



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**LODO DE ESGOTO E ADUBOS VERDES NA RECUPERAÇÃO DE ÁREA
DEGRADADA: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO
SOLO**

TALITA OLIVEIRA TARLEI DE FREITAS

Brasília, DF
Dezembro de 2014

TALITA OLIVEIRA TARLEI DE FREITAS

**LODO DE ESGOTO E ADUBOS VERDES NA RECUPERAÇÃO DE ÁREA
DEGRADADA: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO
SOLO**

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília – UnB, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO

Brasília, DF

Dezembro de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

FREITAS, Talita Oliveira Tarlei de.

“LODO DE ESGOTO E ADUBOS VERDES NA RECUPERAÇÃO DE ÁREA DEGRADADA: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO.”.

Orientação: Cícero Célio de Figueiredo, Brasília, 2014. (39) páginas.

Monografia de Graduação (G) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2014.

1. Cerrado 2. Biossólido 3. Resíduo urbano 4. Conservação do solo

I. Figueiredo, C.C.de. II. Dr.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FREITAS, T. O. T. LODO DE ESGOTO E ADUBOS VERDES NA RECUPERAÇÃO DE ÁREA DEGRADADA: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO.

Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2014, (39) páginas. Monografia.

CESSÃO DE DIREITOS

Nome do Autor: TALITA OLIVEIRA TARLEI DE FREITAS

Título da Monografia de Conclusão de Curso: Lodo de esgoto e adubos verdes na recuperação de área degradada: alterações nos atributos químicos e biológicos do solo

Grau: 3º **Ano:** 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

TALITA OLIVEIRA TARLEI DE FREITAS

TALITA OLIVEIRA TARLEI DE FREITAS

**LODO DE ESGOTO E ADUBOS VERDES NA RECUPERAÇÃO DE ÁREA
DEGRADADA: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO
SOLO**

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília – UnB, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO

BANCA EXAMINADORA:

Cícero Célio de Figueiredo
Doutor, Universidade de Brasília – UnB
Orientador / email: cicerocf@unb.br

Jader Galba Busato
Doutor, Universidade de Brasília - UnB
Examinador

Leiliane Saraiva Oliveira
MSc. CAESB
Examinadora

AGRADECIMENTOS

Hoje, ao me sentar pra escrever os agradecimentos, eu travei pela sensação de incerteza que a vida não universitária me traz. Chegou a hora de ir embora da graduação. Frio na barriga, ansiedade, insegurança, receio, empolgação, alívio, liberdade.

Ao fazer uma retrospectiva, sinto que é importante mencionar algumas pessoas que fizeram e fazem parte do meu processo na academia. Não posso deixar de agradecer aos meus pais, Zezé e Fernando, que tanto se esforçaram para garantir uma boa educação para mim e para minhas irmãs, guarnecendo, apoiando e incentivando a minha qualificação acadêmica, mesmo quando eu achava tudo isso um saco. Quase como meus pais, minha dinda Leci e meu dindo Dirlei, que apesar de muitas vezes distantes, sempre vibraram pelo meu bom desempenho. Também quero registrar o meu grande carinho pela amiga e sempre sogra de consideração Marta, com todas as nossas conversas e desabafos, sempre na torcida.

A caminhada universitária não seria a mesma se não fossem os happy hours, os botecos, as viagens, os eventos “Nova Era” e toda a agregação que isso implica. A todas as minhas amigas e amigos eu agradeço de coração por esse amor, por fazerem parte desse lado B da minha vida acadêmica. Quero citar alguns nomes de importância especial: Thais, Hugo, Rosa, Ana Livia, Felipe, Glenda, Ingrid, Vanessa, dentre tantas outras pessoas que fizeram a minha jornada muito mais divertida.

Presenciei a articulação do grupo dos e das estudantes indígenas na UnB, participei de manifestações e acampamentos. Compreendi o valor da luta indígena e, assim, pude ter noção das lutas de classe. A minha passagem pela UnB não seria a mesma sem essa experiência. Além da formalidade do projeto de extensão, também houve boas viagens, botecos, e estudos. Agradeço imensamente aos estudantes indígenas que me acolheram e me permitiram participar de suas articulações: Suliete, Rayanne, Hauni, Poran, Érica, Kaimbé, Gabriela, Valéria, Rilmara, Aislan, e todos os demais participantes.

No curso de agronomia eu conheci pessoas muito legais, que me ajudaram a conseguir a aprovação em diversas disciplinas através de forças-tarefas para passar em provas, fazer seminários, entregar relatórios. Felícia, Nilton, Yan, Camila A., Sara, Constanza, Camila C., Andressa, Andréia, Angelina, Betina, Pollyana, e outras que não enumerei, muita obrigada. Em especial agradeço ao pessoal do Laboratório de Matéria Orgânica do Solo, Harumi, Thiago, Marcelo, Juliana e Helen, e do Laboratório de Química do Solo, Alan e Eduardo, por possibilitar a realização desse trabalho.

Eu tive a satisfação de conhecer e ter a amizade do ótimo professor/coordenador/faz-de-tudo-e-mais-um-pouco Umberto Euzébio. Também agradeço ao professor Cícero Célio por ser

meu orientador, por ter muita paciência comigo, e por ter contribuindo enormemente para o meu desenvolvimento acadêmico. De antemão eu já agradeço a disponibilidade da banca examinadora formada pelo professor Jader, da UnB, e Leiliane, da Caesb, que com certeza vão promover uma maior experiência de crescimento para mim.

É importante mencionar o empenho da Caesb, Exército Brasileiro e Terracap para a concretização desse trabalho. Agradeço, apesar de não conhecer pessoalmente, a tenente Ana Paula por ter insistido e possibilitado negociações e acordos para a realização do Projeto Aplicação de Lodo de Esgoto.

Não posso deixar de mencionar o pessoal da Emater-DF, principalmente a equipe da Geamb. Já são quase 2 anos e meio de convívio, amizade, aprendizado, bronca, empoderamento, flexibilidade, muitas risadas. Agradeço sinceramente ao Marcos, Sumar, Luis, Priscilla, Bruno, Anne, Icléia Fabrício, Ludmila e todos os 7 novos estagiários que, apesar da experiência recente, já me conquistaram.

Todas as pessoas são (e foram) muito importantes no meu processo. Seria muito injusto da minha parte não agradecer pelo companheirismo do Laurent durante os anos de agronomia. Sem querer rotular nem ser brega, eu também agradeço pela renovação e reviravolta super divertida e prazerosa que vem acontecendo com a chegada do Abacate, por todos os momentos em que relaxei e me desliguei do estresse da monografia. Agradecida por demais da conta!

Nos bons e nos maus momentos, mesmo cansada da UnB, sempre ao chegar em casa eu me deparo com os bebezinhos mais lindos do mundo que me alegram instantaneamente. A dengosa da Káli, e os dois bolinhas super fofos Lótus e Brahma. Além desses três, tem uma gatinha que ocupa um lugar mega especial no meu coração, a Mirra. Ela, toda bagunceira, doida, linda, carinhosa, sociável, amada. Infelizmente ela fugiu há quase três meses e nunca mais a vimos. Foi (é) uma fase muito triste, mas quero acreditar e ter fé que ela está bem e feliz, da maneira que for. Acho que eu nem consigo explicar a importância dessas amadas companhias felinas para a minha sanidade mental e comprometimento com as obrigações diárias. Só mesmo a existência divina na causa!

E já entrando no mérito do divino, eu agradeço ao universo, às forças celestiais e à luz divina que nos preenche. Aos meus santos, guias curadores. Muita gratidão a esses seres de luz, sempre firmando no poder de quem pode mais, na força maior.

Gratidão! Saravá! Axé! Namastê!

Tchau Graduação!

“Keep calm and Hakuna Matata”

(Autor Desconhecido)

FREITAS, TALITA OLIVEIRA TARLEI DE. **LODO DE ESGOTO E ADUBOS VERDES NA RECUPERAÇÃO DE ÁREA DEGRADADA: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO**. 2014. Monografia (Bacharelado em Agronomia) Universidade de Brasília – UnB.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações nos atributos químicos e biológicos do solo promovidas pelo uso do lodo de esgoto (LE) associado a adubos verdes na recuperação de uma área degradada localizada no pátio da Rede Ferroviária Federal S.A. – REFFSA, no Distrito Federal. Neste estudo foram avaliadas cinco áreas com diferentes históricos, sendo: 1) área degradada que não recebeu aplicação de lodo de esgoto e nem foi cultivada com adubos verdes; 2) área que recebeu LE com posterior plantio de crotalária (*Crotalaria juncea*); 3) área que recebeu LE com posterior plantio de guandu (*Cajanus cajan*); 4) área que recebeu apenas o LE; 5) área sob vegetação nativa de Cerrado, não degradada, e que não recebeu LE, utilizada como ambiente de referência. Nessas áreas foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. Foram determinados os seguintes atributos químicos e biológicos do solo: acidez ativa (pH_{H2O}, 1:2,5), potencial (H+Al³⁺) e trocável (Al³⁺); P disponível (Mehlich 1), K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis; carbono orgânico total (COT); e carbono da biomassa microbiana (Cmic). Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições. Os dados foram submetidos a análise de variância, teste de médias e análise de componentes principais. O uso exclusivo de LE aumentou os teores de COT, carbono da biomassa microbiana e P disponível. Quando associado a adubos verdes, os teores de K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ foram incrementados, potencializando o uso do LE na recuperação de áreas degradadas. Considerando todos os atributos em conjunto, o uso do LE exclusivo ou associado com adubos verdes proporcionou um ambiente no solo diferenciado, com melhoria dos indicadores de qualidade do solo, distanciando-se das condições da área degradada e se aproximando da vegetação de Cerrado.

Palavras-chave: Cerrado, bioestabilizado, resíduo urbano, conservação do solo.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Mapa de localização da área degradada estudada. As áreas indicadas no mapa são descritas na Tabela 2. Fonte: IBGE (2001), CODEPLAN, GOOGLE EARTH (2014)..... 17
- Figura 2: Mapa indicativo dos talhões na área degradada estudada. Fonte: CAESB. Relatório de operações, 2013..... 18
- Figura 3: Esquema ilustrativo e registro fotográfico da demarcação dos pontos de amostragem do solo..... 21
- Figura 4: Coleta do solo com trado holandês (a), A1 (b), Detalhe da erosão do solo na A1 (c), A2 (d), A3 (e), A3 (f), Vestígio de fauna (anta) na A4(g), A4 (h), A5 (i), A5 (j)... 22
- Figura 5: Carbono orgânico total - COT (a) e Carbono da biomassa microbiana - Cmic (b) nas diferentes áreas estudadas. Letras iguais, maiúsculas na profundidade de 0-10 cm e minúsculas de 10-20 cm, indicam que não há diferença estatística entre as áreas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média..... 27
- Figura 6: Potássio (a), Fósforo (b) e Cálcio e Magnésio (c), nas diferentes áreas estudadas. Letras iguais, maiúsculas na profundidade de 0-10 cm e minúscula de 10-20 cm, indicam que não há diferença estatística entre as áreas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média. 29
- Figura 7: pH em água (a), acidez potencial (b) e alumínio trocável (c) nas diferentes áreas estudadas. Letras iguais, maiúsculas na profundidade de 0-10 cm e minúscula de 10-20 cm, indicam que não há diferença estatística entre as áreas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média. 31
- Figura 8: Diagrama de ordenação produzido por análise de componentes principais dos tratamentos estudados (Cer, Deg, L, L+C, L+G) para as análises de pH, $H+Al^{3+}$, Al^{3+} , P, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , COT e Cmic em duas camadas do solo. (a) 0-10 cm; (b) 10-20 cm. 33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização do LE produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) Brasília Norte e Sul.....	19
Tabela 2: Identificação dos tratamentos recebidos nas áreas estudadas.....	20

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Áreas degradadas.....	13
2.2	Lodo de esgoto e seu uso na recuperação de áreas degradadas.....	14
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1.	Descrição das áreas estudadas.....	16
3.2.	Amostragem do solo.....	20
3.3.	Procedimentos analíticos.....	23
3.4.	Delineamento experimental e análises estatísticas.....	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1.	Carbono orgânico e biomassa microbiana do solo.....	26
4.2.	Teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio.....	27
4.3.	Componentes de acidez do solo.....	29
4.4	Análise conjunta dos dados.....	32
5	CONCLUSÕES.....	34
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

O esgoto, também conhecido como efluente ou águas servidas, é formado pelo conjunto de resíduos líquidos domésticos e industriais que necessitam de tratamento adequado para remover as impurezas presentes em sua composição. Durante o processo de tratamento ocorre a formação do lodo de esgoto, que é um composto de sólidos que estavam em suspensão no efluente e foram sedimentados durante o tratamento. Aproximadamente 400 toneladas de lodo de esgoto (LE) são produzidas por dia nas estações de tratamento de esgoto (ETE) do Distrito Federal (CAESB, 2014), e a destinação adequada desse produto configura interesse para toda a sociedade.

Diversas alternativas de destinação final de LE têm sido apresentadas, como depósito em aterros sanitários, incineração, aplicações industriais como a fabricação de tijolos, cerâmicas ou outros materiais de construção, uso agrícola e recuperação de áreas degradadas (Bettiol et al., 2006; Januário et al., 2007; Takada et al., 2013). As duas últimas opções constituem soluções viáveis em termos econômicos, sociais e ambientais.

No entanto, a legislação brasileira impõe uma série de limitações ao uso do LE, decorrentes dos constituintes indesejáveis, como patógenos e elementos traço. A Resolução N° 375 de 29 de agosto de 2006 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) define critérios e procedimentos para o uso agrícola de LE gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário. São definidas duas classes de LE em função da concentração de patógenos. O LE Classe A apresenta número mais provável de até 10^3 coliformes termotolerantes por grama de sólidos totais (ST); até 0,25 ovos viáveis de helmintos por grama de ST; ausência de *Salmonella* em 10 g de ST e até 0,25 unidades formadores de foco ou de placa de vírus por grama de ST de LE. Já o LE Classe B apresenta até 10^6 coliformes termotolerantes por grama de ST e até 10 ovos viáveis de helmintos por grama de ST. A resolução, entretanto, não menciona a utilização de LE na recuperação de áreas degradadas.

A Resolução N° 3 de 18 de julho de 2006 do Conselho do Meio Ambiente do Distrito Federal (CONAM) disciplina o uso de LE no Distrito Federal. As áreas passíveis de receberem LE são definidas no Capítulo VI, sendo vedada a aplicação em situações como Áreas de Preservação Permanente (APP), Áreas de Proteção de Mananciais (APM), distância mínima de 15 metros de vias de domínio público, áreas que o lençol freático atinja 2 metros da superfície em seu nível elevado. É permitido o uso de LE Classes A, B e C (que não atende as especificações das Classes A e B) para reflorestamento e revegetação de áreas mineradas

com espécies arbóreas, exóticas e nativas. Assim, observadas as restrições de aplicação do Capítulo VI, o LE pode ser utilizado na recuperação de áreas degradadas do Distrito Federal, independente de sua Classe.

A Política Distrital de Resíduos Sólidos (Lei 3.232/2003) incluiu os lodos provenientes de tratamentos de sistemas de água entre os resíduos sólidos, e estabelece que a geração de resíduos sólidos, no território do Distrito Federal, deverá ser minimizada através da adoção de processos de baixa geração de resíduos e da reutilização e/ou reciclagem de resíduos sólidos, dando-se prioridade à reutilização e/ou reciclagem a despeito de outras formas de tratamento e disposição final, exceto nos casos em que não exista tecnologia viável. Logo, a utilização de LE para a recuperação de áreas degradadas constitui interesse da sociedade garantido juridicamente.

Área degradada pode ser conceituada como um ambiente modificado por uma obra de engenharia ou submetido a processos erosivos intensos que alteraram suas características originais além do limite de recuperação natural dos solos, exigindo, assim, a intervenção do homem para sua recuperação (Noffs et al., 2000). O procedimento para recuperação de áreas degradadas é lento e está relacionado à capacidade de restabelecimento do solo. Espécies leguminosas e gramíneas são utilizadas com sucesso no processo de recuperação de áreas degradadas através do aumento dos teores de carbono orgânico e nitrogênio total e da capacidade de troca catiônica (Santos et al., 2001), mas precisam ser avaliadas quando utilizadas em conjunto com o lodo de esgoto. Neste sentido, as alterações químicas e biológicas do solo são indicadoras das mudanças que ocorrem durante a recuperação de áreas degradadas (Sampaio et al., 2012).

O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações nos atributos químicos e biológicos do solo promovidas pelo uso do LE associado a adubos verdes na recuperação de uma área degradada localizada no pátio da Rede Ferroviária Federal S.A. – REFFSA, no Distrito Federal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Áreas degradadas

O conceito de áreas degradadas é amplo e interdisciplinar, e sua definição depende do foco que se dá dentro do processo de degradação. A legislação brasileira apresenta algumas conceituações, como o decreto nº 97.632 de 10 de abril de 1989, que considera como degradação os processos resultantes dos danos ao meio ambiente, pelos quais se perdem ou se reduzem algumas de suas propriedades, tais como a qualidade ou a capacidade produtiva dos recursos ambientais. Já a Instrução Normativa nº 4 de 13 de abril de 2011 do Instituto Nacional do Meio Ambiente (IBAMA) define como degradada a área impossibilitada de retornar, por uma trajetória natural, a um ecossistema que se assemelhe a um estado conhecido antes, ou para outro estado que poderia ser esperado. Ambas definições indicam a necessidade de recuperação da área degradada, na qual se espera que sejam consideradas a utilização futura da terra e a obtenção do equilíbrio do meio ambiente.

A deterioração da produtividade da terra pode ocorrer de diversas maneiras. A primeira é a perda de matéria orgânica e a degradação física do solo, como quando florestas são desmatadas e a estrutura do solo declina rapidamente. A segunda é a perda de nutrientes e a ocorrência de degradação química do solo. Um terceiro aspecto é a erosão do solo causada pelo manejo inadequado da terra. A questão agravante do processo de degradação é o fato da influência da deterioração estar além da delimitação da área degradada em si, pois a perda da qualidade do solo e de sua cobertura vegetal afetam os ecossistemas vizinhos ao causarem distúrbios hidrológicos, perda da biodiversidade superficial e subterrânea, e redução dos estoques de carbono no solo e sua respectiva associação ao aumento das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera (FAO, 2011).

A degradação do solo e a redução da sua capacidade produtiva são questões de preocupação global. Técnicas de restauração para elevar os níveis de matéria orgânica e a estabilidade do carbono do solo são necessárias para aumentar a produtividade e minimizar os riscos de degradação e poluição do meio ambiente (Mukherjee et al., 2014). Vale ressaltar que a questão das áreas degradadas não se restringe às zonas rurais. No âmbito urbano, áreas degradadas são áreas disfuncionais, abandonadas, vazias ou subutilizadas, mas com grande potencial de reutilização e de reintegração à cidade. A transformação dessas áreas em espaços vegetados poderia proporcionar a redução de problemas e tensões sociais (Sanchez, 2011).

2.2 Lodo de esgoto e seu uso na recuperação de áreas degradadas

A destinação final do LE é uma crescente preocupação mundial, com reflexos na disponibilidade, na qualidade da água para consumo humano e animal e nas atividades econômicas (Lemainski et al., 2006). O lodo da estação de tratamento de águas servidas, denominadas de esgoto, é um resíduo formado nos decantadores da estação, resultado dos processos de floculação e coagulação (Teixeira et al., 2005). O LE é um produto rico em matéria orgânica e nutrientes, em especial o nitrogênio (N) e o fósforo (P), com potencial para aproveitamento agrícola, quando utilizado isoladamente ou em combinação com adubos verdes e/ou minerais (Lemainski et al., 2006).

A utilização desse resíduo poderia elevar a produtividade de culturas agrícolas por meio da melhoria da fertilidade, com maior ou menor intensidade, dependendo das características do resíduo adicionado. Todavia, a viabilidade do uso do LE pode ser mais expressiva na recuperação de áreas degradadas (Modesto et al., 2009), pois a incorporação desse resíduo ao solo possibilita a reabilitação das funções edáficas, que permitem o estabelecimento de uma cobertura vegetal sobre o solo degradado (Corrêa et al., 2010).

A incorporação do LE promove melhora na fertilidade do solo. Os efeitos desse resíduo incluem o aumento do teor de carbono orgânico, Ca, Mg, K, P, S, CTC, além da redução do pH do solo (Silva et al., 2001; Bezerra et al., 2006; Modesto et al., 2009; Lobo et al., 2013). Outros estudos apontam a elevação dos teores de Ca, redução dos teores de Al (Mosquera-Losada et al., 2012) e aumento do carbono da biomassa microbiana (Fernandes et al., 2004; Modesto et al., 2009).

A destinação do lodo de esgoto e outros resíduos orgânicos no solo apresenta-se como uma alternativa ao setor público, pois poderá fornecer nutrientes para o estabelecimento e manutenção de espécies vegetais que compõem os sistemas de áreas verdes das cidades (RICCI et al., 2010). Além disso, o uso do LE como condicionador do solo é considerado hoje como a alternativa mais promissora de destinação final desse resíduo, principalmente na recuperação de áreas degradadas (Campos et al., 2008).

A adição de matéria orgânica em forma de adubos, cobertura verdes e/ou LE, para a recuperação de áreas degradadas, modifica positivamente as propriedades físicas e químicas, principalmente do horizonte superficial do solo (Kitamura et al., 2008). As plantas leguminosas, enquanto adubos verdes, contribuem para diminuir a acidez e promover a reciclagem e incorporação de quantidades significativas de nutrientes ao solo, em especial as

de nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio e fósforo (Silva et al., 2002; Nascimento et al., 2003).

O desenvolvimento de grande volume de resíduos da adubação verde protege a superfície do solo. Ao mesmo tempo, o volume de raízes produzidas e mortas permite a formação de uma rede de canais no solo que facilita o seu arejamento, criando condições de oxidação e ausência de compactação, bem como a elevação ou a manutenção do pH em níveis mais elevados que o da área degradada (Moreira et al., 2005).

Solos arejados apresentam maior fluxo de O_2 e baixa acumulação de CO_2 produzido pelo sistema radicular. Em solo compactado, o CO_2 reage com a água formando os carbonatos e os bicarbonatos ácidos. A importância de uma vigorosa colonização do solo pelo sistema radicular dos adubos verdes reside na reestruturação da camada arável, tornando o solo mais resistente à ação do impacto das gotas de chuva e menos propenso à erosão (Moreira et al., 2005).

O uso conjunto de LE e adubos verdes para a recuperação de áreas degradadas precisa ser melhor compreendido, principalmente no que se refere às alterações químicas e biológicas do solo. Portanto, a hipótese desse trabalho é que o uso do LE exclusivo ou associado com adubos verdes pode promover a recuperação da área degradada enquanto condicionador do solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição das áreas estudadas

A área degradada objeto desse estudo está localizada ao Norte da DF-087 (“Via Estrutural”) e a Oeste da DF-003 (“EPIA”), entre o Setor de Oficinas Norte e a Cidade do Automóvel (Figura 1). Esta área encontra-se próxima à antiga estação Rodoferroviária de Brasília e pertence à União Federal, estando atualmente sob a responsabilidade administrativa do Comando do Exército da 11ª Região Militar. O Projeto Aplicação de Lodo de Esgoto, para recuperar essa área degradada, foi submetido ao processo de licenciamento no IBRAM (Processo nº 190.001.175/2003), sob Autorização Ambiental N.º 055/2012 – IBRAM, concedida em setembro de 2012, com validade de 4 (quatro) anos. A execução das atividades de recuperação é realizada em parceria firmada entre as entidades governamentais CAESB, EXÉRCITO BRASILEIRO e TERRACAP, com interveniência do IBRAM, em Termo de Cooperação Técnica nº 12-046-00, conforme publicado no DODF nº 139, em 19 de julho de 2012 (CAESB, 2013).

As ações do Projeto Aplicação de Lodo de Esgoto, realizadas entre 24/10/2012 e 04/04/2013, contemplam a aplicação de LE das estações de tratamento pertencentes à CAESB em parte da área total degradada (Talhões 8, 11, 12, 13 e 16, conforme Figura 2), perfazendo um total de 45,2 hectares que correspondem a cerca de 29,3% da área total do projeto (CAESB, 2013).

Historicamente essa área foi objeto de extração de solo para uso em diferentes obras civis no Distrito Federal. Possui atualmente uma superfície degradada de aproximadamente 185 hectares, onde o solo se apresenta com ausência de cobertura vegetal, além de ter sido objeto de disposição irregular de entulho de construção civil, restos de podas e outros resíduos domésticos (CAESB, 2013).

Nas áreas adjacentes há ocorrência de vegetação nativa do bioma Cerrado, do tipo Cerrado sentido restrito, Cerrado Denso e Cerradão, com árvores distribuídas aleatoriamente sobre o terreno em diferentes densidades, com ocorrência das espécies arbóreas de *Kielmeyera coriácea*, *Casearia sylvestris*, *Erythroxylum tortuosum*, *Machaerium opacum*, *Dalbergia miscolobium*, *Aegiphila lhotzkiana*, *Tabebuia ochraceae*, *Caryocar brasiliensis*, *Blepharocalix salicifolius*, entre outras (CAESB, 2013).

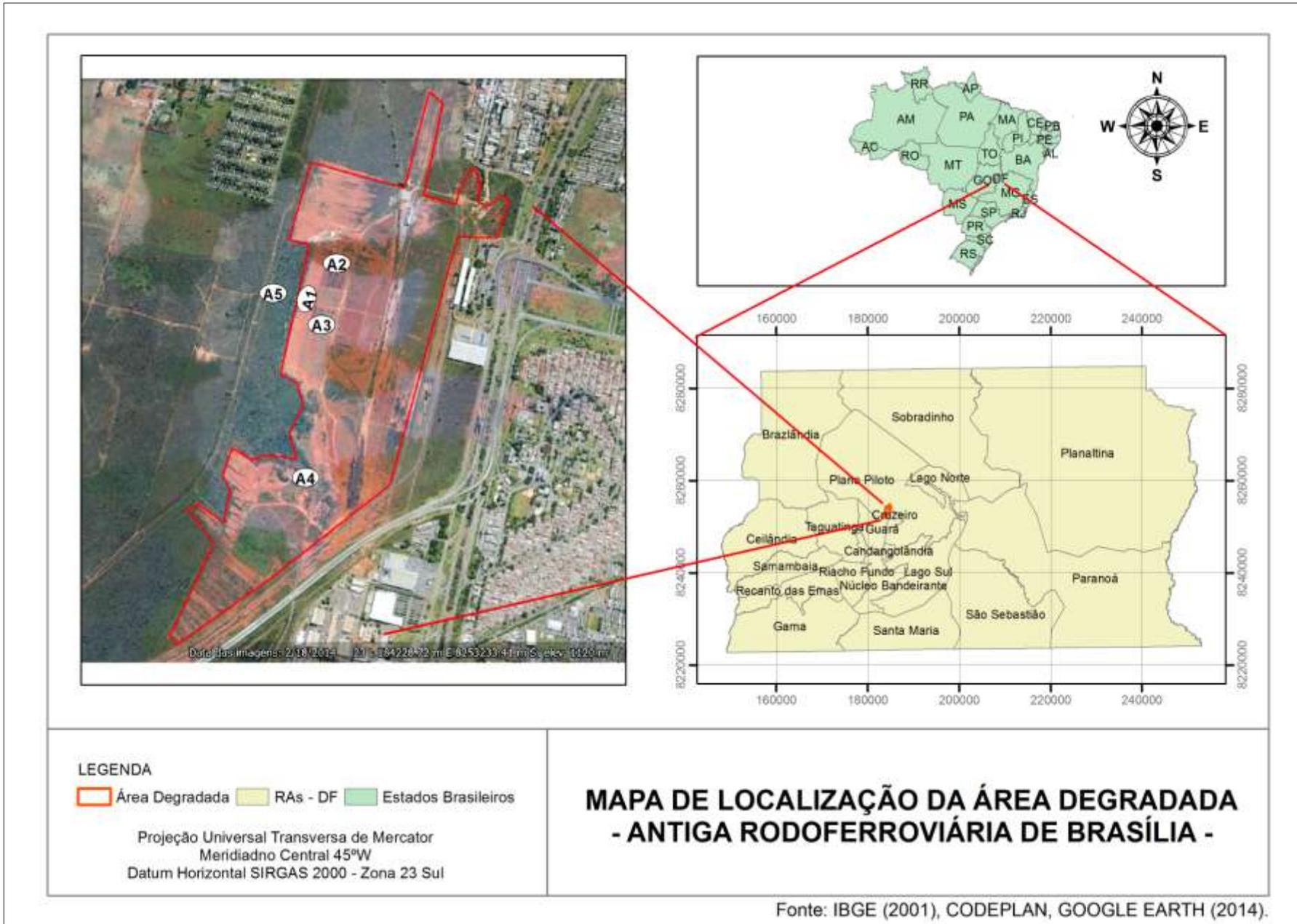


Figura 1: Mapa de localização da área degradada estudada. As áreas indicadas no mapa são descritas na Tabela 2. Fonte: IBGE (2001), CODEPLAN, GOOGLE EARTH (2014).

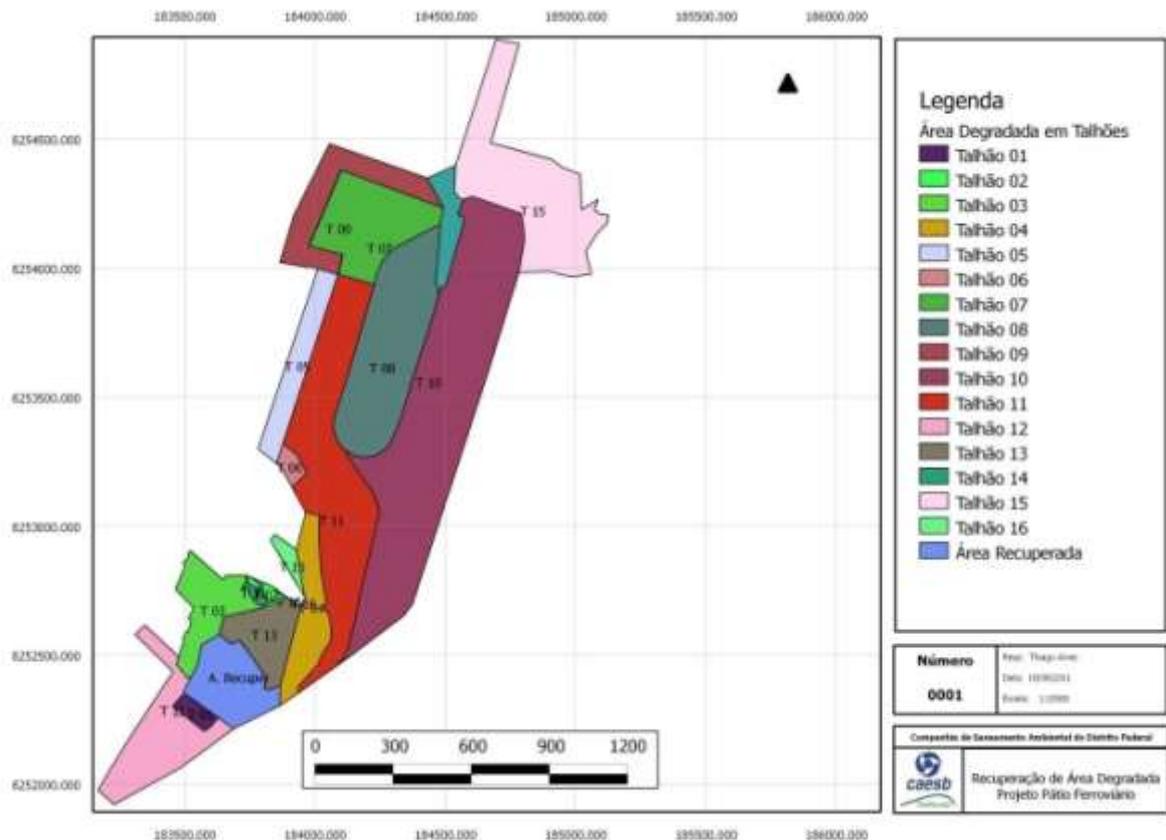


Figura 2: Mapa indicativo dos talhões na área degradada estudada. Fonte: CAESB. Relatório de operações, 2013.

Também há ocorrência de grande número de espécies exóticas e invasoras, como por exemplo, *Brachiaria decumbens*, *Melinis minutiflora*, *Andropogon sp*, *Ricinus communis*, *Leucaena leucocephala*, entre outras. Essas espécies funcionam como fontes de sementes que são potencialmente capazes de substituir as plantas adultas que desapareceram com a exploração de terra na área, auxiliando nos processos de regeneração das comunidades vegetacionais (CAESB, 2013).

A área degradada recebeu uma taxa média de 629 toneladas/ha de lodo de esgoto até o dia 04 de abril de 2013, equivalente ao acréscimo de 2,3% de matéria orgânica por hectare.

O LE foi descarregado na área e em seguida foi realizado o espalhamento do lodo no solo com o auxílio de uma retroescavadeira. O espalhamento do lodo na área teve como objetivo cobrir toda a superfície do solo de forma que a incorporação fosse a mais homogênea possível. A incorporação do lodo no solo, fase subsequente ao espalhamento, foi realizada com o auxílio de uma grade aradora e um arado, de quatro discos, acoplados em trator 4x4. Após a incorporação do lodo foi realizada a caleação, disposição da cal hidratada no solo, com objetivo de inibir a ocorrência de vetores na área e minimizar o odor. A aplicação da cal foi realizada por meio de uma espalhadeira, acoplada no trator 4x4. Após o processo de

incorporação do lodo, decorridos aproximadamente 10 dias, a área foi arada novamente, com o objetivo de uniformizar a aplicação do lodo no solo. Antes do plantio foi realizado o nivelamento do terreno com o uso de uma grade niveladora. Logo após foi realizado a distribuição das sementes. As sementes que foram plantadas pertencem à família das leguminosas, dos gêneros *Crotalaria*, *Cajanus* e *Stylosanthes*, cujo objetivo é o recobrimento do solo, bem como inibição do crescimento de espécies exóticas invasoras, como por exemplo brachiária, capim meloso, entre outras espécies (CAESB, 2013). A caracterização do LE, produzido nas ETE Brasília Norte e ETE Brasília Sul, utilizado nesse estudo, é apresentada a Tabela 1.

Dentre os talhões, três foram selecionados para compor as áreas de estudo do presente trabalho: 1) área degradada que não recebeu aplicação de LE e nem foi cultivada com adubos verdes; 2) área que recebeu LE com posterior plantio de crotalária (*Crotalaria juncea*); 3) área que recebeu LE com posterior plantio de guandu (*Cajanus cajan*); 4) área que recebeu apenas o LE; 5) área sob vegetação nativa de Cerrado, não degradada, e que não recebeu LE, utilizada como ambiente de referência (Tabela 2).

Tabela 1: Caracterização do LE produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) Brasília Norte e Sul.

PARÂMETROS	UNIDADES	ETE NORTE	ETE SUL
pH (H ₂ O)	na	6,61	7,50
pH (KCl)	na	5,98	6,33
Umidade	%	85,33	85,44
Sólidos Totais	mg/kg	14,94	16,48
Sólidos Voláteis	mg/kg	50,57	55,92
Cinzas ²	%	32,36	35,33
Carbono Orgânico Total	%	29,34	27,91
Nitrogênio Kjeldhal Total	%	5,43	6,09
Nitrogênio amoniacal	%	0,60	0,47
Nitrato	%	0,00	0,01
Nitrito	%	0,00	0,00
Fosforo Total	%	1,60	1,22
Potássio	%	0,11	0,22
Cálcio	%	1,24	1,04
Magnésio	%	0,26	0,16
Enxofre	%	2,40	1,40
Sódio	%	0,06	0,07
Alumínio	%	2,26	1,74
Sólidos totais voláteis	g/L	0,10	0,10
Sólidos totais	g/L	0,17	0,16
Teor de Cinzas	%	0,07	0,06
Umidade	%	83,00	84,00

Coliformes termotolerantes		59066,67	110400,00
<i>Salmonella</i> [lodo]		426,00	400,67
Cistos viáveis de protozoários		0,00	0,00
Ovos de Helminhos (Viáveis)		3,85	4,37
Massa seca	%	12,82	15,22
<i>Ascaris</i>	nº ovos viáveis/g MS	0,69	0,54
<i>Hymenolepis</i>	nº ovos viáveis/g MS	0,68	0,66
<i>Trichuris sp</i>	nº ovos viáveis/g MS	0,12	0,34
<i>Schistoma sp</i>	nº ovos viáveis/g MS	0,06	0,21
<i>Toxocara sp</i>	nº ovos viáveis/g MS	0,00	0,03
Nº Total de ovos viáveis/ g MS	nº ovos viáveis/g MS	1,57	1,77

Tabela 2: Identificação dos tratamentos recebidos nas áreas estudadas

IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA	TRATAMENTO	TALHÃO
A1	Área Degradada	5
A2	Lodo + Crotalaria	11
A3	Lodo + Guandu	11
A4	Lodo	16
A5	Cerrado	-

3.2. Amostragem do solo

A área está contida na Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá, cuja classe de solo dominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo (CAESB, 2013).

Em cada uma das cinco áreas estudadas foram coletadas, aleatoriamente, com o auxílio de um trado holandês, cinco amostras compostas de cinco subamostras, que se constituíram nas repetições amostrais, nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm. Em cada área, foi traçada uma linha diagonal e, ao longo desta linha, de forma equidistante, foram demarcados os pontos amostrais. Para compor a amostra composta foram misturadas as cinco subamostras, coletadas uma ao centro e quatro no perímetro da delimitação da área dessa amostra (Figura 3). O solo foi coletado no início da estação chuvosa, no dia 08 de novembro de 2013, aproximadamente um ano após a aplicação do LE. Uma sequência de imagens das áreas estudadas e dos pontos de amostragem de solos é apresentada na Figura 4.

Depois de coletadas, as amostras foram passadas em peneiras com abertura de 2 mm e divididas em duas alíquotas. A primeira foi acondicionada em geladeira para análise da biomassa microbiana e a segunda foi seca ao ar, formando a terra fina seca ao ar (TFSA) para as análises dos indicadores de fertilidade do solo.

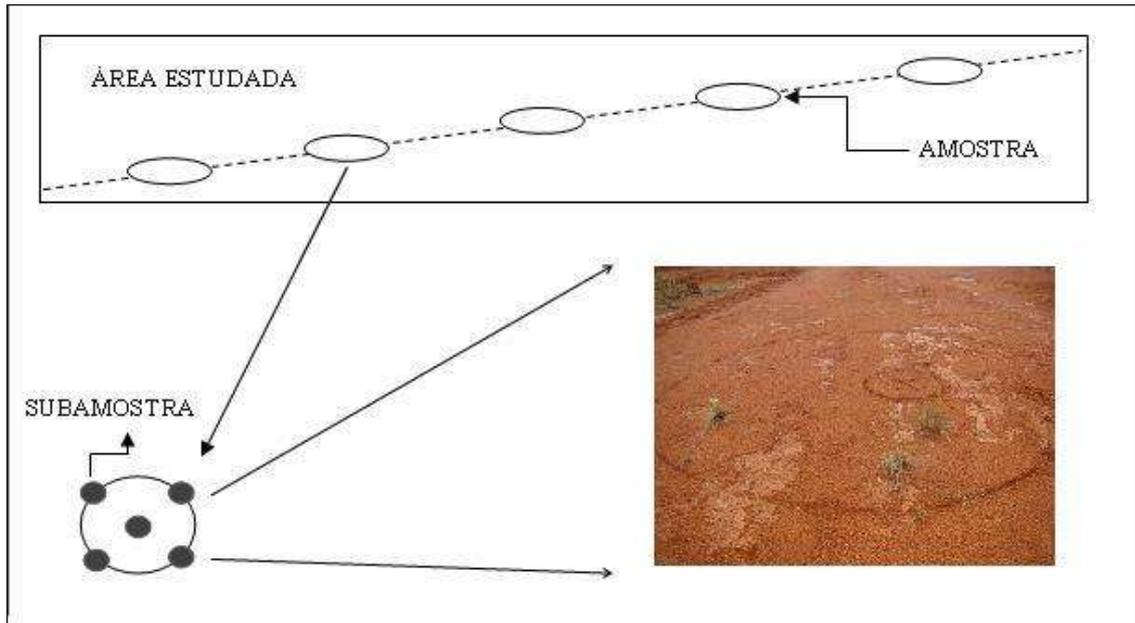


Figura 3: Esquema ilustrativo e registro fotográfico da demarcação dos pontos de amostragem do solo.

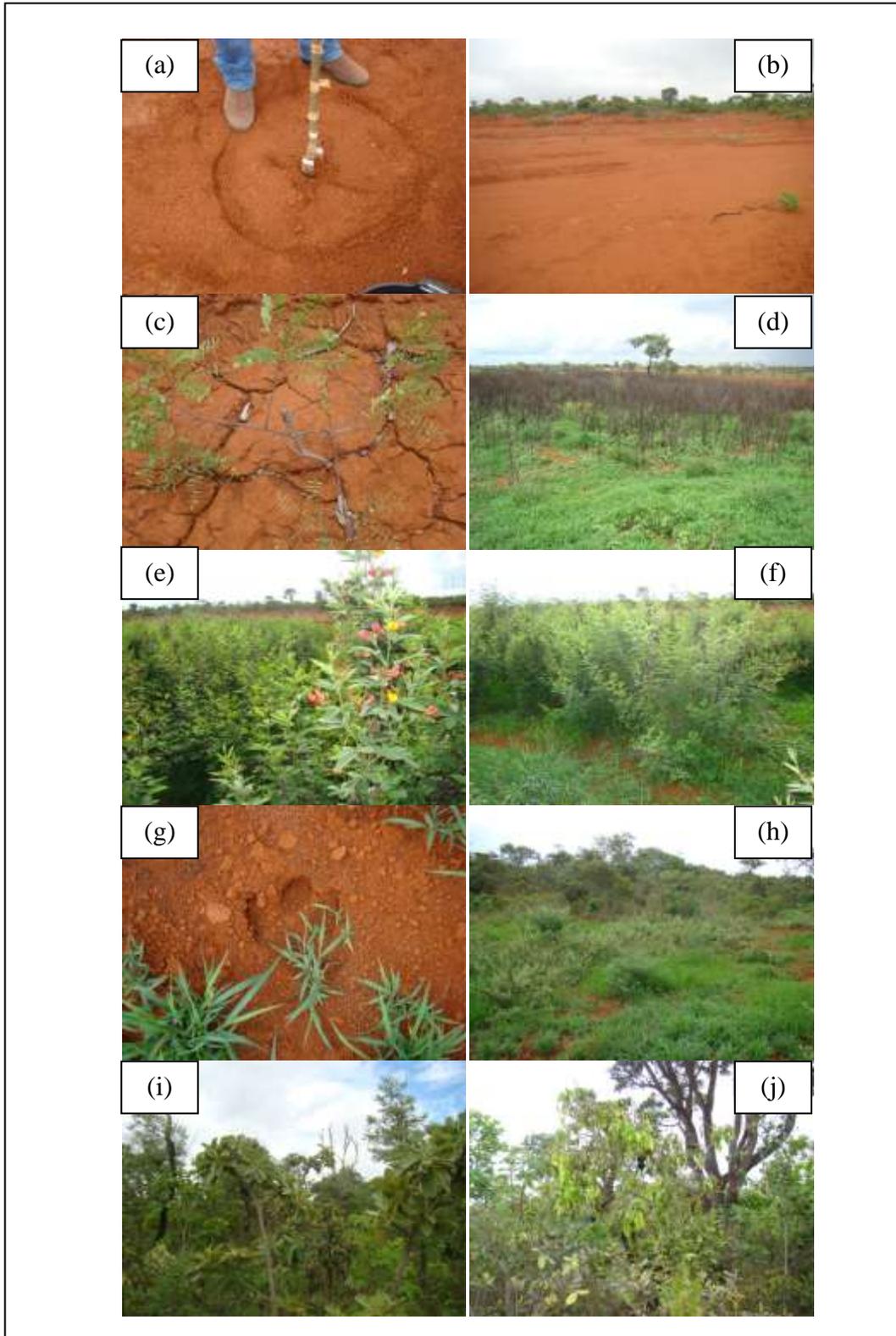


Figura 4: Coleta do solo com trado holandês (a), A1 (b), Detalhe da erosão do solo na A1 (c), A2 (d), A3 (e), A3 (f), Vestígio de fauna (anta) na A4(g), A4 (h), A5 (i), A5 (j).

3.3. Procedimentos analíticos

Foram determinados os seguintes atributos químicos e biológicos do solo: acidez ativa ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$), acidez potencial, P disponível (Mehlich 1), K trocável, cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+}), carbono orgânico total (COT) e carbono da biomassa microbiana (C_{mic}). As análises foram realizadas nos laboratórios de Química do Solo e Matéria Orgânica do Solo da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, ambos pertencentes à Universidade de Brasília. Com exceção da determinação da biomassa microbiana, na qual foi utilizado o método irradiação-extração adaptado de Islam & Weil (1998), todas as análises foram realizadas conforme descrito em Embrapa (2009).

Na determinação do pH foram adicionados 25 mL de água destilada à 10 cm³ de TFSA de cada amostra de solo. A solução foi agitada por 5 minutos e permaneceu em repouso por 60 minutos. Em seguida, fez-se a leitura no pHmetro já ajustado com as soluções tampão pH 7,0 (KH_2PO_4 0,025 mol L⁻¹ e Na_2HPO_4 0,025 mol L⁻¹) e pH 4,0 ($\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ 0,05 mol L⁻¹).

Para a determinação da acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) foram adicionados 75 mL da solução extratora ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ca} \cdot \text{H}_2\text{O}$) à 5 cm³ de TFSA de cada amostra de solo, passando por uma agitação de 15 minutos e permanecendo em repouso por 16 horas para decantação do solo. A solução foi filtrada em papel filtro faixa branca e foram adicionadas 3 gotas de fenolftaleína 3% à 25 mL do filtrado. A titulação foi feita com NaOH 0,025 mol L⁻¹.

Na determinação do Al^{3+} foram adicionados 100 mL da solução extratora (KCl 1 mol L⁻¹) à 10 cm³ de TFSA de cada amostra de solo, passando por uma agitação de 5 minutos e permanecendo em repouso por 16 horas para decantação do solo. A solução foi filtrada em papel filtro faixa branca e foram adicionadas 4 gotas de azul de bromotimol 0,1% à 25 mL do filtrado. A titulação foi feita com NaOH 0,025 mol L⁻¹. Para o procedimento do $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ foram pipetados 25 mL do mesmo filtrado utilizado na determinação do alumínio e adicionados 4 mL do coquetel ($\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_4\text{OH} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{EDTANa}_2 + \text{TEA} + \text{KCN}$ 10%), 1 mL do ácido ascórbico 3% e 3 gotas do negro de Eriocromo T 0,2%. A titulação foi feita com EDTANa₂ 0,005 mol L⁻¹.

Na determinação do K^+ , à 5 cm³ de TFSA de cada amostra de solo foram adicionados 50 mL de solução extratora (H_2SO_4 0,0125 mol L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹), passando por uma agitação de 5 minutos e permanecendo em repouso por 16 horas para decantação do solo. A solução foi filtrada em papel filtro faixa branca e em seguida fez-se a leitura das soluções de trabalho para obtenção da curva padrão (0 – 3 – 6 – 9 – 15 – 25 µg K⁺/mL) e dos filtrados no fotômetro de chama.

Conforme o método Mehlich 1 para determinação de P, aos 5 mL do filtrado utilizado na determinação do potássio foram misturados 10 mL da solução reagente diluída ($\text{Bi}_2\text{O}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$) e 1 mL de ácido ascórbico. Após um repouso de 60 minutos, os teores de P foram determinados por espectrofotometria a 660 nm, obtendo-se a curva padrão com as soluções de trabalho de P (0 – 1 – 2 – 3 – 4 $\mu\text{g P/mL}$).

Para a determinação do carbono orgânico total (COT) utilizou-se o método Walkey & Black, sem fonte externa de calor. Para isso, à 0,5 g de TFSA de cada amostra de solo, passada em peneira 0,5 mm, foram adicionados 10 mL de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,167 mol L^{-1} . Após agitação da mistura, foram adicionados 20 mL de H_2SO_4 concentrado e a solução permaneceu em repouso por 30 minutos. Em seguida adicionaram-se 200 mL de água destilada e 1 mL do difenilamina 0,16%. A titulação foi realizada com $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,25 mol L^{-1} .

A determinação do carbono da biomassa microbiana foi realizada pelo método extração-irradiação. As amostras, que estavam armazenadas em geladeira, foram colocadas para secar ao ar 24 horas antes da análise. De cada amostra de solo foram pesadas seis subamostras de 20 g, três para irradiação e três para não irradiação. As amostras foram irradiadas em forno micro-ondas por 137 segundos (tempo de exposição calculado para seis amostras de 20 g). Após a irradiação, a extração das 6 subamostras foi realizada com 80 mL K_2SO_4 a 0,5 mol L^{-1} e a solução foi submetida à agitação por 30 minutos em agitador horizontal a 150 rpm, posteriormente deixadas em repouso por aproximadamente 30 minutos. Filtrou-se o sobrenadante em recipientes de plástico com auxílio de papel filtro faixa branca. Uma alíquota de 8 mL do filtrado foi acrescentada a 2 mL de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,066 mol L^{-1} e 10 mL de H_2SO_4 . Após o esfriamento da solução acrescentaram-se 50 mL de água destilada e novamente esperou-se esfriar. Foram adicionadas 3 gotas do indicador ferroin e titulou-se o excesso de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ com $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,033 mol L^{-1} . O carbono da biomassa microbiana foi calculado pela fórmula: $\text{CBM} = (\text{CI} - \text{CNI}) / \text{Kec}$, onde, CI e CNI: representam o total de carbono orgânico liberado das subamostras irradiadas e não irradiadas, respectivamente; o Kec: fator que representa a quantidade de carbono proveniente da biomassa microbiana. Neste estudo utilizou-se o $\text{Kec} = 0,33$ (Mendonça & Matos, 2005).

3.4. Delineamento experimental e análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância para identificar os efeitos das diferentes condições ambientais (área degradada e em recuperação) sobre as variáveis analisadas. Para isso, os dados foram analisados considerando um delineamento inteiramente

casualizado. Para comparação das médias foi utilizado o teste de Tukey ($p < 0,05$) para cada profundidade separadamente.

Os dados de todas as variáveis em conjunto foram submetidos à análise de componentes principais (PCA), a partir de combinações lineares das variáveis originais em eixos ortogonais independentes. Esta análise foi realizada com o objetivo de identificar quais fatores (LE e adubos verdes) mais interferem no agrupamento das variáveis. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software XLSTAT 2011.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Carbono orgânico e biomassa microbiana do solo

Os teores de carbono orgânico total (COT) e carbono da biomassa microbiana (Cmic) são apresentados na Figura 5. A área degradada (Deg) promoveu redução dos teores de COT, com diminuição de 80 e 88% nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente, em relação à área de Cerrado (Cer), demonstrando que o processo de degradação reduz drasticamente os níveis de matéria orgânica do solo. O uso de LE exclusivo ou associado com adubos verdes crotalária e guandu (respectivamente L, L+C e L+G) promoveu elevação dos teores de COT em relação à Deg, sem, no entanto, alcançar os teores da área nativa. Efeitos positivos do uso do LE na elevação dos teores de COT de áreas degradadas também foram verificados por outros autores (Colodro et al., 2006; Teixeira et al., 2007; Trannin et al., 2008). Esses resultados demonstram os efeitos positivos do uso exclusivo de LE ou associado com adubos verdes na recuperação dos teores de matéria orgânica de solos degradados.

Os efeitos da degradação do solo e da sua recuperação são claramente observados através do comportamento da biomassa microbiana do solo, expresso pelos teores de carbono da biomassa microbiana (Cmic). As áreas estudadas foram diferenciadas em três grupos: Cer, com os maiores teores de Cmic; L, L+C e L+G, apresentando teores intermediários; e Deg, com os menores teores de biomassa microbiana (Figura 5b). A redução da massa total de microrganismos na Deg em relação ao Cer foi de 94 e 90%, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente. Modesto et al. (2009) obtiveram resultados apontando que o aumento da atividade microbiana em decorrência da aplicação de LE se deu provavelmente por esse resíduo ser uma fonte de nutrientes, especialmente fósforo, e de matéria orgânica, fundamentais para a atividade microbiana. Longo et al. (2011) destacam um aumento significativo do Cmic com o plantio de leguminosas utilizadas na adubação verde, também observado nesse trabalho.

Com o processo de recuperação, o aumento da disponibilidade de substrato (carbono orgânico) favoreceu o restabelecimento da população microbiana, componente fundamental para que a qualidade do solo sustente as etapas posteriores da recuperação, como a revegetação da área.

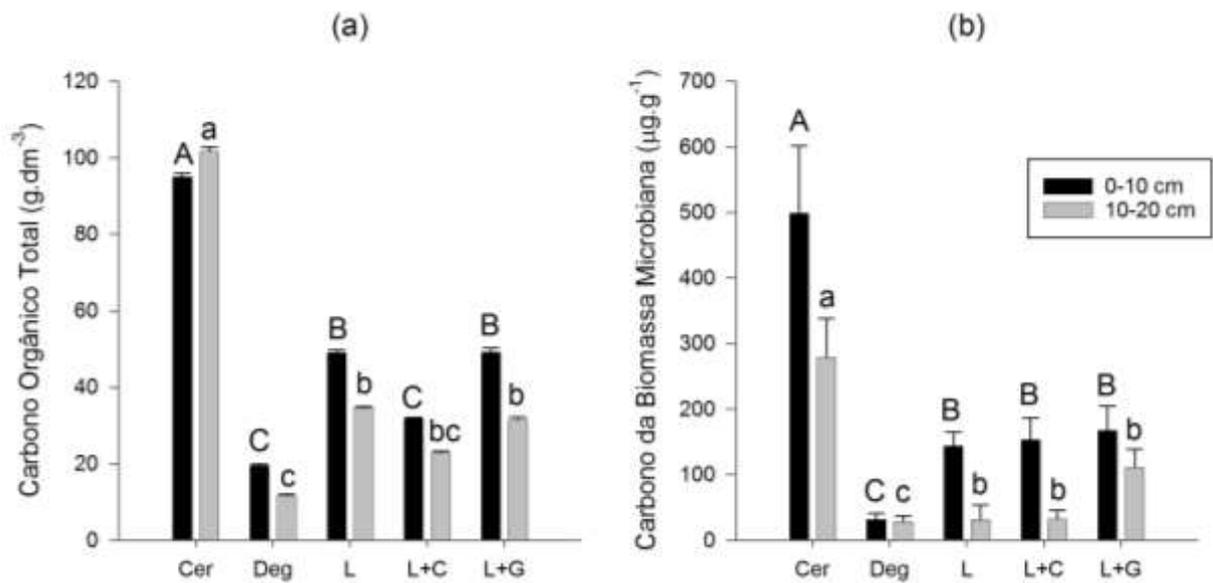


Figura 5: Carbono orgânico total - COT (a) e Carbono da biomassa microbiana - Cmic (b) nas diferentes áreas estudadas. Letras iguais, maiúsculas na profundidade de 0-10 cm e minúsculas de 10-20 cm, indicam que não há diferença estatística entre as áreas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média.

4.2. Teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio

Os teores de P, K⁺, e Ca²⁺ e Mg²⁺ são apresentados na Figura 6. Os maiores impactos do uso do LE e de adubos verdes foram verificados no aumento da disponibilidade dos nutrientes.

Os teores de K⁺ (Figura 6a) na profundidade de 0-10 cm do solo Cer foram maiores do que na Deg e na L. Com a degradação, a redução nos valores de K⁺ foi de aproximadamente 84%. Os adubos verdes foram necessários para a elevação dos teores de potássio no solo, sendo que as áreas L+C e L+G apresentaram os maiores incrementos, se igualando aos solos de Cer. Já na profundidade 10-20 cm, a degradação reduziu em 90% o teor de K⁺ em relação à área nativa. Os solos em recuperação apresentaram um aumento expressivo dos níveis de K⁺ em relação ao solo degradado, de modo que todos os tratamentos de recuperação se equipararam aos solos de Cerrado.

Apesar do aumento significativo de K⁺ nos solos em recuperação (L, L+C e L+G) em relação à Deg, o teor observado ainda se enquadrava como baixo ou médio, de acordo com Sousa & Lobato (2004). Isso se deve à baixa concentração de K⁺ na composição do lodo, pelo fato desse elemento se encontrar na forma predominantemente iônica nas águas residuárias, de modo que durante o tratamento, o K⁺ tende a ficar em solução ao invés de precipitar no lodo (Tsutiya, 2001). O uso de adubos verdes juntamente com a aplicação do LE

proporcionou aumento do teor de K^+ no solo, em ambas as profundidades. A introdução de adubos verdes pode favorecer a ciclagem de nutrientes no solo, possibilitando um maior acúmulo de K^+ .

As maiores variações foram verificadas nos valores de P, cujos teores passaram de $0,8 \text{ mg dm}^{-3}$ na Deg para 745 mg dm^{-3} na L (Figura 6b). Em ambas as profundidades analisadas, os teores de P nos solos Cer e Deg foram menores que 1 mg dm^{-3} . Nos solos L, L+C e L+G houve um aumento muito expressivo dos teores médios de P de até 878% na profundidade 0-10 cm e 230% na profundidade 10-20 cm em relação aos solos Cer. Esses resultados demonstram que a aplicação de LE representa uma excelente alternativa para fornecimento de P, nutriente tão escasso em solos do Cerrado e fundamental para a revegetação de áreas degradadas. Entre as áreas em recuperação a L+G não apresentou o mesmo desempenho das demais áreas, assemelhando-se à Deg e inferior a área L, portanto, com menor efeito no fornecimento de P ao solo. Os resultados demonstram que o fornecimento de P é mais dependente do LE do que do adubo verde. Na literatura científica, já são bem conhecidos os elevados teores de P no LE, como no trabalho de Modesto et al. (2009). Tendo em vista o seu elevado teor de matéria orgânica, o LE pode reduzir a fixação do P por óxidos de ferro, pois os radicais orgânicos competem pelos sítios de absorção do P (Colodro et al., 2006), aumentando os teores de P em formas disponíveis para as plantas.

A distribuição dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} entre as áreas seguiu o mesmo padrão do K^+ . O uso conjunto de LE e adubos verdes elevou os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , em ambas as profundidades, sendo o tratamento L+G superior aos demais sistemas (Cer e Deg), não se diferenciando apenas da área L+C (Figura 6c). Assim como aconteceu com os demais nutrientes, a degradação da área nativa promoveu intensa redução dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} na ordem de 99% em ambas as profundidades. Colodro et al. (2006), Bezerra et al. (2006) e Teixeira et al. (2007) também observaram aumentos significativos nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} com o uso do LE na recuperação de áreas degradadas. Assim como para o K^+ , o uso de adubos verdes em conjunto com LE promoveu um incremento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo.

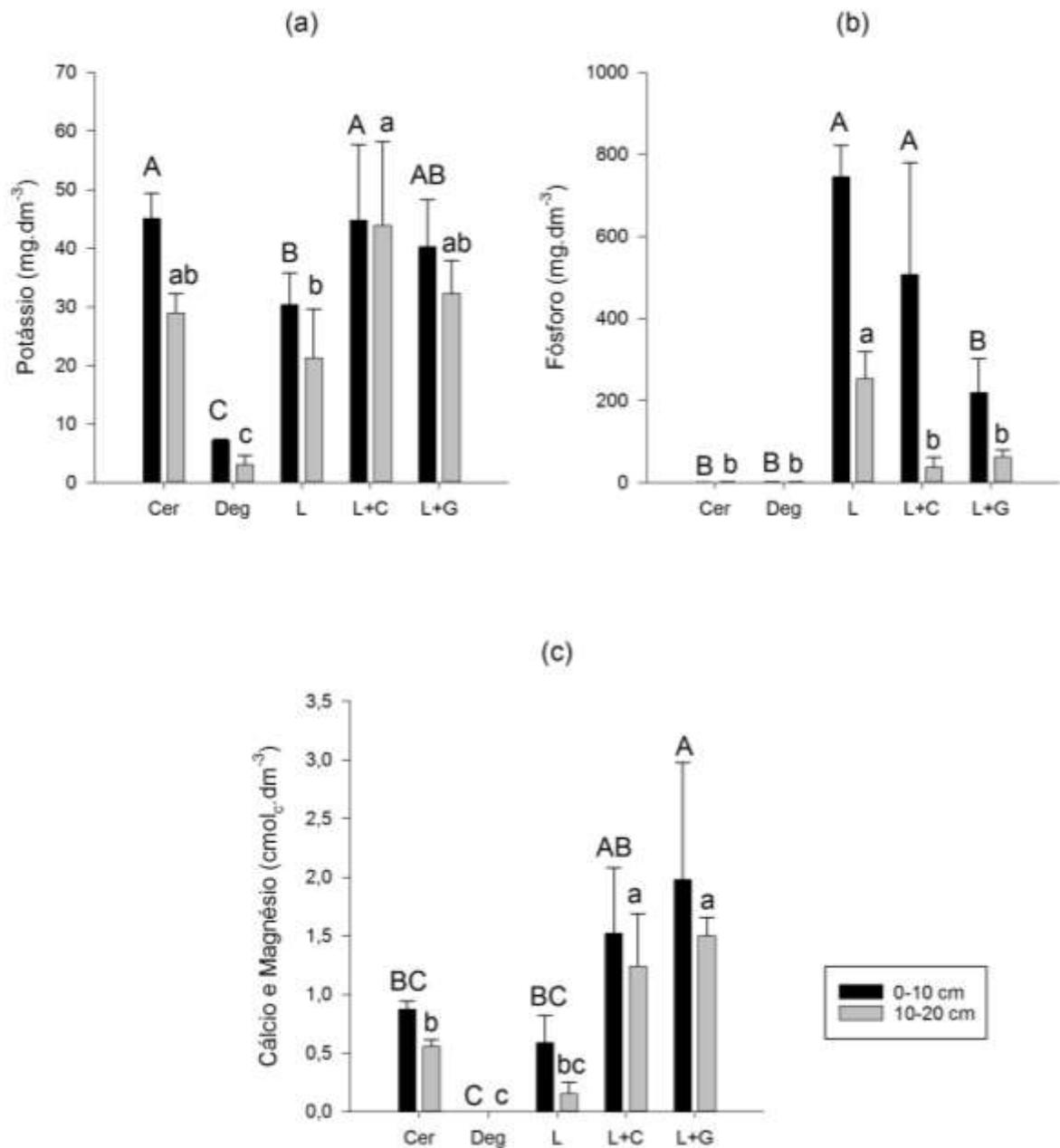


Figura 6: Potássio (a), Fósforo (b) e Cálcio e Magnésio (c), nas diferentes áreas estudadas. Letras iguais, maiúsculas na profundidade de 0-10 cm e minúscula de 10-20 cm, indicam que não há diferença estatística entre as áreas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média.

4.3. Componentes de acidez do solo

Os valores de pH, acidez potencial e acidez trocável (Al^{3+} trocável) das áreas estudadas são apresentados na Figura 7. A aplicação de LE e o uso de adubos verdes não alteraram o pH do solo na camada de 0-10 cm (Figura 7a), demonstrando que, em solos ácidos do Cerrado, o pH do solo é pouco influenciado pela dosagem de LE aplicada. Na profundidade 10-20 cm houve uma leve redução dos teores de pH nas áreas L e L+G em

relação às demais áreas. Uma pequena diminuição no valor de pH do solo pode ocorrer dependendo da dose de lodo aplicada e essa acidificação pode estar associada às reações de mineralização do nitrogênio orgânico, à provável oxidação de sulfitos e à produção de ácidos orgânicos durante a degradação do resíduo por microrganismos, conforme destacado por Simonete et al. (2003). No processo de nitrificação, $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$ através das bactérias nitrossomonas e nitrobacter, respectivamente, liberam-se íons H^+ para a solução do solo. Quanto maior for a dosagem do lodo, que é rico em NH_4^+ , maior a liberação de H^+ para a solução do solo (Lobo et al., 2013).

Com o uso dos adubos verdes (L+C e L+G), ocorreu uma pequena alcalinização em relação ao solo L, em ambas as profundidades, gerando uma situação mais próxima aos solos Cer, principalmente com o tratamento L+C. No entanto, pode-se afirmar que a utilização do LE com adubos verdes não provocou alterações expressivas no valor de pH. Colodro et al. (2006) sugerem que uma correção de acidez do solo antes da aplicação do LE é suficiente para manter o pH em níveis adequados. Já Basta & Sloam (1999) não recomendam o uso de LEs ácidos em solos com reação ácida, devido aos riscos de lixiviação e fitotoxicidade de metais.

Os solos Cer apresentaram maiores teores de H^+Al^{3+} do que os Deg em ambas as profundidades (Figura 7b). A retirada da camada superficial do solo na área degradada promoveu redução da acidez potencial em aproximadamente 84% e 90% nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente, tendo o Cerrado nativo como referência. No processo de recuperação do solo com a aplicação de lodo e plantio de adubos verdes, houve um incremento, em relação ao solo degradado, dos teores de H^+Al^{3+} em ambas as profundidades, confirmando os resultados obtidos por Modesto et al. (2009) e Lobo et al. (2013).

Deve-se destacar que na profundidade 0-10 cm a aplicação exclusiva de lodo ou associado com guandu (L e L+G) promoveu elevação da acidez potencial, com valores similares à vegetação natural. Esses resultados demonstram a influência da matéria orgânica sobre a geração de H^+ , como resultado do processo de mineralização dos compostos orgânicos. O lodo, então, apresenta grande potencial de acidez em função de sua composição com altos teores de matéria orgânica. Diante desses resultados, a aplicação de lodo em áreas degradadas deve ser acompanhada da correta aplicação de corretivos de acidez do solo.

Na camada superficial, os teores de alumínio trocável (Al^{3+}) apresentaram o mesmo comportamento da acidez potencial entre as áreas estudadas, demonstrando que outros mecanismos, além da presença da matéria orgânica, estão envolvidos na disponibilidade da acidez trocável (Figura 7c). Assim como na acidez potencial, a degradação do solo reduziu

drasticamente os valores de Al^{3+} . Diferentemente da acidez potencial, no processo de recuperação do solo com a aplicação de lodo e plantio de adubos verdes, não houve um incremento dos teores de Al^{3+} na profundidade 10-20 cm, em relação ao solo degradado.

Observa-se que, apesar das variações dos teores de Al^{3+} (acidez trocável), a amplitude foi de apenas $0,85 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$, enquanto que na acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) foi de $11,58 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$. Isso demonstra que a influência do H^+ na acidez do solo é muito maior que a do Al^{3+} , provavelmente em função dos altos níveis de matéria orgânica no LE.

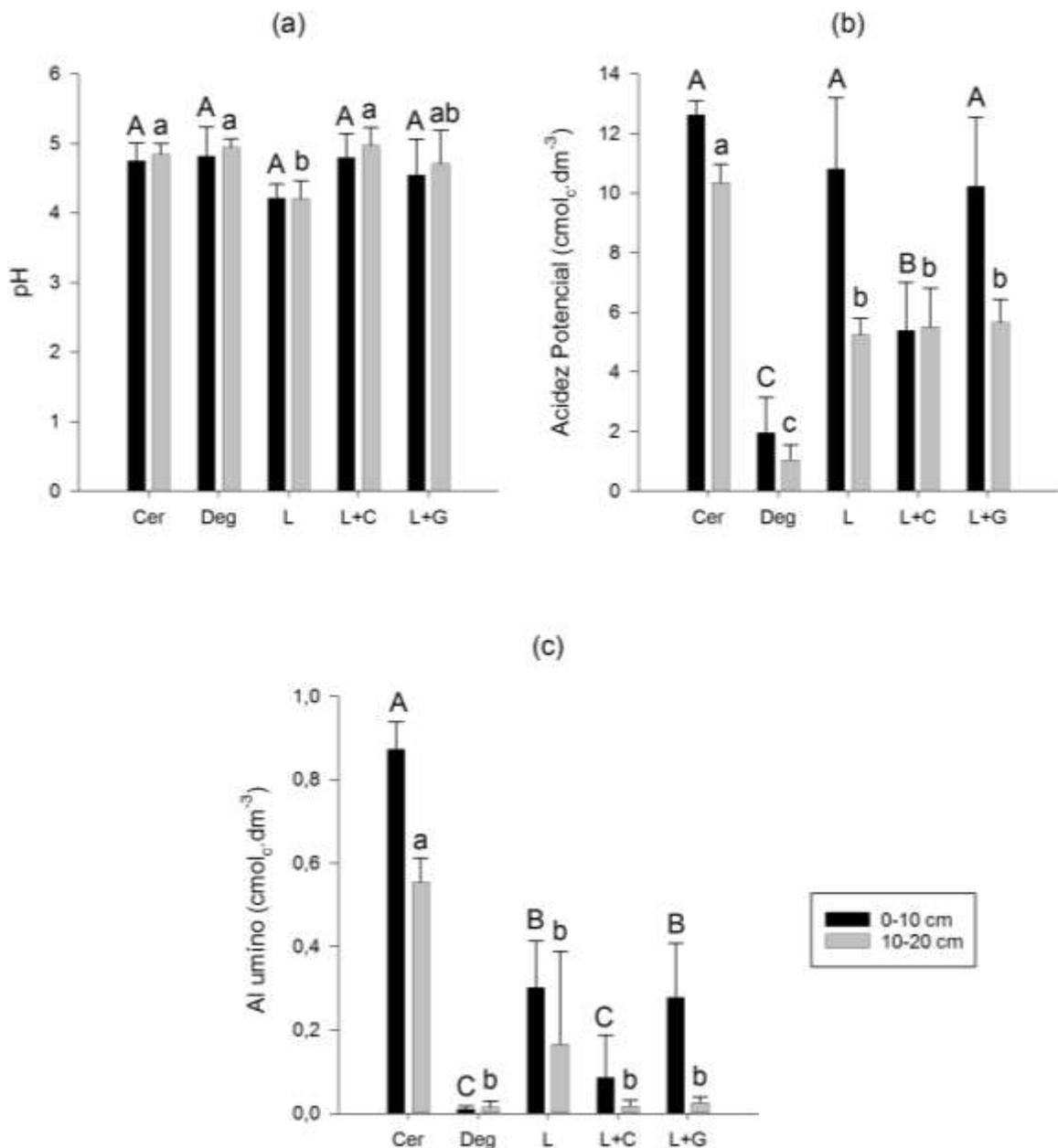


Figura 7: pH em água (a), acidez potencial (b) e alumínio trocável (c) nas diferentes áreas estudadas. Letras iguais, maiúsculas na profundidade de 0-10 cm e minúscula de 10-20 cm, indicam que não há diferença estatística entre as áreas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média.

4.4 Análise conjunta dos dados

Dois componentes principais foram gerados (CP1 e CP2) como ferramentas para a distinção dos efeitos de cada tipo de tratamento estudado, considerando-se as análises realizadas de pH, $H+Al^{3+}$, Al^{3+} , P, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , COT e Cmic em conjunto, para a camada de 0-10 cm (Figura 8a) e 10-20 cm (Figura 8b). Na camada de 0-10 cm a distribuição das variáveis apresentou variância acumulada de 70,07% para a soma dos componentes principais CP1 e CP2. O eixo CP1 separou dois grupos distintos: Cer e Deg, enquanto o eixo CP2 separou três grupos distintos: Cer, Deg, e áreas em recuperação (L, L+C e L+G). Na camada 10-20 cm a variância acumulada foi de 70,04%. O eixo CP1 separou três grupos distintos: Cer, Deg e L. O eixo CP2 também separou três grupos distintos: Cer, L, L+C e L+G. Isto significa que, considerando todos os atributos em conjunto, os tratamentos para a recuperação do solo (L, L+C e L+G) proporcionam um ambiente no solo diferente das demais áreas resultado do processo recente de recuperação, distanciando-se das condições da área degradada e se aproximando do ambiente natural.

Na camada de 0-10 cm (Figura 8a), os atributos que mais diferenciam a área natural das demais são os elevados teores de COT, Cmic e Al^{3+} , e baixos teores de P e Ca^{2+} e Mg^{2+} , típicos de solos sob vegetação natural de Cerrado. Na camada de 10-20 cm, o mesmo padrão da camada superficial é verificado, porém, os altos teores de P em áreas que receberam exclusivamente o lodo tornam esse ambiente diferente daqueles que receberam lodo associado com adubos verdes, provavelmente devido ao consumo de P pelas leguminosas e consequente diminuição da disponibilidade desse nutriente no solo.

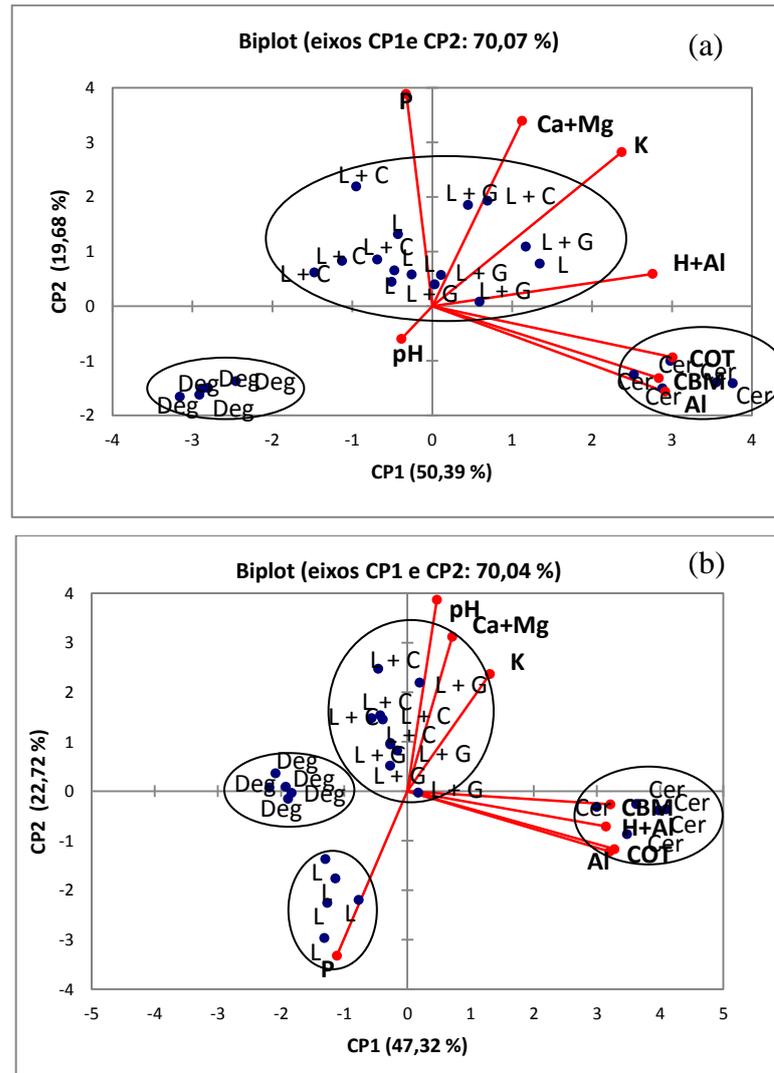


Figura 8: Diagrama de ordenação produzido por análise de componentes principais dos tratamentos estudados (Cer, Deg, L, L+C, L+G) para as análises de pH, H+Al³⁺, Al³⁺, P, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺, COT e Cmic em duas camadas do solo. (a) 0-10 cm; (b) 10-20 cm.

5 CONCLUSÕES

- 1) O uso exclusivo de LE aumentou os teores de COT, Cmic e P e o seu uso associado com adubos verdes elevou os teores K^+ e Ca^{2+} e Mg^{2+} , em relação ao solo degradado.
- 2) O uso exclusivo de LE aumentou os valores de acidez potencial e acidez trocável, e não interferiu nos valores da acidez ativa.
- 3) Considerando todos os atributos em conjunto, o uso do lodo exclusivo ou associado com adubos verdes (L, L+C e L+G) proporcionaram um ambiente no solo diferente das demais áreas, resultado do processo recente de recuperação, distanciando-se das condições da área degradada e se aproximando do ambiente natural, confirmando a hipótese desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, F.F., GIL, F.C., TIRITAN, C.S. Lodo de esgoto na fertilidade do solo, na nutrição de *Brachiaria decumbens* e na atividade da desidrogenase. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 1, p. 1-6, 2009.
- BASTA, N. T.; SLOAM, J. J. Bioavailability of heavy metal in strongly acidic soils treated with exceptional quality biosolids. **Journal of Environmental Quality**, v.28, n.2, p.633-638, 1999.
- BETTIOL, W., CAMARGO, O. A. A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: _____. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna, SP. Embrapa Meio Ambiente, Cap. 2, p. 25-35, 2006.
- BEZERRA, F.B., OLIVEIRA, A.C.L., PEREZ, D.V., ANDRADE, A.G., MENEGUELLI, N.A. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.3, p.469-476, 2006.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, nº 167, Seção 1, p. 141-146, 30 ago. 2006.
- BRASIL. Decreto nº 97.632 de 10 de abril de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, nº 69, Seção 1, p. 5517, 12 abr. 1989.
- BRASIL. Instituto Nacional do Meio Ambiente - IBAMA. Instrução Normativa nº 4 de 13 de abril de 2011. Estabelece exigências mínimas e nortear a elaboração de Projetos de Recuperação de Áreas Degradadas - PRAD ou Áreas Alteradas. **Diário Oficial da União**, nº 67, Seção 1, p. 100-103. 14 abr. 2011.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL - CAESB. Sistemas de esgotamento. Disponível em: <http://www.caesb.df.gov.br/esgoto/sistemas-de-egotamento.html>. Acesso em: 15 set. 2014.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL - CAESB. **Recuperação de áreas degradadas: Projeto Pátio Ferroviário**. Relatório de Operação da Superintendência de Operação e Manutenção de Esgotos – POE. 2013.
- CAMPOS, F.S., ALVES, M.C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1389-1397, 2008.
- COLODRO, G., ESPÍNDOLA, C.R. Alterações na fertilidade de um latossolo degradado em resposta à aplicação de lodo de esgoto. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 15, Jan./March, 2006.

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**, v. 34 p. 1435-1443, 2010.

DISTRITO FEDERAL. Conselho do Meio Ambiente do Distrito Federal- CONAM. Resolução nº 3 de 18 de julho de 2006. Disciplina o Uso do Lodo de Esgoto no Distrito Federal e dá outras providências. **Diário Oficial do Distrito Federal**, nº 138, Seção 1, p. 10-13, 20 jul. 2006.

DISTRITO FEDERAL. LEI Nº 3.232, DE 3 DE DEZEMBRO DE 2003. Dispõe sobre a Política Distrital de Resíduos Sólidos e dá outras providências. **Diário Oficial do Distrito Federal**, nº 240, Seção 1, p. 1-3, 11 dez. 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília, Informação Tecnológica, 628p. 2009.

FERNANDES, S.A.P., BETTIOL, W., CERRI, C.C. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. **Applied Soil Ecology**, v. 30, p. 65-77, 2005.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk**. Rome and Earthscan, London. 2011. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/017/i1688e/i1688e00.htm>. Acesso em: 15 out. 2014.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, p. 408-416, 1998.

JANUÁRIO, G.F., FERREIRA FILHO, S.S. Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da Região Metropolitana de São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 117-126, 2007.

KITAMURA, A.E., ALVES, M.C., SUZUKI, L.G.A.S., GONZALEZ, A.P. Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 405-416, 2008.

LEMAINSKI, J, SILVA, E. Utilização do LE da CAESB na produção de milho no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 741-750, 2006.

LOBO, T.F., GRASSI FILHO, H., BULL, L.T., MOREIRA, L.L.Q. Manejo do lodo de esgoto e nitrogênio mineral na fertilidade do solo ao longo do tempo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 2705-2726, 2013.

LONGO, R.M., RIBEIRO, A.I., MELO, W.J. Recuperação de solos degradados na exploração mineral de cassiterita: biomassa microbiana e atividade da desidrogenase. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p.132-138, 2011.

MENDONÇA, E.S; MATOS, E.S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 107p, 2005.

MODESTO, P.T., SCABORA, M.H., COLODRO, G., MALTONI, K.L., CASSIOLATO, A.M.R. Alterações em algumas propriedades de um latossolo degradado com uso de lodo de esgoto e resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 489-1498, 2009.

MOREIRA, J.A.A., OLIVEIRA, I.P., GUIMARÃES, C.M., STONE, L.F. Atributos químicos e físicos de um latossolo vermelho distrófico sob pastagens recuperada e degradada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n. 3, p. 155-161, 2005.

MOSQUERA-LOSADA, M.R., RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A., FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N. Residual effects of lime and sewage sludge inputs on soil fertility and tree and pasture production in a *Pinus radiata* D. on silvopastoral system established in a very acidic soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 161, p. 165-173, 2012.

MUKHERJEE, A., LAL, R., ZIMMERMAN, A.R. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. **Science of the Total Environment**, v. 487, p. 26–36, 2014.

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

NOFFS, P.S., GALLI, L.F., GONÇALVES, J.C. **Recuperação de áreas degradadas da mata atlântica: Uma experiência da CESP – Companhia Energética de São Paulo**. Caderno nº 3. Ministério do Meio Ambiente (Cadernos da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica), 2000. Disponível em: http://www.rbma.org.br/rbma/pdf/Caderno_03.pdf. Acesso em: 15 set. 2014.

RICCI, A.B., PADOVANI, V.C.R., PAULA JUNIOR, D.R. Uso de lodo de esgoto estabilizado em um solo decapitado: II - atributos químicos e revegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 543-551, 2010.

SAMPAIO, T.F., GUERRINI, I.A., BACKES, C., HELIODORO, J.C.A., RONCHI, H.S., TANGANELLI, K.M., CARVALHO, N.C., OLIVEIRA, F.C. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, 2012.

SANCHES, P.M. **De áreas degradadas a espaços vegetados – Potencialidades de áreas vazias, abandonadas e subutilizadas como parte da infraestrutura verde urbana**. 2011. 296 p. Dissertação (mestrado em Paisagem e Ambiente) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16135/tde-05122011-100405/pt-br.php>. Acesso em: 15 out. 2014.

SANTOS, A.C., SILVA, I.F., LIMA, J.R.S., ANDRADE, A.P., CAVALCANTE, V.R. Gramíneas e leguminosas na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características químicas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 1063-1071, 2001.

SILVA, F.C., BOARETTO, A.E., BERTON, R.S., ZOTELLI, H.B., PEXE, C.A., BERNARDES, E.M. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 831-840, 2001.

SILVA, J.A.A., VITTI, G.C., STUCHI, E.S., SEMPIONATO, O.R. Reciclagem e incorporação de nutrientes ao solo pelo cultivo intercalar de adubos verdes em pomar de laranja-‘pêra’. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 1, p. 225-230, 2002.

SIMONETE, M.A., KIEHL, J.C., ANDRADE, C.A., TEIXEIRA, C.F.A. Efeito do lodo de esgoto em um argissolo e no crescimento e nutrição de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 0, 2003.

SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. (editores). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 416 p. 2004.

TAKADA, C.R.S., SERRA, J.C.V., MAFRA, W.A., BORBA, K.C.A. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água no município de Palmas – TO. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 157-165, 2013.

TEIXEIRA, S.T., MELO, W.J., SILVA, E.T. Aplicação de lodo da estação de tratamento de água em solo degradado – Notas Científicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.1, p.91-94, 2005.

TEIXEIRA, S.T., MELO, W.J., SILVA, E.T. Plant nutrients in a degraded soil treated with water treatment sludge and cultivated with grasses and leguminous plants. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 39, p. 1348–1354, 2007.

TRANNIN, I.C.B., SIQUEIRA, J.O., MOREIRA, F.M.S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com LE industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.3, p.223–230, 2008.

TSUTIYA, M.T. Características de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O., eds. **Lodo de esgoto na agricultura**. São Paulo, SABESP, p.89-131, 2001.