partir desses dados, usando-se o programa Origin 9 Pro®. As respostas aos tratamentos

Tabela 1 – Respostas de cobertura vegetal e nível de atividade fotossintética nas jazidas estudadas em função do tratamento e do tempo.

Tratamento	Equação	R ²	Tempo até 80% de cobertura vegetal (anos)
Cobertura vegetal			
T ₁ – Regeneração natural (controle)	$\hat{Y} = 5,25 + 0,79X$	0,90	94,0
T ₂ – Revegetação com árvores	$\hat{Y} = 65,54 - 60,65e^{-0,77X}$	0,86	15,0
T ₃ – Revegetação com árvores e ervas	$\hat{Y} = 79,01 - 73,95e^{-1,92X}$	0,99	6,0
T ₄ – Revegetação com árvores e camada superficial do solo (<i>topsoil</i>)	$\hat{Y} = 94,56 - 81,49e^{-0,69X}$	0,99	2,5
T ₄ – Revegetação com árvores e camada superficial do solo (<i>topsoil</i>)	$\hat{Y} = 97,64 - 93,34e^{-0,45X}$	0,95	3,8
T ₅ – Revegetação com lodo de esgoto	$\hat{Y} = 96,76 - 90,21e^{-0,35X}$	0,83	4,9
T ₅ – Revegetação com lodo de esgoto	$\hat{Y} = 81,15 - 67,39e^{-1,10X}$	0,97	3,8
	Nível de atividade fotossintética		Tempo até atividade fotossintética máxima (anos)
T ₁ – Regeneração natural (controle)	$\hat{Y} = 0,070 + 0,004X$	0,62	> 94
T ₂ – Revegetação com árvores	$\hat{Y} = 0,320 + 0,021 \ln X$	0,71	5
T ₃ – Revegetação com árvores e ervas	$\hat{Y} = 0,323 + 0,022 \ln X$	0,82	2
T ₄ – Revegetação com árvores e camada superficial do solo (<i>topsoil</i>)	$\hat{Y} = 0,433 - 0,270e^{-0,134X}$	0,85	3
T ₄ – Revegetação com árvores e camada superficial do solo (<i>topsoil</i>)	$\hat{Y} = 0,239 + 0,030 \ln X$	0,96	3
T ₅ – Revegetação com lodo de esgoto	$\hat{Y} = 0,293 + 0,042 \ln X$	0,90	7
T ₅ – Revegetação com lodo de esgoto	$\hat{Y} = 0,493 - 0,334e^{-0,041X}$	0,61	6

foram ajustadas às equações obtidas pelas regressões (CORRÊA et al., 2008). A eficiência de cada tratamento em prover cobertura vegetal e atividade fotossintética foi definida como a função resposta dessa cobertura e dessa atividade ao tempo decorrido após a intervenção nas jazidas mineradas (BOLLAND, 1997). Os valores máximos de cobertura vegetal e de atividade fotossintética em cada área foram obtidos a partir das funções descritas pelas regressões. Relações de causa e efeito entre os valores das propriedades químicas indicadoras de fertilidade dos substratos revegetados (Tabela 1) e os valores de cobertura máxima e de atividade fotossintética foram testadas por meio de regressões, usando-se o programa Origin 9 Pro®.

Os valores das propriedades químicas indicadoras de fertilidade dos substratos revegetados (Tabela 1) foram normalizados (Equação 1), padronizados (Equação 2) e submetidos à análise multivariada (Análise de Componentes Principais) no programa Origin 9 Pro® (LEGENDRE; LEGENDRE, 1998):

$$Y_i' = \log(Y_i + 1) \quad (1)$$

$$Z_i = (Y_i' - \bar{Y}')/s_{y'} \quad (2)$$

Em que:

Z_i é o valor padronizado dos resultados das propriedades químicas analisadas (adimensional);

\bar{Y}' é a média normalizada de cada propriedade analisada; e $s_{y'}$ é o desvio padrão das médias normalizadas.

RESULTADOS

Após 44 anos de abandono, a vegetação naturalmente estabelecida na jazida deixada à sucessão no Parque Nacional de Brasília (T_1) cobria 35% da superfície exposta pela mineração. O desenvolvimento da cobertura vegetal nessa jazida seguiu o modelo linear no período avaliado, com um incremento de 0,8% de cobertura a cada ano (Tabela 1, Figura 2A). Os tratamentos dispensados às jazidas (T_2 , T_3 , T_4 e T_5) incrementaram significativamente o estabelecimento de plantas nesses locais, e o desenvolvimento temporal da cobertura vegetal evoluiu do modelo linear de regeneração para modelos exponenciais (Figura 2A).

A velocidade de desenvolvimento da cobertura vegetal e o percentual máximo de superfície coberta variaram conforme o tratamento utilizado na revegetação das áreas. A reposição de *topsoil* sobre os substratos minerados + plantio de árvores (T_4) proporcionou a maior cobertura vegetal entre os tratamentos avaliados, atingindo mais de 80% em 3,8 anos e 95% em 7 anos. A incorporação de lodo de esgoto aos substratos minerados (T_5) proporcionou a maior velocidade de recobrimento vegetal, estabilizando em 80–90% de cobertura no prazo de 2 a 4 anos. Similarmente, o plantio de um estrato herbáceo conjugado a árvores (T_3) proporcionou um rápido recobrimento do substrato minerado nos dois primeiros anos de desenvolvimento. Porém, esse recobrimento se estabilizou em 80% após uma década de desenvolvimento da vegetação. O plantio exclusivo de árvores (T_2) a uma densidade inicial de 625 árvores por hectare proporcionou entre os tratamentos

avaliados o menor percentual de cobertura ao substrato exposto — 65% de cobertura vegetal após 10 anos.

Similarmente à resposta de cobertura vegetal, o aumento temporal da atividade fotossintética na área deixada à sucessão (T_1) seguiu o modelo linear e atingiu o valor de 0,1 para o EVI após 44 anos de desenvolvimento da vegetação. Os diferentes tratamentos utilizados na revegetação das jazidas (T_2 – T_5) incrementaram entre três e cinco vezes a atividade fotossintética em relação a T_1 , atingindo seus respectivos valores máximos de EVI entre um e seis anos de desenvolvimento da vegetação (Tabela 1, Figura 2B).

Os tratamentos dispensados aos substratos expostos pela mineração resultaram em diferentes níveis de fertilidade química nesses materiais (Tabela 2). Os menores valores das propriedades químicas analisadas foram medidos na área deixada à sucessão (T_1) e os maiores valores foram medidos nas áreas que receberam lodo de esgoto em seus substratos (Tabela 2). A Análise de Componentes Principais associou os substratos que receberam lodos de esgoto (T_5) às concentrações medidas de MO, N, P e S (Figura 3). Da mesma forma, as áreas que receberam a camada superficial do solo (*topsoil* – T_4) associaram-se aos valores da CTC e da acidez potencial ($H^+ + Al^{+3}$) originalmente presentes nos solos das respectivas áreas (Figura 3). Os tratamentos T_3 (árvores + ervas) e T_2 (árvores) se posicionaram no mesmo quadrante da saturação de bases (V), e a área deixada à sucessão (T_1) isolou-se com os valores de pH

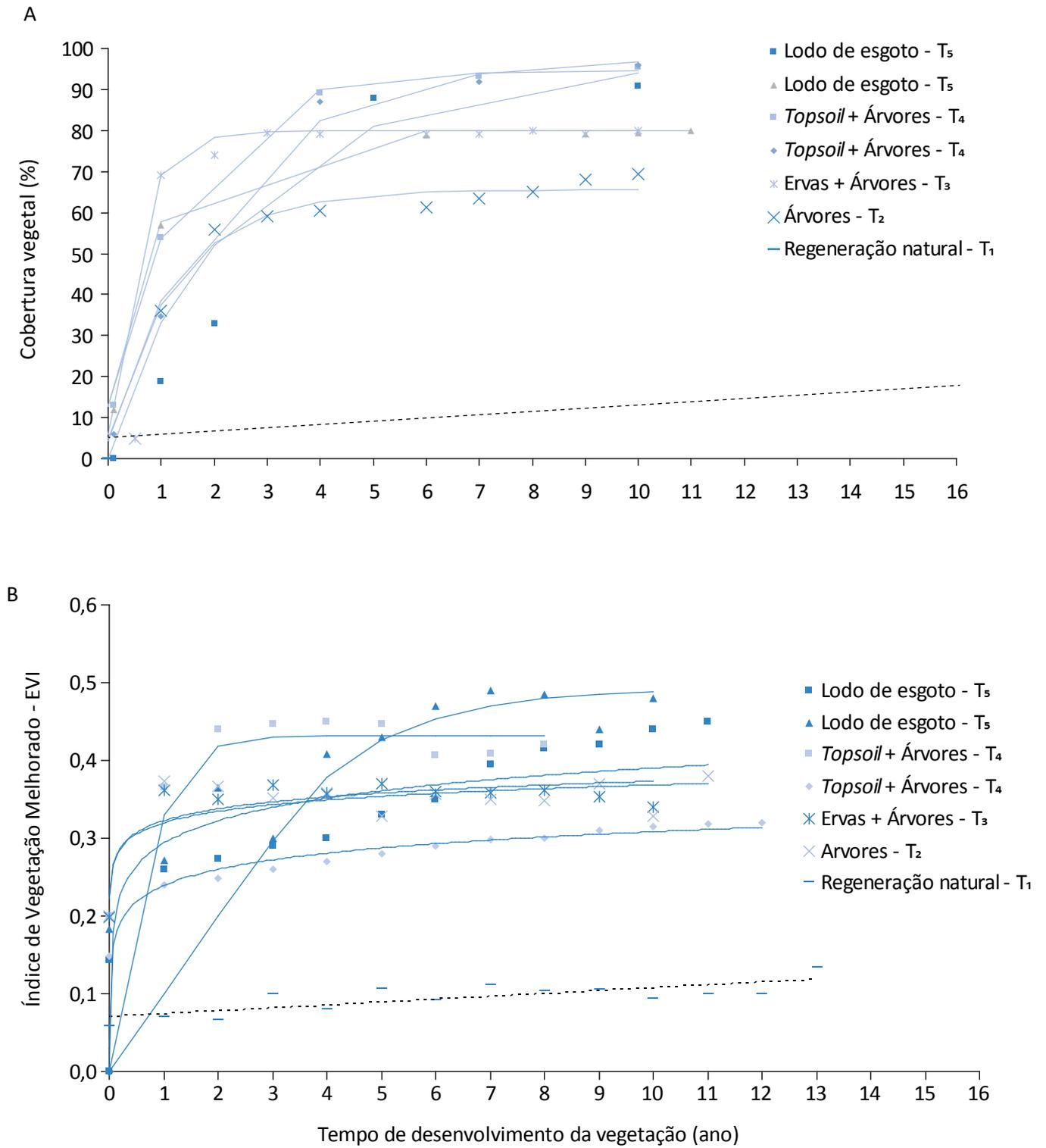


Figura 2 – Desenvolvimento da cobertura vegetal (A) e da atividade fotossintética (B) nas jazidas estudadas em função do tratamento e do tempo.

medidos nos substratos (Tabela 2; Figura 3). Tentativas de associação causal entre os valores das propriedades edáficas, cobertura vegetal e atividade fotossintética lograram êxito em estabelecer que a máxima cobertura vegetal nas áreas foi função de cinco entre as onze propriedades edáficas analisadas (Max. Cobert. = 32,7

+ 1,3 MO + 5,6 CTC - 0,03 P - 8,2 Mg - 25,4 K; $R^2 = 0,98$ e $p < 0,05$). Da mesma forma, a máxima atividade fotossintética medida nas áreas relacionou-se com a CTC dos substratos revegetados (Max. Fotos. = 0,23 + 0,014 X; $R^2 = 0,70$ e $p < 0,05$).

DISCUSSÃO

A sucessão ecológica em ecossistemas terrestres demanda paisagens estáveis (DAJOZ, 2005), e o desenvol-

vimento de uma cobertura vegetal é uma das medidas mais efetivas para a estabilização de superfícies mine-

Tabela 2 – Propriedades químicas analisadas nos substratos das jazidas revegetadas.

Tratamento	Regeneração natural – T ₁	Revegetação com árvores – T ₂	Revegetação com árvores e ervas – T ₃	Revegetação com árvores e camada superficial do solo (topsoil) – T ₄	Revegetação com árvores e camada superficial do solo (topsoil) – T ₄	Revegetação com lodo de esgoto – T ₅	Revegetação com lodo de esgoto – T ₅
Propriedade							
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	0,8 ± <0,1	20,3 ± 0,6	44,7 ± 0,8	11,8 ± 0,1	20,8 ± 0,3	57,1 ± 0,3	79,7 ± 0,5
pH (H ₂ O)	5,4 ± 0,2	6,8 ± 0,1	6,3 ± 0,3	5,6 ± 0,2	5,3 ± 0,2	5,1 ± 0,1	5,1 ± 0,3
pH (CaCl ₂)	4,9 ± 0,1	6,2 ± 0,3	5,7 ± 0,2	5,2 ± 0,3	4,9 ± <0,1	5,0 ± 0,1	4,9 ± <0,1
N-total (g kg ⁻¹)	0,1 ± <0,1	1,4 ± 0,2	2,9 ± 0,2	0,9 ± <0,1	1,3 ± 0,1	3,5 ± 0,2	4,6 ± 0,3
P-disponível (mg kg ⁻¹)	0,1 ± <0,1	2,2 ± 0,1	3,7 ± 0,3	1,4 ± 0,2	1,6 ± 0,1	1.380,3 ± 10,3	1.055,0 ± 7,1
CTC (cmolc kg ⁻¹)	2,3 ± 0,4	3,1 ± 0,2	5,9 ± 0,2	12,0 ± 0,5	7,8 ± 0,3	23,8 ± 4,3	18,5 ± 1,5
V (%)	30,4 ± 4,3	77,7 ± 6,1	62,7 ± 2,3	9,0 ± 0,3	8,0 ± 1,3	57,3 ± 3,2	47,7 ± 3,8
K-trocável (cmolc kg ⁻¹)	0,1 ± <0,1	0,2 ± <0,1	1,3 ± <0,1	0,6 ± 0,2	0,3 ± <0,1	2,8 ± 0,3	2,5 ± 0,1
Ca + Mg (cmolc kg ⁻¹)	0,6 ± <0,1	2,2 ± 0,2	2,4 ± 0,2	0,5 ± <0,1	0,3 ± <0,1	10,8 ± 1,1	6,3 ± 0,3
S (cmolc kg ⁻¹)	0,7 ± 0,1	2,4 ± 0,2	3,7 ± 0,2	1,1 ± 0,1	0,6 ± 0,2	13,6 ± 2,1	8,8 ± 2,3
H + Al (cmolc kg ⁻¹)	1,6 ± 0,1	0,7 ± <0,3	2,2 ± 0,1	10,9 ± 0,9	7,2 ± 1,2	10,2 ± 1,8	9,7 ± 0,9

Média ± desvio padrão; N-total: nitrogênio-total; P-disponível: fósforo disponível; CTC: capacidade de troca catiônica; V: saturação de bases; K-trocável: potássio trocável; S: soma de bases.

radas (BAPTISTA, 2003). O controle da erosão é um dos processos facilitadores da sucessão (REIS *et al.*, 2010). Nesse sentido, considera-se que 80% de cobertura vegetal sejam suficientes para controlar a erosão pluvial e estabilizar paisagens em áreas em processo de restauração (BRANCALION *et al.*, 2012). A jazida deixada à regeneração natural (T_1) demandaria quase um século para que sua superfície apresentasse 80% de cobertura vegetal (Tabela 1; Figura 2A). O plantio de árvores sobre o substrato exposto (T_2) abreviou para 15 anos esse tempo, e o plantio de ervas conjugadas a árvores (T_3) em uma mesma jazida foi capaz de reduzir de 15 para 6 anos o tempo para se atingir 80% de cobertura vegetal sobre a superfície minerada. A reposição de *topsoil* + plantio de árvores (T_4) reduziu para 2,5 a 4 anos o

tempo necessário para se atingir essa porcentagem de cobertura sobre as superfícies expostas (Tabela 1; Figura 2A), e as jazidas que receberam lodo de esgoto (T_5) demandaram de 4 a 5 anos para obterem o mesmo percentual de cobertura vegetal (Tabela 1; Figura 2A).

O desenvolvimento de uma cobertura vegetal é resultado do estabelecimento e crescimento de plantas que conseguem colonizar determinado local. O longo prazo demandado para que os processos naturais recuperem a cobertura vegetal da jazida no Parque Nacional de Brasília – T_1 (Tabela 1; Figura 2A), onde diásporos são abundantes, retrata as condições adversas do substrato exposto pela mineração. Poucas espécies nativas do Cerrado conseguem estabelecer-se espontaneamente

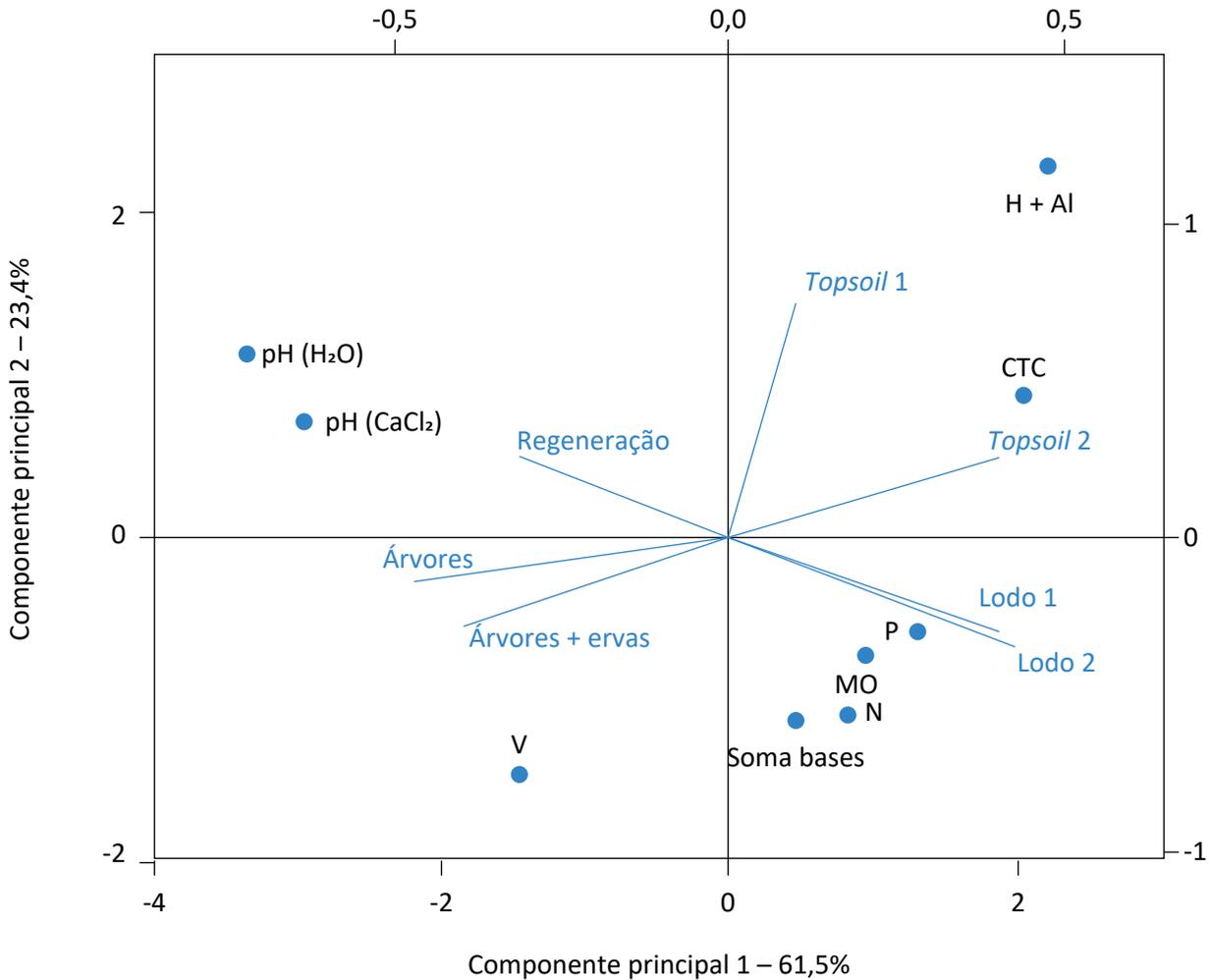


Figura 3 – Análise de Componentes Principais das propriedades químicas analisadas nos substratos das jazidas revegetadas.

te sobre substratos minerados (CORRÊA *et al.*, 2007), e incrementos de biomassa e riqueza de espécies são necessários para o desenvolvimento de ecossistemas (STARR *et al.*, 2013).

A significativa aceleração no desenvolvimento de coberturas vegetais em jazidas após o plantio de espécies arbóreas – T_2 (Tabela 1; Figura 2A) não é consequência exclusiva do crescimento desses espécimes (STARR *et al.*, 2013). Árvores exercem papel relevante no recrutamento de plantas e na sucessão ecológica, porque amenizam o microclima local, atraem dispersores de sementes, oferecem complexidade estrutural ao ambiente e acabam por incrementar a cobertura e a estrutura da vegetação (KUMAR *et al.*, 2010). Além disso, a escavação e a adubação de covas que abrigam mudas arbóreas em jazidas mineradas criam substratos aptos à germinação e à colonização de ervas e arbustos que espontaneamente se estabelecem nessas mesmas covas e recobrem parte do substrato exposto (SILVA; CORRÊA, 2008). Ervas crescem mais rápido do que árvores, melhoram as condições edáficas de substratos (CORRÊA; BENTO, 2010) e podem facilitar o estabelecimento de outras plantas em um local revegetado (KUMAR *et al.*, 2010; SILVA; CORRÊA, 2010; STARR *et al.*, 2013). O estabelecimento de coberturas herbáceas sobre superfícies mineradas tem sido defendido como protocolo de restauração no Cerrado brasileiro, porque inúmeras espécies de ervas nativas são bem adaptadas às condições adversas de substratos expostos pela mineração (MARTINS *et al.*, 2001).

As jazidas mineradas que receberam a camada superficial de solo original (*topsoil*) apresentaram o mais elevado percentual de cobertura vegetal entre os tratamentos avaliados – 95% (Tabela 1; Figura 2A). Horizontes superficiais de solo (*topsoils*) apresentam os elementos necessários ao estabelecimento espontâneo de plantas, tais como MO, nutrientes, banco de sementes e microrganismos (SILVA; CORRÊA, 2010). O banco de sementes que persiste em *topsoils* permite a rápida recolonização de ambientes degradados, principalmente com espécies herbáceas (ÁVILA *et al.*, 2013), que são fundamentais no processo de sucessão ecológica (ARAÚJO *et al.*, 2004).

A incorporação de elevadas doses de lodo de esgoto (250 Mg ha⁻¹, 88% de umidade) a substratos minerados tem criado ambientes edáficos rapidamente colonizados por plantas (SILVA *et al.*, 2013) como resultado das

elevadas concentrações de MO e nutrientes presentes nesse resíduo (PAULA *et al.*, 2011). O aumento da fertilidade de substratos tratados com lodo de esgoto (Tabela 2) é suficiente para que densas camadas de plantas se estabeleçam em jazidas mineradas (CORRÊA *et al.*, 2008). Coberturas vegetais, cujo desenvolvimento depende do saldo de matéria seca acumulada pela fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2013), são essenciais no processo de restauração de ecossistemas. A biomassa vegetal, entre outras funções, supre outros níveis tróficos da cadeia alimentar com abrigo, matéria e energia (DUTTA; AGRAWAL, 2002; BECERRA *et al.*, 2009).

O Cerrado apresenta a maior riqueza de espécies vegetais entre as savanas existentes no mundo, que ocorrem em três continentes e respondem por 30% da produção primária global (IPCC, 1990). O resgate do nível original de atividade fotossintética em áreas degradadas deve ser entendido como parâmetro de restauração, pois a fotossíntese é uma das bases de formação e manutenção da estrutura e das funções ecossistêmicas (DAJOZ, 2005; STAPE *et al.*, 2008). Valores de EVI de até 0,5 têm sido medidos em formações savânicas de Cerrado, e de até 0,7 em formações florestais no mesmo bioma (LIESENBERG *et al.*, 2007; COUTO JR. *et al.*, 2011). As jazidas estudadas neste trabalho apresentavam originalmente coberturas savânicas, e apenas uma das áreas estudadas, onde foi usado lodo de esgoto (T_5), atingiu o valor máximo de EVI (0,5) medido em áreas de Cerrado nativo (Figura 2B). As demais jazidas revegetadas por meio dos tratamentos T_2 – T_5 atingiram valores máximos de EVI entre 0,3 e 0,4.

Clima e estado nutricional do ambiente edáfico são fatores determinantes do nível de atividade fotossintética de plantas (DAJOZ, 2005; STAPE *et al.*, 2008). Substratos minerados apresentam baixa fertilidade química (Tabela 2) e outros impedimentos ao pleno desenvolvimento vegetal, tais como limitada profundidade efetiva e reduzida capacidade de armazenamento de água (SILVA; CORRÊA, 2010). A recuperação da cobertura vegetal e da capacidade fotossintética nas jazidas revegetadas dependeu de 5 entre as 11 propriedades químicas analisadas (Max. Cobert.= 32,7 + 1,3 MO + 5,6 CTC - 0,03 P - 8,2 Mg - 25,4 K; R² = 0,98 e p < 0,05). Dessa forma, a restauração da cobertura vegetal e da capacidade fotossintética em áreas mineradas demanda a construção de um ambiente edáfico fértil.

A relação linear entre a CTC dos substratos revegetados e as taxas fotossintéticas máximas nas respectivas jazidas (Max. Fotos. = $0,23 + 0,014 X$; $R^2 = 0,70$ e $p < 0,05$) indica que aumentos de CTC nos substratos poderiam restaurar as taxas fotossintéticas originais dessas áreas. O maior valor de CTC medido ($23,8 \pm 4,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) (Tabela 2) refere-se justamente à única jazida que atingiu o valor máximo de EVI (0,5) medido em áreas

nativas de Cerrado. Apesar dos níveis inferiores de EVI nas jazidas revegetadas em relação a áreas nativas, as respostas logarítmicas de EVI em relação ao tempo decorrido desde a revegetação (Figura 2B) sugerem que ainda haverá incrementos de atividade fotossintética nas áreas estudadas em relação aos níveis medidos neste trabalho.

CONCLUSÕES

O tempo de desenvolvimento da vegetação, o percentual de cobertura vegetal e a atividade fotossintética variaram conforme o tratamento dado aos substratos minerados. A fertilidade química dos substratos influenciou o desenvolvimento da cobertura vegetal e da taxa fotossintética medidas. Os cinco tratamentos utilizados na revegetação das jazidas não foram capazes de resgatar o nível máximo de atividade fotossintética medido em formações savânicas de Cerrado.

Entre os tratamentos avaliados, a reposição da camada superficial do solo (*topsoil*) + plantio de árvores foi a técnica que conciliou o menor tempo de desenvolvimento da cobertura vegetal e o maior percentual de superfície coberta por vegetação. O uso dessa técnica e a aplicação de lodo de esgoto a substratos minerados promoveram o estabelecimento de coberturas vegetais entre 10 e 20% superiores ao plantio de ervas e árvores em jazidas mineradas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro

(Edital Universal nº 14/2014) e aos revisores, cujos comentários e correções melhoraram a qualidade deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, p. 617-625, 2007.
- ARAÚJO, M. M.; LONGHI, S. J.; BARROS, P. L. C.; BRENA, D. A. Caracterização da chuva de sementes, banco de sementes do solo e banco de plântulas em Floresta Estacional Decidual ripária, Cachoeira do Sul, RS, Brasil. *Scientia Florestalis*, Piracicaba, n. 66, p. 128-141, 2004.
- ÁVILA, A. L.; ARAÚJO, M. M.; GASPARIN, E.; LONGHI, S. J. Mecanismos de regeneração natural em remanescentes de Floresta Ombrófila Mista, RS, Brasil. *Cerne*, Lavras, v. 19, n. 4, p. 621-628, 2013.
- BAPTISTA, G. M. M. *Diagnóstico ambiental da erosão laminar: modelo geotecnológico e aplicação*. Brasília: Universa, 2003. 140p.
- BECERRA, J. A. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ALVALÁ, R. C. S. Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região de Cerrado da Amazônia Legal, usando índices espectrais de vegetação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 125-134, 2009.
- BOLLAND, M. D. A. Comparative phosphorus requirements of five annual medics. *Journal of Plant Nutrition*, Oxford, v. 20, n. 9, p. 1029-1043, 1997.

- BRANCALION, P. H. S.; VIANI, R. A. G.; RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração. In: MARTINS, S. V. (Ed.). *Restauração ecológica de ecossistemas degradados*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2012. p. 262-293.
- CORRÊA, R. S.; BAPTISTA, G. M. M.; BALDUÍNO, A. P. C.; SILVA, L. C. R. Eficiência agronômica de dois resíduos orgânicos na revegetação do horizonte C de um Latossolo Vermelho. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 39, n. 4, p. 503-510, 2008.
- CORRÊA, R. S.; BENTO, M. A. B. Qualidade do substrato minerado de uma área de empréstimo revegetada no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1435-1443, 2010.
- CORRÊA, R. S.; MELO FILHO, B.; BAPTISTA, G. M. M. Avaliação fitossociológica da sucessão autogênica em áreas mineradas no Distrito Federal. *Cerne*, Lavras, v. 13, n. 4, p. 406-415, 2007.
- CORRÊA, R. S.; MÉLO FILHO, B.; PINHEIRO, C. Q.; SANTOS, P. F. Floristic woody composition of revegetated mining sites in the Brazilian Federal District. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 31, n. 3, p. 908-922, 2015.
- COUTO JR., A. F.; CARVALHO JR., O. A.; MARTINS, E. S.; SANTANA, O. A.; SOUZA, V. V.; ENCINAS, J. I. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 699-705, 2011.
- DAJOZ, R. *Ecologia geral*. Porto Alegre: Artmed, 2005. 519p.
- DUFFY, J. E.; GODWIN, C. M.; CARDINALE, B. J. Biodiversity effects in the wild are common and as strong as key drivers of productivity. *Nature*, Londres, v. 549, p. 261-264, 2017.
- DUTTA, R. K.; AGRAWAL, M. Effect of tree plantations on the soil characteristics and microbial activity of coal mine spoil land. *Tropical Ecology*, Varanasi, v. 43, n. 2, p. 315-324, 2002.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1997. 212p.
- GOULDEN, M. L.; MCMILLAN, A. M. S.; WINSTON, G. C.; ROCHA, A. V.; MANIES, K. L.; HARDEN, J. W.; BOND-LAMBERTY, B. P. Patterns of NPP, GPP, respiration, and NEP during boreal forest succession. *Global Change Biology*, New Jersey, v. 17, n. 2, p. 855-871, 2011.
- HUETE, A. R.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y. E.; RATANA, P.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L. R.; YANG, W.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, Washington, v. 33, n. 6, p. 1-4, 2006.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Instrução Normativa IBAMA nº 4, de 13/4/2011. *Diário Oficial da União*, 2011. Disponível em: <<http://www.ctpconsultoria.com.br/pdf/Instrucao-Normativa-IBAMA-04-de-13-04-2011.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Distrito Federal*. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 13 nov. 2017.
- JAMALI, S.; JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L.; ARDÖ, J.; SEAQUIST, J. Detecting changes in vegetation trends using time series segmentation. *Remote Sensing of Environment*, Amsterdam, v. 156, n. 1, p. 182-195, 2015.
- KUMAR, A.; RAGHUWANSHI, R.; UPADHYAY, R. S. Arbuscular mycorrhizal technology in reclamation and revegetation of coal mine spoils under various revegetation models. *Engineering*, Delaware, v. 2, p. 683-689, 2010.
- LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. *Numerical ecology: developments in environmental modelling*. Amsterdã: Elsevier, 1998. 870p.

- LIESENBERG, V.; PONZONI, F. J.; GALVÃO, L. S. Análise da dinâmica sazonal e separabilidade espectral de algumas fitofisionomias do Cerrado com índices de vegetação dos sensores MODIS/Terra e Aqua. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 295-305, 2007.
- MARTINS, C. R.; LEITE, L. L.; HARIDASSAN, M. Recuperação de uma área degradada pela mineração de cascalho com uso de gramíneas nativas. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 157-166, 2001.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). The IPCC scientific assessment of climate change. In: HOUGHTON, J. T.; JENKINS, G. J.; EPHARUMS, J. J. (Eds.). *Report of working group I*. Reino Unido: Cambridge University Press, 1990. 365p.
- PAULA, R. A.; CORRÊA, R. S.; COTTA, T. P. Lixiviação de nitrato de um substrato minerado tratado com lodo de esgoto doméstico. *Bragantia*, Campinas, v. 70, n. 1, p. 104-112, 2011.
- PINHEIRO, C. Q.; CORRÊA, R. S.; SILVEIRA, I. M.; JESUS, R. S.; JORGE, R. R. A. Análise fitossociológica do estrato arbóreo de uma cascalheira revegetada no Distrito Federal. *Cerne*, Lavras, v. 15, n. 2, p. 205-214, 2009.
- REIS, A.; BECHARA, F. C.; TRES, D. R. Nucleation in tropical ecological restoration. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 67, n. 2, p. 244-250, 2010.
- RODRIGUES, R. R.; LIMA, R. A. F.; GANDOLFI, S.; NAVE, A. G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. *Biological Conservation*, Boston, v. 142, n. 6, p. 1242-1251, 2009.
- ROSCHE, C.; SCHUMACHER, J.; GUBSCH, M.; LIPOWSKY, A.; WEIGELT, A.; BUCHMANN, N.; SCHMID, B.; SCHULZE, E.-D. Using plant functional traits to explain diversity-productivity relationships. *PLoS One*, v. 7, n. 5, p. e36760, 2012.
- SILVA, L. C. R.; CORRÊA, R. S. Evolução da qualidade do substrato de uma área minerada no Cerrado revegetada com *Stylosanthes* spp. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 835-841, 2010.
- SILVA, L. C. R.; CORRÊA, R. S. Sobrevivência e crescimento de seis espécies arbóreas submetidas a quatro tratamentos em área minerada no Cerrado. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 731-740, 2008.
- SILVA, L. C. R.; CORRÊA, R. S.; DOANE, T. A.; PEREIRA, E. I. P.; HORWATH, W. R. Unprecedented carbon accumulation in mined soils: the synergistic effect of resource input and plant species invasion. *Ecological Applications*, Washington, v. 23, n. 6, p. 1345-1356, 2013.
- SILVEIRA, E. M. O.; CARVALHO, L. M. T.; ACERBI-JÚNIOR, F. W.; MELLO, J. M. The assessment of vegetation seasonal dynamics using multitemporal NDVI and EVI images derived from MODIS. *Cerne*, Lavras, v. 14, n. 2, p. 177-184, 2008.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 255, n. 3-4, p. 920-930, 2008.
- STARR, C. R.; CORRÊA, R. S.; FILGUEIRAS, T. S.; HAY, J. D. V.; SANTOS, P. F. Plant colonization in a gravel mine revegetated with *Stylosanthes* spp. in a Neotropical savanna. *Landscape and Ecological Engineering*, Tokyo, v. 9, n. 1, p. 189-201, 2013.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954p.
- TRACEWSKI, L.; BUTCHART, S. H. M.; DONALD, P. F.; EVANS, M.; FISHPOOL, L. D. C.; BUCHANAN, G. M. Patterns of twenty-first century forest loss across a global network of important sites for biodiversity. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, New Jersey, v. 2, n. 1, p. 37-44, 2016.